



Title	鋳肌面・機械加工面認識と最適計測計画に基づく鋳造品の高品質リバーエンジニアリングの研究
Author(s)	浦田, 昇尚
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第13526号
Issue Date	2019-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k13526
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74276
Type	doctoral thesis
File Information	Akihisa_Urata.pdf



博士論文

鋳肌面・機械加工面認識と最適計測計画に基づく
鋳造品の高品質リバーエンジニアリングの研究

浦田 昇尚

2018 年 12 月

北海道大学大学院情報科学研究科

本論文は北海道大学大学院情報科学研究科に
博士（情報科学）授与の要件として提出した修士論文である。

浦田昇尚

審査委員：	主査	伊達 宏昭	准教授
	副査	金井 理	教授
		金子 俊一	教授

鋳肌面・機械加工面認識と最適計測計画に基づく 鋳造品の高品質リバースエンジニアリングの研究*

浦田 昇尚

概要

現在、非接触式三次元形状測定機の普及に伴い、工業製品の効率的な設計や複製、検査等を目的とした計測データからのソリッドモデル生成を行うリバースエンジニアリング（以下、RE）の需要が増加している。しかし、高品質なソリッドモデルを生成するためには、最適計測位置姿勢からの効率的な計測による計測三角形メッシュの取得と計測三角形メッシュからの高速かつ正確な曲面認識が必要である。

本研究は、非接触式三次元形状測定機を用いた鋳造品の迅速な RE を実現するために、新たな鋳肌面・機械加工面認識手法と最適計測計画手法を提案する。

鋳造品のリバースエンジニアリングは多くの応用上で、機械加工面では高い精度が要求される一方で鋳肌面では要求されない。また、一般に機械加工面は切削加工により行われるため鋳肌面に比べ面粗さが低いことから、提案手法では、最初に粗さに基づいて計測三角形メッシュを鋳肌面と機械加工面に分離し、それぞれの面に適した幾何処理を適応的に適用することで迅速な RE の実現を目指す。さらに、本研究で提案する面属性付きの鋳造品ソリッドモデルは鋳肌面と機械加工面が分離されていることや、機械加工面においてはその面情報が付与されていることから、複製における各機械加工面の加工計画や加工箇所の指示といった処理を自動的に適用することが可能となり、効率的な利用が可能となる。本論文では、鋳造品の計測三角形メッシュからの鋳肌面・機械加工面分離手法、機械加工面認識手法、鋳肌面・機械加工面整形手法、鋳造品の面属性付きソリッドモデル生成手法、鋳造品の最適計測計画手法を開発し、実計測三角形メッシュに対し提案手法を適用した結果の評価を行う。

高品質な鋳造品ソリッドモデルを生成するためには、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取得することが重要であるが、現状の計測機の位置姿勢の決定は計測作業者の経験に頼っており、必ずしも質の高い計測三角形メッシュが取得できているとはいえない。そこで、本研究では鋳造品を対象とした、質の高い計測三角形メッシュを効率よく取得可能な次の最適計測姿勢を自動で推定する最適計測計画手法を開発し、計測シミュレーションによりその有用性を検証する。

キーワード：鋳造品，リバースエンジニアリング，計測三角形メッシュ，
三角形粗さ値推定，鋳肌面・機械加工面分離，
面属性付きソリッドモデル，最適計測計画

A study of high-quality reverse engineering of castings based on casting and machining surface recognition and optimized 3D scan planning[†]

Akihisa Urata

Abstract

Recently, with the spread of 3D scanners, the demand for efficient solid model generation from the scanned data of engineering products is increasing in order to achieve an efficient design, replication, analysis and test of a product's shape. Solid model generation from the scanned data is called reverse engineering (RE). However, in order to generate a high quality solid model, it is necessary to obtain a high quality scanned triangular mesh by optimum scanning pose in 3D scanning process and to recognize a surface by efficient and accurate fitting from scanned triangular mesh.

In this research, we propose new methods of solid model generation and optimized 3D scan planning for high-quality reverse engineering of castings.

Generally, a high accuracy is required for machining surfaces and a low one for casting surfaces. In general, machining surfaces have lower roughness than the casting surfaces, because they are generated by cutting works. Therefore, in our RE approach, casting surfaces and machining surfaces are first classified according to the surface roughness, and then the different geometric algorithms are applied to each surface adaptively. In addition, suitable processes in the applications of the RE models, such as machining margin addition and machining planning for machining surfaces in the duplication, can be automatically applied to each machining and casting surfaces, because they are recognized in our method. In this thesis, we propose separation method of casting and machining surfaces from scanned triangular mesh of castings, recognition methods of machining surfaces, beautification methods of casting and machining surfaces, generation method of solid model of castings with surface properties. The proposed method was applied to scanned triangular meshes and results of the proposed method were evaluated.

In order to generate a high-quality solid model of castings, it is important to acquire a high quality scanned triangular mesh without un-measurement area and accurately scanning. However, since the position and pose of the scanner are determined depending on the experience of the scanning worker, the quality of the scanned triangular mesh is not guaranteed. Therefore, in this thesis, we developed an optimal scanning planning method that automatically estimates the next optimal measurement position and pose which can efficiently acquire a high quality scanned triangular mesh for castings. The proposed method is evaluated its usefulness by scanning simulation.

Key words: Castings, Reverse engineering, Scanned triangular mesh, Estimation of triangle roughness, Separation of casting and machining surfaces, Solid model with surface properties, Next best view

† Doctor's Thesis, Division of System Science and Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, SSI-DT 79165027, December 18, 2018.

目 次

鋳肌面・機械加工面認識と最適計測計画に基づく 鋳造品の高品質リバースエンジニアリングの研究	i
A study of high-quality reverse engineering of castings based on casting and machining surface recognition and optimized 3D scan planning [†]	iii
目 次	v
図目次	viii
表目次	xi
第 1 章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的と手法の特徴	2
1.3 本論文の構成	6
第 2 章 関連研究とその課題	7
2.1 計測データからの曲面認識	7
2.1.1 自由曲面・解析曲面の認識	7
2.1.2 ネジ加工面の認識	9
2.1.3 貫通穴の認識	10
2.1.4 機械加工面間回転面状従属フィーチャの認識	10
2.2 計測三角形メッシュからの粗さ推定	11
2.3 分離した鋳肌面のメッシュ境界整形と認識機械加工面整列	15
2.3.1 鋳肌面メッシュ境界の整形	15
2.3.2 認識機械加工面の整列	15
2.4 光学式三次元計測機を用いた三次元計測	16
第 3 章 鋳肌面と機械加工面の分離に基づく 鋳造品の迅速 RE 手法	19
3.1 鋳造品の迅速 RE 手法の概要と特徴	19
3.2 三角形メッシュからの三角形粗さ値の推定に基づく 鋳肌面・機械加工面分離	20
3.3 機械加工面の認識	22
3.3.1 機械加工平面・円筒面の認識	22

3.3.1.1	機械加工円筒面の認識	22
3.3.1.2	面分類	25
3.3.1.3	誤検出領域除去	25
3.3.2	ネジ加工面の認識	26
3.3.2.1	概要	26
3.3.2.2	分割領域の生成	26
3.3.2.3	ネジ加工面候補領域検出	28
3.3.2.4	ネジ加工面領域パラメータ抽出	29
3.3.2.5	ネジ加工面領域検出	31
3.3.3	貫通穴の認識	31
3.3.3.1	概要	31
3.3.3.2	円状境界頂点集合の抽出	32
3.3.3.3	円状境界頂点集合のペア抽出	33
3.3.3.4	貫通穴のパラメータ抽出	33
3.3.4	機械加工面間回転面状従属フィーチャの認識	34
3.3.4.1	概要	34
3.3.4.2	回転面状従属フィーチャ領域の抽出	35
3.3.4.3	プロファイル曲線の生成	35
3.4	鋳肌面のメッシュ境界と機械加工面の整形	36
3.4.1	鋳肌面メッシュ境界の整形	36
3.4.1.1	概要	36
3.4.1.2	境界曲線抽出	38
3.4.1.3	ターゲット境界曲線の算出	38
3.4.1.4	境界頂点の移動によるメッシュ境界の整形	39
3.4.2	機械加工面の整列	40
3.4.2.1	概要	40
3.4.2.2	支配的な軸の推定	41
3.4.2.3	直交する支配的な軸の推定	42
3.4.2.4	機械加工面の整列	43
3.5	機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルの生成	43
3.6	実験結果と評価	44
3.6.1	実験の概要	44
3.6.2	三角形粗さ値の推定結果	46
3.6.3	鋳肌面・機械加工面分離と機械加工平面・円筒面の認識結果	48
3.6.4	貫通穴の認識結果	50

3.6.5	ネジ加工面の認識結果	52
3.6.6	機械加工面間回転面状従属フィーチャの認識	53
3.6.7	鋳肌面メッシュ境界の整形結果	53
3.6.8	機械加工面の整列結果	54
3.6.9	機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルの生成結果	55
3.7	まとめ	57
第 4 章	鋳造品のための最適計測計画	59
4.1	鋳造品のための最適計測計画の概要と特徴	59
4.2	鋳肌面・機械加工面分離と機械加工面認識	60
4.3	最適計測位置姿勢候補集合の算出	60
4.4	最適計測位置姿勢の決定	62
4.5	計測シミュレーションを用いた推定された最適計測位置姿勢の評価	63
4.6	実験結果と評価	65
4.7	まとめ	68
第 5 章	結論と今後の課題	69
5.1	結論	69
5.2	今後の課題	71
参考文献		73
謝辞		75
付録		77
A.	本研究で使用した三次元形状測定機の計測角度に対する精度の検証	77
A.1	COMET5 11M の計測精度の入射角依存性	77
A.2	COMET5 11M の計測角度閾値	79
B.	対外発表実績	83

図目次

図 1.1	非接触式三次元形状測定機を用いた RE 手法	1
図 1.2	本研究の全体像	3
図 1.3	鋳造品の主要な面	3
図 1.4	提案する最適計測位置姿勢の推定手法	4
図 1.5	従来の RE 手法と本研究で提案する鋳造品の迅速 RE 手法の比較	5
図 2.1	入力メッシュ(左)と抽出した C0 及び C1 境界線(右)[1]	7
図 2.2	ノイズを含んだ入力メッシュ(左)とフィット曲面(右)[2]	8
図 2.3	入力メッシュ(左)とプリミティブ形状検出結果(右)[3]	8
図 2.4	入力メッシュ(左)と曲面抽出結果(右)[4]	9
図 2.5	ネジ加工面 (M170×6) のピッチ推定結果[7]	9
図 2.6	側面が未計測の貫通穴	10
図 2.7	回転面を含む計測点群データ(左)と認識された回転面(右)[9]	11
図 2.8	破碎物体(左下)とその計測メッシュ(左上)と 破碎物体の再構築結果(右)[10]	13
図 2.9	入力メッシュ(左)とその三角形粗さ値推定結果(右)[11]	13
図 2.10	入力メッシュ(左)と λ - μ アルゴリズムによる スムージング結果(右)[12]	13
図 2.11	計測メッシュ(上)と 粗さのサンプリングによる粗さ計測(中)と 粗さの比による粗さ計測(下)[13]	14
図 2.12	三角形粗さ値推定結果	15
図 2.13	認識された曲面から推定した支配的な軸	16
図 2.14	分類されたメッシュ境界エッジに基づく次の計測位置姿勢の算出[15].	17
図 2.15	ボクセル空間とメッシュ境界ループに基づく 次の計測位置姿勢の算出[16]	17
図 3.1	提案 RE 手法の概要	20
図 3.2	実際の鋳造品の表面 (左) とその計測三角形メッシュの表面 (右)	21
図 3.3	計測三角形メッシュと滑らかな基準面とその法線	21
図 3.4	スムージング前後で法線方向が変化しない三角形	22
図 3.5	機械加工面の認識手法	23
表 3.1	外れ値に基づく適応的な平面・円フィッティング	24
図 3.6	平面・円フィッティングに基づく円筒面パラメータ抽出	24

図 3.7	領域成長法による円筒面領域の抽出	24
図 3.8	面分類手法	25
図 3.9	計測三角形メッシュと誤検出領域	26
図 3.10	ネジ加工面領域Sの検出手法	27
図 3.11	ネジ加工面抽出対象パラメータ	27
図 3.12	メッシュの領域分け	27
図 3.13	ネジ加工候補領域検出手法	28
図 3.14	分割されたネジ加工面の候補領域	28
図 3.15	ネジ加工候補領域パラメータ抽出手法	30
図 3.16	側面が未計測の貫通穴	31
図 3.17	貫通穴の認識手法	32
図 3.18	円状境界頂点集合の抽出手法	32
図 3.19	円状境界頂点集合のペア抽出手法	33
図 3.20	最大内接円フィッティングによる貫通穴パラメータの推定	34
図 3.21	回転面状従属フィーチャ領域の抽出手法	35
図 3.22	プロファイル曲線の生成手法	36
図 3.23	複雑な境界をもつ鋳肌面に対する自由曲線パッチ生成結果	37
図 3.24	鋳肌面メッシュ境界の要求事項	37
図 3.25	鋳肌面メッシュ境界の整形手法	38
図 3.26	目標境界線の算出	39
図 3.27	鋳肌面とその隣接機械加工面がほぼ平行に位置する領域（図内赤枠内）	39
図 3.28	境界頂点の目標境界線上への移動	40
図 3.29	機械加工面の整列手法	41
図 3.30	支配的な軸の推定手法	42
図 3.31	直交する支配的な軸の推定手法	42
図 3.32	機械加工面の整列手法	43
図 3.33	機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルの生成手法	44
表 3.2	実験で用いた計測三角形メッシュ	45
図 3.34	三角形粗さ値推定結果	46
図 3.35	鋳肌面粗さ標準片に対する三角形粗さ値推定結果	47
図 3.36	鋳肌面粗さ標準片に対する三角形粗さ値推定結果	47
図 3.37	CAD データ量の低減	49
図 3.38	RE データ作成時間の短縮	50
図 3.39	貫通穴の認識結果	51

図 3.40	ネジ加工面の認識結果	52
図 3.41	機械加工面間回転面状従属フィーチャの認識結果	53
図 3.43	機械加工面の整列結果	54
図 3.44	従来手法によるソリッドモデル生成の流れと課題	56
図 3.45	提案するソリッドモデル生成の流れ	56
図 3.46	機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルの生成結果	57
図 4.1	計測機のモデル	60
図 4.2	提案する最適計測位置姿勢の推定手法	60
図 4.3	鋳肌面からの計測位置姿勢の候補の算出手法	61
図 4.4	機械加工面からの計測位置姿勢の候補の算出手法	61
図 4.5	機械加工面集合に対する評価関数 q の値	62
図 4.6	計測シミュレーション	64
図 4.7	三角形メッシュへの鋳肌面・機械加工面情報の付与結果	64
図 4.8	三角形毎に固有の色を割り当てた描画結果	64
図 4.9	計測シミュレーションによる提案手法の有用性評価プロセス	65
図 4.10	各最適計測位置姿勢における計測結果	66
図 4.11	計測シミュレーション結果	66
図 4.12	計測率 A と未計測部網羅率 C の推移	67
図 4.13	計測品質 Q の推移	67
図 A.1	計測品質 Q の推移	77
図 A.2	検証に使用した計測三角形メッシュ	78
図 A.3	計測角度と平面度の関係	79
図 A.4	平面度の定義	79
図 A.5	ドーム状の物体に対する計測結果	80
図 A.6	未計測部に生成される三角形メッシュ	80
図 A.7	外縁部のみを取り出した計測三角形メッシュ	80

表目次

表 3.1	外れ値に基づく適応的な平面・円フィッティング	24
表 3.2	実験で用いた計測三角形メッシュ	45
表 3.3	計測三角形メッシュに対する三角形粗さ値推定結果と処理時間	48
表 3.4	機械加工面抽出結果	49
表 3.5	推定された貫通穴の直径[mm]	52
表 3.6	推定されたネジ加工面のパラメータ	53
表 3.7	ソリッドモデル生成の処理時間	57
表 A.1	各部分の最大計測角度	81

第1章 序論

1.1 本研究の背景

鋳造品は、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（以下、RE）が、製品開発の効率化や製品の品質向上に用いられている。鋳造品に対しても、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、鋳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。

現在、図 1.1 に示すように、RE は非接触式三次元形状測定機により部品現物を高精度に三次元計測して得られた計測データからソリッドモデルを生成することにより行われており、鋳造部品の修復にこれを活用することが期待されている。しかし、鋳造品はその表面が要求精度の異なる鋳肌面と機械加工面から構成されているが、従来の RE 手法[1,2,3,4]では、面の要求精度の区別なくソリッドモデルを生成していたため、鋳肌面のような要求精度の低い箇所に対しても過剰な品質のモデル化を行っていた。さらに、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ける機械加工箇所の自動選択といった作業への負担軽減の観点から、その表面が鋳肌面と機械加

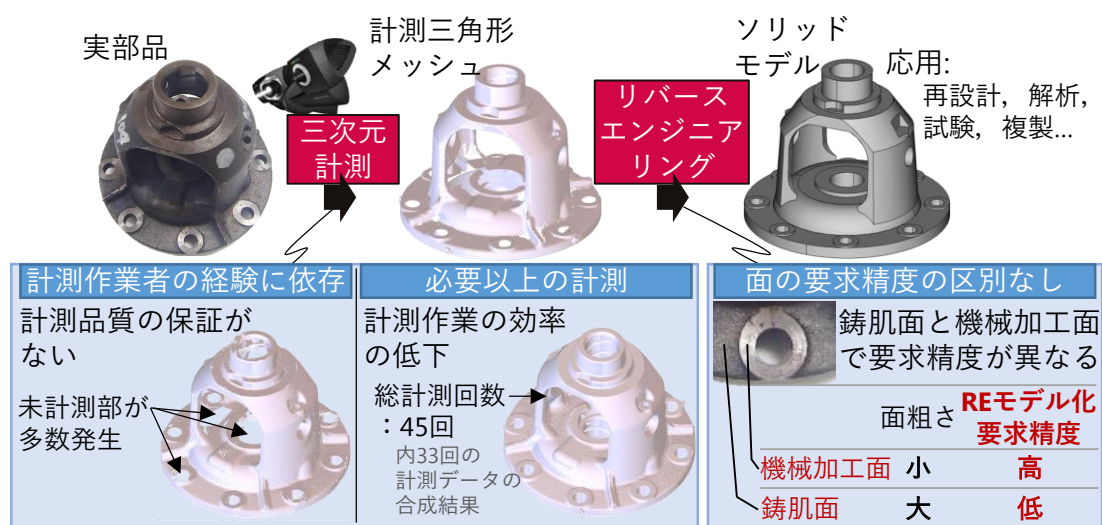


図 1.1 非接触式三次元形状測定機を用いた RE 手法

工面で区別されていることが望ましいが、従来研究で生成されるソリッドモデルには鋳肌面と機械加工面との区別がなく、例えば複製等の後工程において、機械加工を行う箇所を手動で指示する必要がある、非効率的である。

また、鋳造品の三次元計測に用いている光学式三次元形状測定機は一般的に、三次元計測の際の計測表面とカメラ光軸とのなす角が垂直であるほど計測精度が高くなり、一方で、表面とのなす角が水平に近い表面や、遮蔽により投影光とカメラから死角となる箇所は計測できず、未計測部となる。そこで、一般的には計測対象物を複数の位置姿勢から計測し、それぞれの位置姿勢からの計測データを統合することにより計測対象物全体の計測データを取得する。しかし、計測する際の位置と姿勢は従来、計測作業者の経験により決定しているため未計測部が発生する可能性があることや、必要以上の計測により計測作業の効率が低下する問題があった。そこで本研究では、少ない計測回数で高品質（抜けの少ない、計測精度の高い）な計測データを取得可能とするための鋳造品に対する最適計測位置姿勢推定手法を開発する。

1.2 本研究の目的と手法の特徴

1.1 節で述べた課題解決のため、本研究では砂鋳造で製造されたような鋳造品を対象として、鋳造品の特徴である表面の粗さの違いに基づき、計測三角形メッシュを鋳肌面と機械加工面に分離し、それぞれの面に適した幾何処理を適用するといった、従来研究とは異なる新たなアプローチによる鋳造品の迅速 RE の実現を目的とする。研究全体の概要を図 1.2 に示す。具体的には、以下の二つの技術を開発する。

(1) 鋳造品の面属性付きソリッドモデル生成技術

鋳造品の主要な面は、図 1.3 に示す通り、鋳肌面、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構成される。本研究では、鋳造品の計測三角形メッシュから鋳肌面、機械加工平面・円筒面、ネジ加工面、貫通穴、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を認識し、これらの面情報を付加した高品質ソリッドモデルを生成する。生成された面属性付きソリッドモデルは、例えば複製の際の機械加工面の自動選択や製品検証の際の検査対象を機械加工面のみに絞ることが可能となり作業者の負担を大幅に軽減可能である。

(2) 鋳造品の最適計測計画

鋳造品の計測三角形メッシュから、未計測部や再計測が必要な箇所を推定し、未計測部面積の最小化や計測品質の最大化を考慮した最適計測位置姿勢を決定することで、経験に依存しない効率的かつ高品質な鋳造品の計測三角形メッシュの取得を実現する。

従来、計測姿勢の最適化のために Next Best View（以下、NBV）技術が研究されてきており[15, 16]、本研究ではさらに、図 1.4 に示すように、計測三角形メッシュを鋳肌面と機械加工面に分離し、それぞれの要求精度に応じた最適計測位置姿勢候補の算出を行うことで鋳造品の効率的・高精度計測技術を実現する。

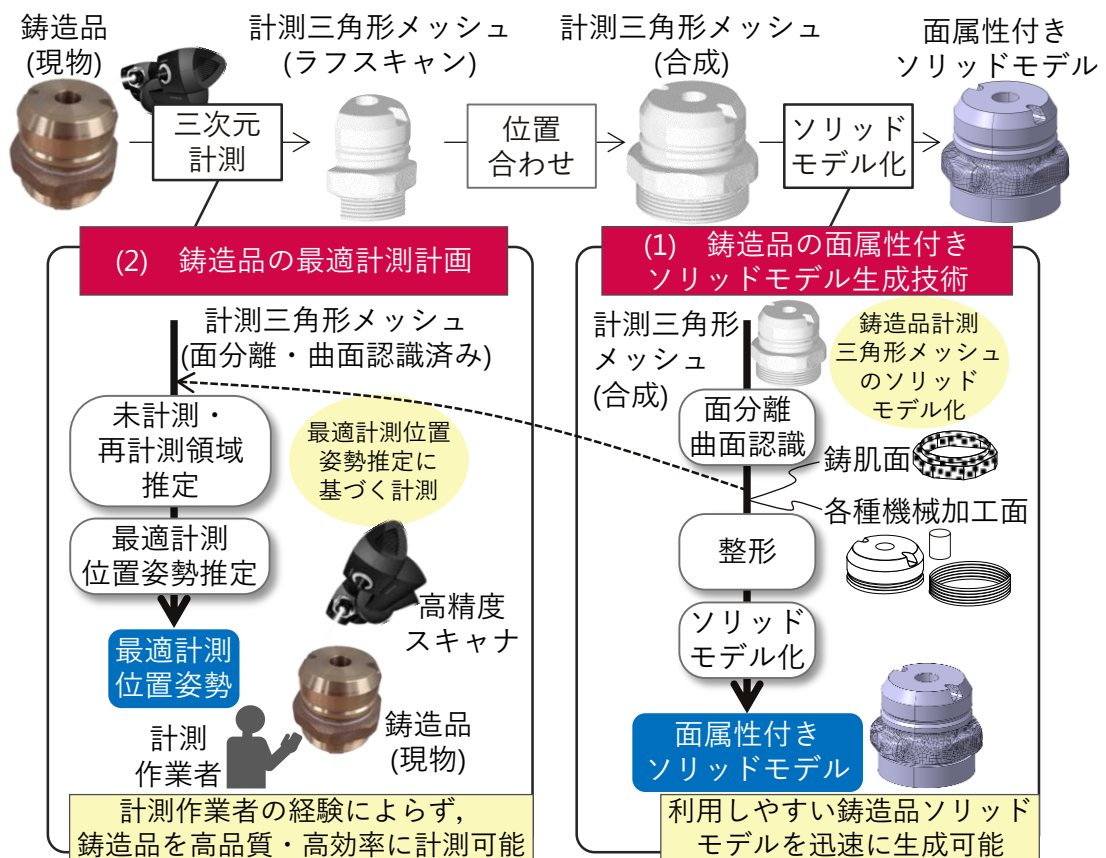


図 1.2 本研究の全体像

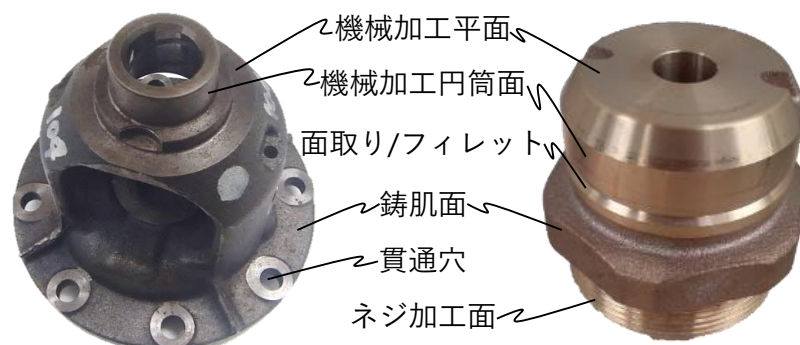


図 1.3 鋳造品の主要な面

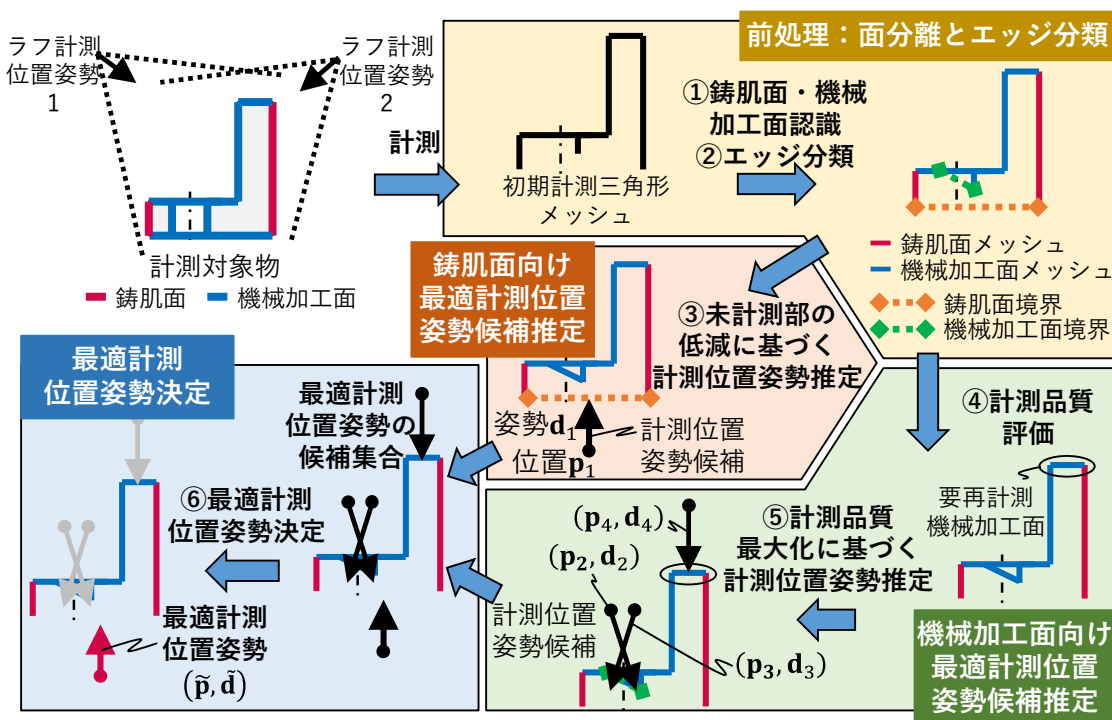


図 1.4 提案する最適計測位置姿勢の推定手法

また、図 1.5(a)に従来の RE を用いた鋳造品の複製工程を示す。従来の RE では、最初に計測三角形メッシュ全体に自由曲面を高精度にフィットし、さらにソリッドモデル化する。次に、加工代付加のために機械加工箇所を指示し、機械加工箇所における加工代付加およびヒケ補正を行った上で木型作成・鋳造を行う。最後に機械加工を行うことで鋳造品の複製を得る。このアプローチの問題点として、以下の 4 つがあげられる。

- ① 機械加工面のモデリング精度と RE の効率の関係がトレードオフであり、鋳肌面の精度に合わせると機械加工面の精度が低下、機械加工面の精度に合わせると鋳肌面の精度が過剰となり非効率
- ② 生成されるソリッドモデルの面に鋳肌面や機械加工面といった区別がされていないため、後工程において機械加工面を手動で指示する必要があり非効率的
- ③ 鋳肌面メッシュに対し自由曲面パッチを張った際に曲面パッチが過密・複雑化し、データ量が増大・RE 作業効率が低下
- ④ 機械加工面が認識・整列されておらず機械加工が困難

これらの問題解決のため、図 1.5 (b)は本研究で提案する新しい RE アプローチを使用した鋳造品の複製工程である。最初に、計測三角形メッシュを鋳肌面と機械加工面に分離し、次に、機械加工面のみに対し高精度な解析曲面フィッティングと整列手法

を適用し、鋳肌面にはメッシュ境界整形と自由曲面フィッティングを適用する。そして、分離された鋳肌面と認識された機械加工面それぞれのソリッドモデルに対する集合演算により機械加工面が整形された鋳造品の面属性付きソリッドモデルを生成する。その後、機械加工面に機械加工代付加、ソリッド・メッシュモデル全体にヒケ補正を行った上で木型作成・鋳造を行う。最後に、機械加工面に対し機械加工を行うことで鋳造品の複製を得る。提案アプローチの従来法における上記4つの問題に対する解決法は以下の4つであり、手法の詳細を3章で記述する。

- ① 問題①に対し、計測三角形メッシュを鋳肌面と機械加工面に分離し、それぞれの面に適応的な処理を適用
- ② 問題②に対し、計測三角形メッシュから鋳肌面と機械加工面を分離し、面属性付きソリッドモデルを生成
- ③ 問題③に対し、鋳肌面メッシュ境界の平滑化により自由曲面パッチ数を低減
- ④ 問題④に対し、認識された機械加工面を整理

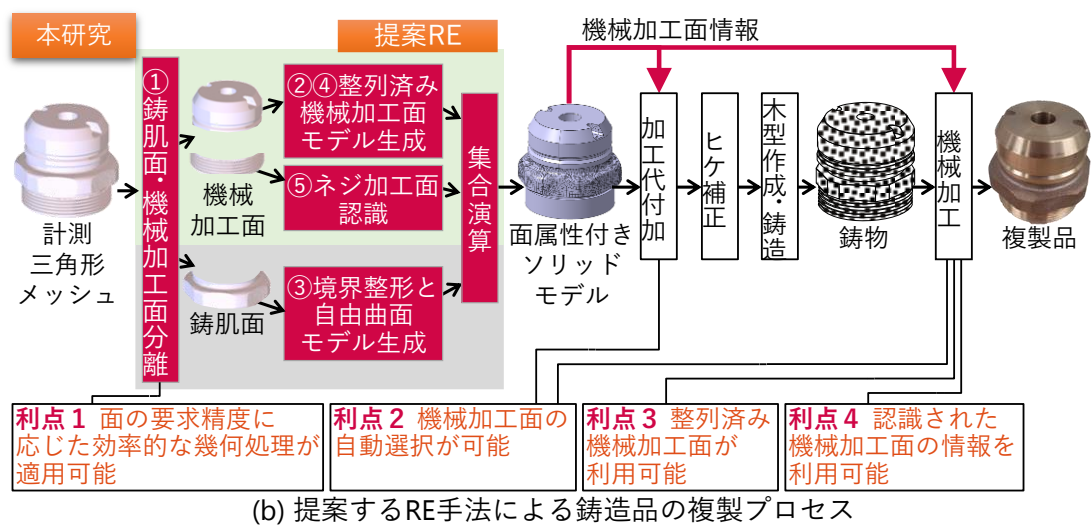
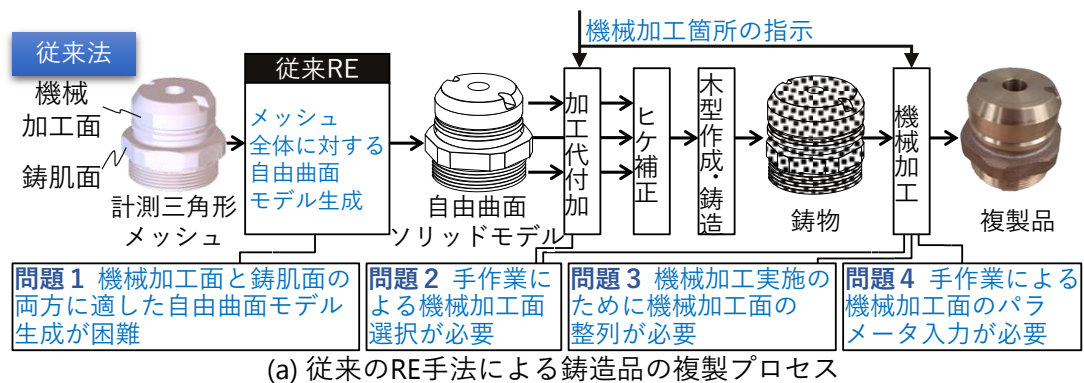


図 1.5 従来の RE 手法と本研究で提案する鋳造品の迅速 RE 手法の比較

1.3 本論文の構成

本論文は5つの章で構成される。2章以降の概要を以下に示す。

第2章 関連研究とその課題

第2章では、本研究に関連する分野である計測データからの曲面抽出に関する既存研究、計測三角形メッシュからの粗さ推定に関する既存研究、光学式三次元計測機を用いた最適計測に関する既存研究を紹介し、これらの問題点と本研究での解決方法について述べる。

第3章 鋳肌面と機械加工面の分離に基づく鋳造品の迅速 RE 手法

第3章では、本研究で提案する鋳肌面と機械加工面の分離に基づく鋳造品の迅速 RE 手法の具体的な処理内容について述べる。処理は大きく3つに分けられ、計測三角形メッシュからの鋳肌面・機械加工面分離と機械加工面の認識、鋳肌面メッシュ境界と機械加工面の整形、そして機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルの生成により構成される。

第4章 鋳造品のための最適計測計画

第4章では、本研究で提案する鋳造品のための最適計測計画手法の具体的な処理内容について述べる。処理は大きく4つに分けられ、計測三角形メッシュのメッシュ境界エッジループの分類、鋳肌面メッシュ境界からの計測位置姿勢の候補生成、認識された曲面からの最適計測位置姿勢の推定、最適計測位置姿勢の決定から構成される。そして、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。

第5章 結論と今後の課題

第5章では、結論と今後の課題について述べる。

第2章 関連研究とその課題

本研究に関係する研究分野として、大きく四つの分野が挙げられる。一つ目が計測三角形メッシュからの曲面認識、二つ目が計測三角形メッシュからの三角形粗さ値推定、三つ目が分離された鋳肌面と機械加工面の整形、四つ目が光学式三次元計測機による三次元計測である。以下ではそれぞれの研究分野の関連研究と問題点を記述する。

2.1 計測データからの曲面認識

2.1.1 自由曲面・解析曲面の認識

非接触式三次元形状測定器で取得した計測三角形メッシュから CAD モデル生成を行うためには、計測三角形メッシュ表面を領域分けし、それぞれの領域で曲面を抽出する必要がある。以下に、4つの代表的な方法と研究例を述べる[1, 2, 3, 4]。

一つ目の方法は境界エッジの検出と境界エッジに囲まれた領域の生成を行う手法である。例えば Tsuchie ら[1]は図 2.1 に示すように、計測三角形メッシュからの法線テンソルに基づき C^0 級と C^1 級の境界を抽出する手法を提案し、ノイズを含んだデータから高精度に領域の境界を検出できることを示した。

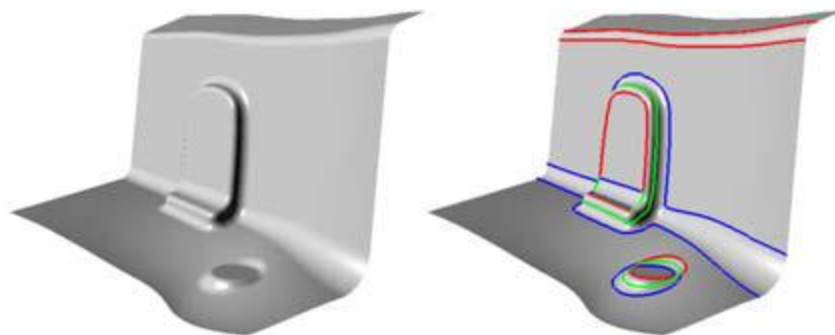


図 2.1 入力メッシュ(左)と抽出した C^0 及び C^1 境界線(右)[1]

二つ目の方法は領域の成長に基づく手法である。Vieira ら[2]は図 2.2 に示すように、曲率推定と領域成長法に基づき、計測三角形から外れ値のノイズを除去し、滑らかな自由曲面モデルを生成する手法を開発した。

三つ目の方法はランダムサンプリングに基づく手法である。Schnabel ら[3]は図 2.3

に示すように、RANSAC に基づき点群からプリミティブ形状を検出する手法を提案した。彼らはノイズを含む点群から平面、円筒面、円錐、球、トーラス形状を抽出できることを示した。

四つ目の方法はクラスタリングに基づく手法である。Yan ら[4]は図 2.4 に示すように、二次曲面を抽出するために variational shape approximation フレームワーク[5]による Lloyd のアルゴリズム[6]に基づくシードの発見とクラスタリングによる二次曲面の抽出手法を提案した。この手法はシードの発見とクラスタリングを行う Lloyd のアルゴリズムに基づき二次曲面を抽出する。

これらの既存研究では部品表面の要求精度に応じた RE 手法は研究されておらず、鋳造品の鋳肌面のような要求精度の低い箇所に対する過剰に高品質な曲面フィッティングの適用や、生成されるソリッドモデルに鋳肌面と機械加工面といった面属性の付与がないことによる後工程における手動操作の要求により効率が低下するといった課題がある。



図 2.2 ノイズを含んだ入力メッシュ(左)とフィット曲面(右)[2]

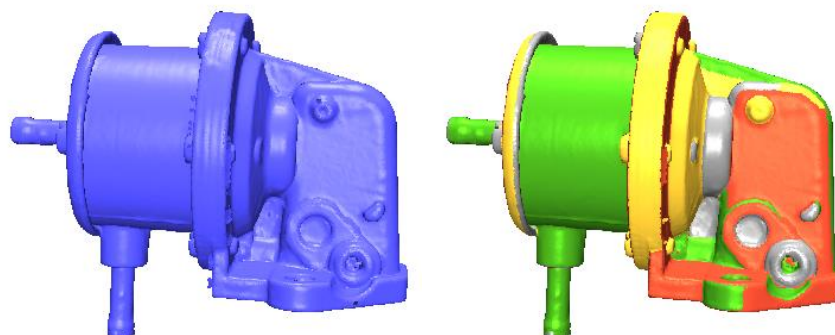


図 2.3 入力メッシュ(左)とプリミティブ形状検出結果(右)[3]

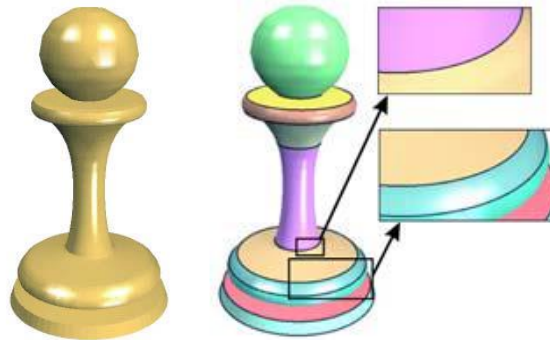


図 2.4 入力メッシュ(左)と曲面抽出結果(右)[4]

2.1.2 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[7, 8]. 例えば Sergey ら[7]や Kosarevsky ら[8]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. 図 2.5 に示すように、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、もしくは手動で抽出した計測データ中の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箇所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、ネジ加工面のパラメータを推定する方法を提案する.

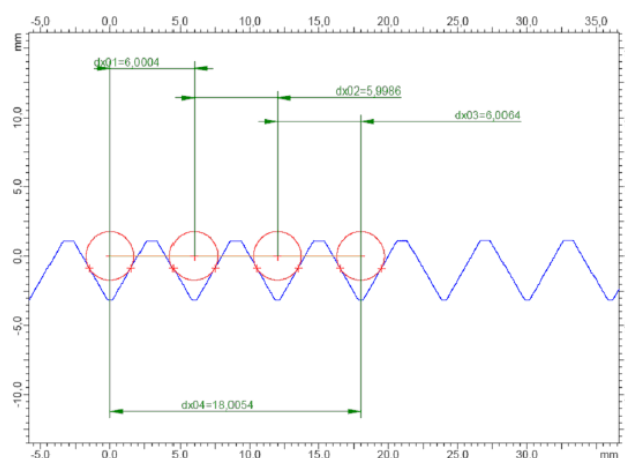


図 2.5 ネジ加工面 (M170×6) のピッチ推定結果[7]

2.1.3 貫通穴の認識

鋳造品中に含まれる貫通穴（丸穴）は遮蔽の影響により側面の計測データを十分に取得できない場合がある．既存研究で提案されたような円筒面フィッティングに基づく円筒面認識手法（例えば，[3]）では，一般的に，四分の一円筒以上の貫通穴の側面を計測できていれば，円筒面として貫通穴を認識できる可能性がある．しかし，図 2.6 に示すような貫通穴の側面が全体に渡って計測されていない貫通穴の場合，円筒面フィッティングによる認識は不可能である．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．

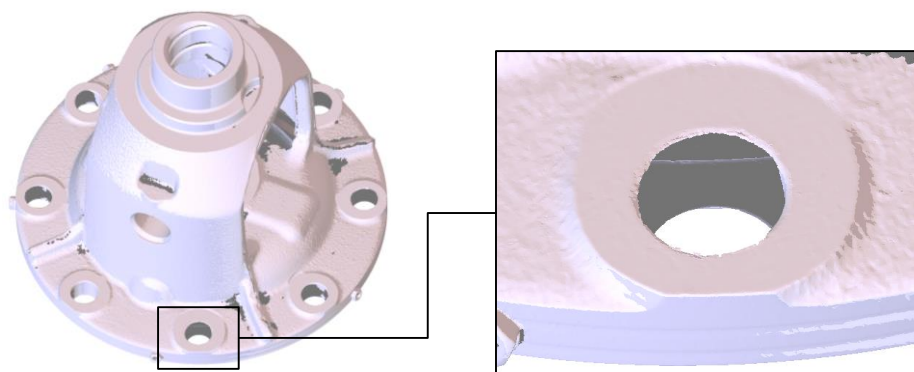


図 2.6 側面が未計測の貫通穴

2.1.4 機械加工面間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，RANSAC[3]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．しかし，この手法では機械加工面間に存在する面取りやフィレットのような領域では，その領域面積の小ささから認識が困難となる可能性がある．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[9]は，図 2.7 に示すように，回転体を含む計測点群データに対し断面系列への円フィッティングに基づき中心軸の推定し，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．

本研究で提案する機械加工面間回転面状従属フィーチャの認識手法は，機械加工面間に存在する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するという性質を利用する．認識処理対象を認識した機械加工面間に絞ることで処理を効

率化し、さらに、隣接する機械加工面との接続を考慮しながら面が生成可能である。

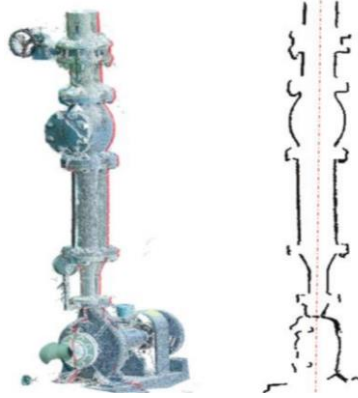


図 2.7 回転面を含む計測点群データ(左)と認識された回転面(右)[9]

2.2 計測三角形メッシュからの粗さ推定

計測三角形メッシュからの粗さ推定の研究はいくつかの分野で行われている[10, 11, 13]. Huang ら[10]は図 2.8 に示すように、破碎物体を再構築する際の、破碎物体のオリジナルの面と破碎面との区別のために、面の点集合に対する曲げエネルギーとして粗さ値を推定する手法を提案した。ある頂点 i の曲げエネルギー $e_k(i)$ は式(2.1)で示される。

$$\bar{e}_{k,r}(i) = \frac{1}{|N_r(i)|} \sum_{j \in N_r(i)} e_k(j) \quad (2.1)$$

ここで、 $N_r(i)$ は頂点 i を中心とする半径 r の球内の頂点集合、 $e_k(j)$ は頂点 i における局所曲げエネルギーであり、式(2.2)により算出される。

$$e_k(i) = \frac{1}{V^*(i)} \sum_{j \in V^*(i)} \frac{\|\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_j\|^2}{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_j\|^2} \quad (2.2)$$

ここで、 $\mathbf{p}_i$ は頂点 i の位置、 $\mathbf{n}_i$ は頂点 i の単位法線ベクトル、 $V^*(i)$ は頂点 i の k 最近傍頂点集合である。

提案手法を破碎物体の計測メッシュに適用したところ、提案手法により推定された粗さに基づきメッシュ表面をオリジナルの面と破碎面を区別可能であることが確認された。

Lavoué ら[11]は図 2.9 に示すように、オリジナルのメッシュ M と平滑化後のメッシュ M^s における、一定空間範囲内の最大主曲率の平均値の差分評価に基づく三角形メッシュモデルの粗さ推定手法を提案した。提案手法は以下のプロセスからなる。

1. オリジナルメッシュ M に対し、図 2.10 に示す λ - μ アルゴリズム[12]に基づくスムージングを適用し、平滑化後のメッシュ M^s を取得
2. M と M^s それぞれの各頂点 i に対する主曲率 κ_{max} を式(2.3)で表される共分散行列 $J(i)$ の第一主成分の固有値として算出

$$J(i) = \frac{1}{|B|} \sum_{\text{edges } e} \beta(e) |e \cap B| \bar{e} \bar{e}^t \quad (2.3)$$

ここで、 B は頂点 i を原点とする半径 r_1 の球に含まれる頂点集合。なお、 r_1 は、メッシュの平均エッジ長さの 3 倍の値を用いている。 $\beta(e)$ は B に含まれるエッジの二面角。 $|e \cap B|$ は B に含まれるエッジ集合の長さの総和。 $\bar{e}$ はエッジの単位方向ベクトルである。

3. M と M^s の各頂点 i に対する平均曲率値 κ_{av} を式(2.4)に基づき算出

$$\kappa_{av}(i) = \frac{1}{|W_r(i)|} \sum_{j \in W_r(i)} \kappa_{max}(j) \quad (2.4)$$

ここで、 $W_r(i)$ は頂点 i を原点とする半径 r の球に含まれる頂点集合。なお、 r は、メッシュのバウンディングボックスの対角線長さの 2%である。

4. M と M^s の各頂点 i における推定粗さ値 $r(i)$ を式(2.5)に基づき算出

$$r(i) = \begin{cases} \kappa_{av}(i) - \kappa_{av}(i^s) & : \text{if } \kappa_{av}(i) > \kappa_{av}(i^s) \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5)$$

Lavoué らは提案手法を計測三角形メッシュに適用することで、ビジュアルマスキングに対する提案手法の正確さとロバスト性を示した。

Lai ら[13]は図 2.11 に示すように、岩盤を分類するために粗さサンプリングと粗さ比に基づく二つの粗さ推定手法を提案し、Lavoué ら[11]の提案した粗さ推定手法との比較を行った。

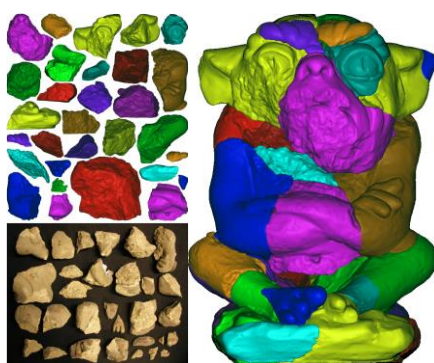


図 2.8 破碎物体(左下)とその計測メッシュ(左上)と破碎物体の再構築結果(右)[10]

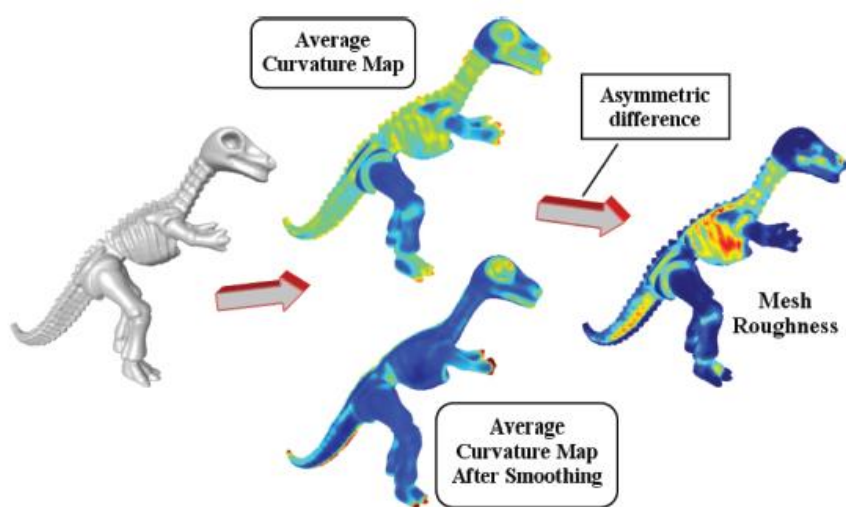


図 2.9 入力メッシュ(左)とその三角形粗さ値推定結果(右)[11]

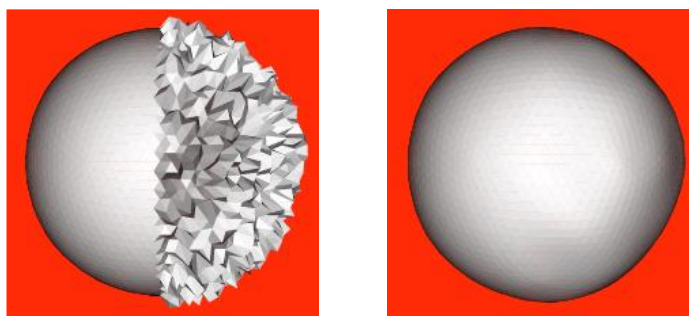


図 2.10 入力メッシュ(左)と λ - μ アルゴリズムによるスムージング結果(右)[12]

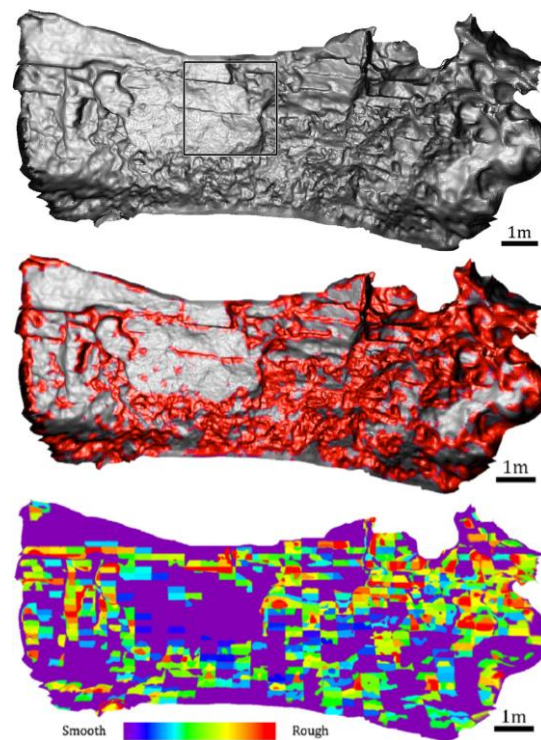


図 2.11 計測メッシュ(上)と
粗さのサンプリングによる粗さ計測(中)と粗さの比による粗さ計測(下)[13]

これらの既存研究[10, 11, 13]で提案された計測三角形メッシュからの三角形粗さ値推定手法は、本来、鋳造品の計測三角形メッシュを対象として開発された手法ではなく、図 2.12 に示すように、機械加工面境界付近で粗さ値が高く推定される部分が存在する、鋳肌面で機械加工面と同程度に粗さ値が低く推定される部分が存在するといった課題があり、本研究での鋳造品の計測三角形メッシュの鋳肌面・機械加工面分離のために使用するには不十分であった。本研究では新たに、スムージング前後の法線差分に基づく三角形粗さ値推定手法を提案し、既存研究[10, 11]で提案された三角形粗さ値推定手法と比較することにより提案手法の有用性を評価する。

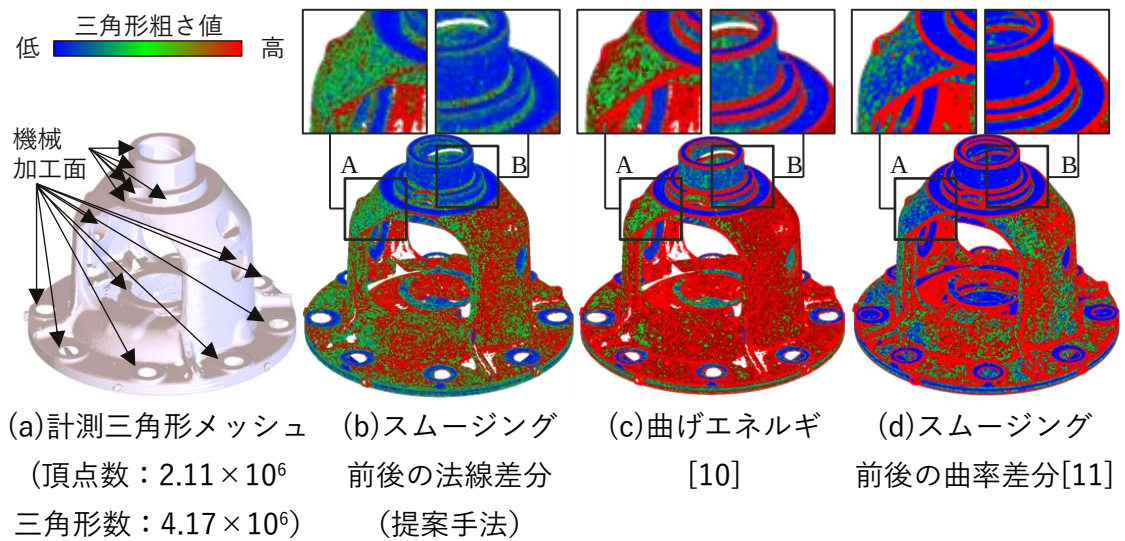


図 2.12 三角形粗さ値推定結果

2.3 分離した鋳肌面のメッシュ境界整形と認識機械加工面整列

2.3.1 鋳肌面メッシュ境界の整形

本研究では、分離された鋳肌面と認識された機械加工面からそれぞれ生成されたソリッドモデルの集合演算により鋳造品の面属性付きソリッドモデルを得る。このとき、単一のソリッドモデルを生成するためには鋳肌面のソリッドモデルと機械加工面のソリッドモデルとの間に隙間が存在しないことが保証されている必要がある。鋳肌面と機械加工面との交差を保証するように鋳肌面メッシュ境界を整形するような研究は著者らの知る限り存在しない。そこで、本研究では、分離された鋳肌面が、その境界部で隣接機械加工面と完全に交差するように、鋳肌面メッシュの境界を整形する手法を提案する。

2.3.2 認識機械加工面の整列

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[14]は、計測メッシュから認識された曲面が整列された CAD モデルを生成することを目的に、図 2.13 に示すように、認識された曲面から支配的な軸を推定し、平行化、直交化、規則化、対称化といった整列を行う手法を提案した。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。

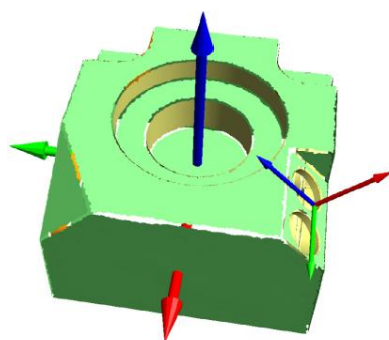


図 2.13 認識された曲面から推定した支配的な軸

2.4 光学式三次元計測機を用いた三次元計測

従来、光学式三次元形状測定機を用いた計測対象物から計測抜けのない計測データを取得するための計測位置姿勢の決定問題は Next Best View (NBV) 問題として研究されてきた。例えば Kriegel ら[15]は、ロボットアームを用いた自動三次元計測手法を提案しており、図 2.14(a)に示すように、計測済みの計測三角形メッシュのエッジについて、「通常」と「境界」の二つに分類し、さらに「境界」のエッジに対しては、カメラから見たときの左、右、上、下の 4 種類に分類する。計測三角形メッシュ中に「境界」のエッジが存在する場合は、図 2.14(b)に示すように、その近傍に対し 2 次曲面をフィットし、オーバーラップを考慮した位置におけるフィットした 2 次曲面の法線方向を次の計測位置姿勢として算出する。

また、Karaszewski ら[16]は、文化遺産物の三次元計測のための、ロボットアームとターンテーブルを用いた自動三次元計測手法を提案している。提案手法は、計測機との接触による計測対象物の破損を防ぐために、図 2.15(a)に示すように、ボクセルを用いた空間分類 (Free, Occupied, Unknown) を利用しており、次の計測姿勢は既計測のメッシュ境界ループにフィットした平面に垂直な方向として算出し、計測機が Free 以外のボクセルと衝突しない位置を次の計測位置姿勢を算出する。

本研究で対象としている鋳造品の場合、本来計測の要求精度が低い複雑な鋳肌面においても過剰な計測により非効率となる可能性がある。そこで、本研究では、従来の最適計測位置姿勢では考慮されていなかった表面の要求精度の違いを考慮し、鋳造品の鋳肌面の未計測部の面積を最小化しつつ、機械加工面を高精度に計測する最適計測位置姿勢の推定手法を提案する。

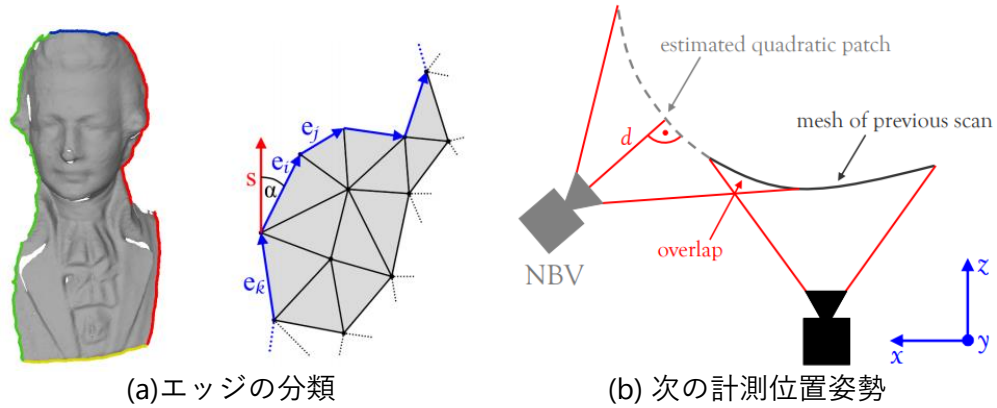


図 2.14 分類されたメッシュ境界エッジに基づく次の計測位置姿勢の算出[15]

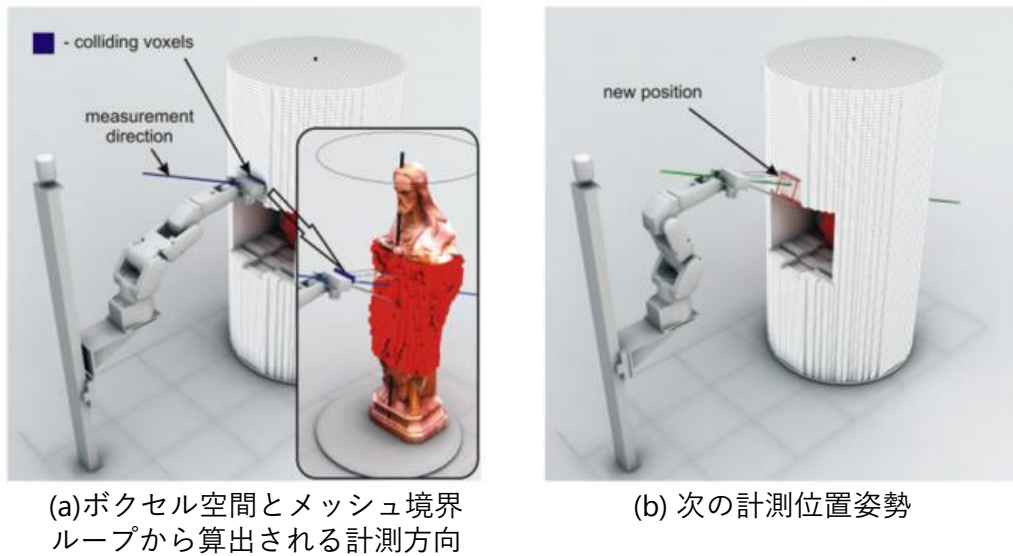


図 2.15 ボクセル空間とメッシュ境界ループに基づく次の計測位置姿勢の算出[16]

第3章 鋳肌面と機械加工面の分離に基づく 鋳造品の迅速 RE 手法

3.1 鋳造品の迅速 RE 手法の概要と特徴

鋳造品の表面は、機能面である機械加工面とその他の鋳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、鋳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、その表面が鋳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、鋳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。

一般的に、鋳造品の機械加工面は機械加工により形成され、鋳肌面は鋳造されたままの表面となるため、機械加工面は鋳肌面に比べて表面の粗さが小さくなる。そこで本研究ではこの点に注目し、計測三角形メッシュから表面の粗さを推定し、メッシュ表面を鋳肌面と機械加工面に分離することによる、鋳造品の迅速 RE 手法を提案する。

提案手法を図 3.1 に示す。提案手法は大きく 4 つのプロセスから構成されている。

(1) 面分離 (図 3.1, A1)

鋳造品の計測三角形メッシュから表面の面粗さを推定し、推定した三角形粗さ値に基づく鋳肌面と機械加工面の分離を行う。

(2) 機械加工面認識 (図 3.1, A2)

鋳造品の機械加工面中に頻出する機械加工平面・円筒面、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) 整形 (図 3.1, A3)

鋳肌面メッシュの境界を機械加工面と交差するように修正する。また、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。

(4) ソリッドモデル生成 (図 3.1, A4)

分離し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機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルを生成する。

各プロセスの詳細を以下の節で示す。

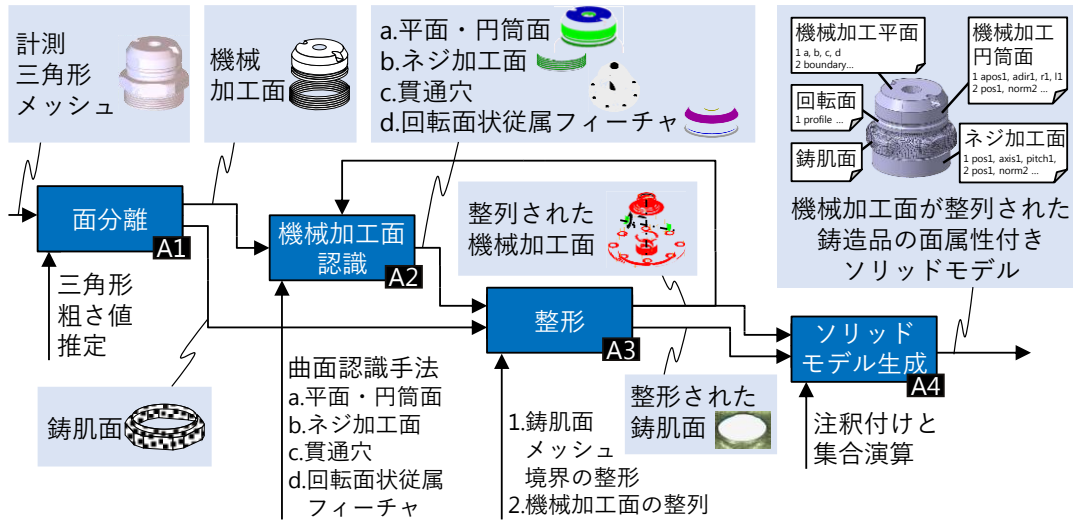


図 3.1 提案 RE 手法の概要

3.2 三角形メッシュからの三角形粗さ値の推定に基づく鋳肌面・機械加工面分離

図 3.2 に示すように、本研究で対象としている砂鋳造により製造された鋳造品の表面の特徴として、機械加工が施された機械加工面はその他の鋳肌面と比較して表面の面粗さが大きく異なるということが挙げられ、計測三角形メッシュからもその面粗さの差が確認できる。そこで、本研究では、計測三角形メッシュ表面の三角形 t における面粗さの指標として三角形粗さ値 r_t を推定し、 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と機械加工面とに分離する。

最初に、本研究では三角形 t の三角形粗さ値 r_t を、図 3.3 に示すように滑らかな基準面からの三角形の傾きとして定義する。鋳肌面のような粗さの大きい面では大部分の三角形が滑らかな基準面からの傾きが大きいため三角形粗さ値が高くなり、機械加工面のような粗さ値が低い面では滑らかな基準面からの傾きが小さいため三角形粗さ値は低くなる。本手法では、滑らかな基準面を計測三角形メッシュに対するスムージングにより取得し、三角形粗さ値 r_t を各三角形のスムージング前後の法線間角度から推定する。しかし、図 3.4 に示すように、鋳肌面上のほとんどの三角形においてスムージング前後で三角形の傾きが変化するが、いくつかの三角形ではその傾きが変わらないため三角形粗さ値が低くされてしまう。そこで、本手法では最初に、計測三角形メッシュに対しスムージング処理を適用する。次に、式(3.1)により各三角形 t のスムージング前後の三角形法線 $\mathbf{n}_t, \tilde{\mathbf{n}}_t$ の差分 d_t を求める。

$$d_t = \|\mathbf{n}_t - \tilde{\mathbf{n}}_t\| \quad (3.1)$$

ここで、 $\mathbf{n}_t$ と $\tilde{\mathbf{n}}_t$ はそれぞれスムージング前後の t の三角形単位法線ベクトルである。

最後に、式(3.2)により三角形 t の三角形粗さ値 r^t を算出する。

$$r^t = \text{med}_{t' \in t^*}(d_t) \quad (3.2)$$

ここで、 $\text{med}(A)$ はデータ集合 A の中央値を取得する関数、 t^* は t の近傍三角形集合（本実験では t の 3 近傍）、スムージング処理は実装の簡潔さとスムージング強度の制御性から、式(3.3)で示す、メッシュの各頂点 i の位置 $\mathbf{p}_i$ を近傍頂点集合 i^* の重み付き和 $\mathbf{p}'_i$ へ繰り返し移動する λ - μ アルゴリズム[12]を用いた。

$$\mathbf{p}'_i = \mathbf{p}_i + \frac{\lambda}{|i^*|} \sum_{j \in i^*} (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i) \quad (3.3)$$

ここで、 λ は重みであり、反復の奇数回で正、偶数回で負の重みを持つ。

次に、三角形粗さ値が閾値 τ_r 以上の値を持つ三角形集合 M_c を鋳肌面メッシュ、それ以外の三角形集合 M_m を機械加工面メッシュとして分離する。



図 3.2 実際の鋳造品の表面（左）とその計測三角形メッシュの表面（右）

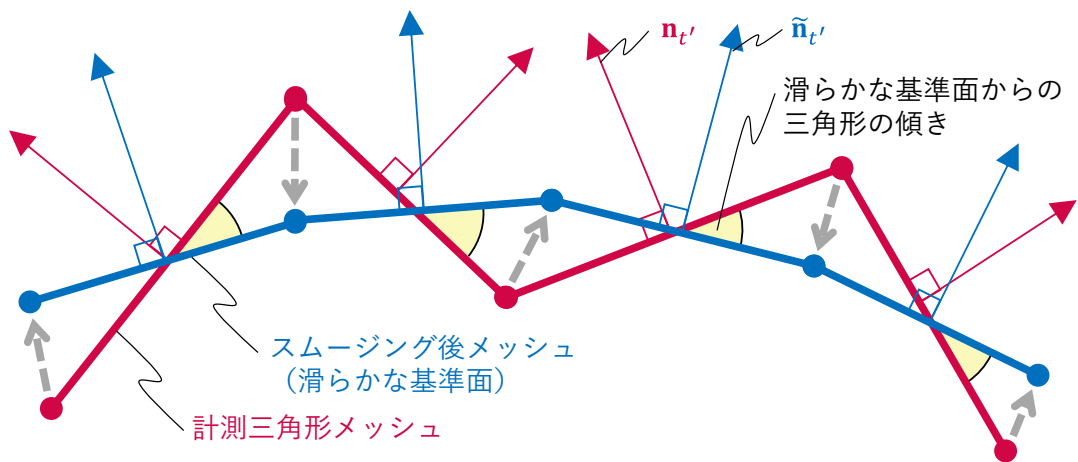


図 3.3 計測三角形メッシュと滑らかな基準面とその法線

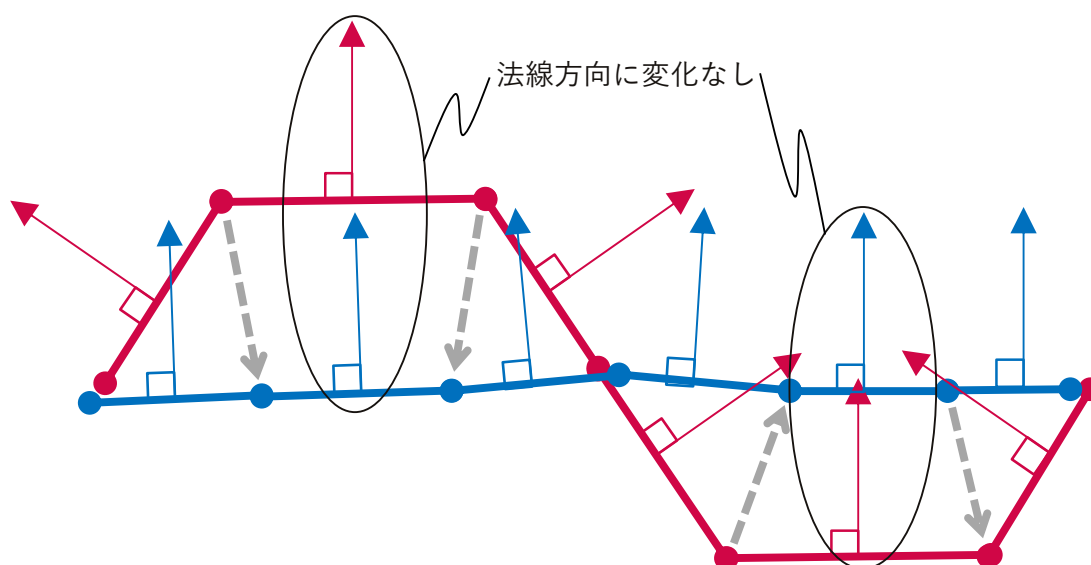


図 3.4 スムージング前後で法線方向が変化しない三角形

3.3 機械加工面の認識

3.3.1 機械加工平面・円筒面の認識

3.3.1.1 機械加工円筒面の認識

提案手法では、機械加工円筒面を領域成長法と曲面フィッティングにより抽出する。機械加工面を効率的に抽出するために、三角形粗さ値に基づく処理三角形数の削減と外れ値の割合に応じた二つのフィッティング手法の選択的適用を行う。図 3.5 に機械加工円筒面の認識手法を示す。本手法は円筒面領域のシード領域抽出 (図 3.5, A21)、円筒面領域とその曲面パラメータの推定 (図 3.5, A22)、円筒面領域の正確なパラメータの推定 (図 3.5, A23) からなる。

円筒面領域のシード領域抽出 (図 3.5, A21) は、最初に、機械加工面メッシュ M_m からランダムにシード領域のシード三角形を選択する。次に、領域成長法によりシード領域を抽出する。成長条件はシード三角形との法線間角度が角度閾値 τ_a 以下であることである。結果として、シード領域は同じような法線方向を持つ連結三角形集合として得られる。

円筒面領域とその曲面パラメータの推定 (図 3.5, A22) は、初期領域に対する円筒面フィッティングと領域成長との反復により初期円筒面パラメータと円筒面領域を抽出する。円筒面パラメータ推定は図 3.6 に示す平面・円フィッティングに基づき行われる。最初に、円筒軸 $\mathbf{d}$ を、法線ガウス球の原点を通り、法線ガウス球に投影された単

位法線ベクトルの像にフィットする平面の単位法線ベクトル $\mathbf{d}$ として算出する。次に、円筒軸上点 $\mathbf{a}$ と円筒半径 r を、円筒軸 $\mathbf{d}$ を法線とする平面に投影した円筒領域の三角形重心に対する円フィットを行い、その中心を円筒軸上点 $\mathbf{a}$ 、半径を円筒半径 r として推定する。また、円筒面フィットにおいて円筒面領域に含まれる外れ値の割合により最小二乗法 (least square method, LSM) もしくは RANSAC[3]による円筒面フィットを選択的に使用することで処理の効率化を行っている。LSM は円筒面領域から一意に円筒面パラメータを推定するため処理コストは低いが外れ値に弱い。一方、RANSAC は円筒面領域から複数回のパラメータ推定を行い、最も妥当な円筒面パラメータを採用するため LSM と比較して処理コストは高いが外れ値に対して頑健である。そこで、表 3.1 に示すように、初期領域に対してフィットを行う際には領域内の外れ値が高いことが予想されるためロバスト性の高い RANSAC により初期円筒面パラメータを推定し、成長後の領域において外れ値の割合が低い領域では RANSAC と比較して高速に処理を行える LSM により初期円筒面パラメータを推定することで RANSAC の適用回数を削減し、処理の効率化を行う。そして、円筒面領域の初期円筒面パラメータ推定後に、図 3.7 に示すように、推定した初期円筒面パラメータを用いて領域成長法を適用する。領域の成長条件は隣接三角形の重心と円筒面との距離が閾値 τ_l 以下であることとし、条件を満たす隣接三角形を円筒面領域へ逐次的に加える事で円筒面領域を抽出する。これらの、円筒面領域のパラメータ推定と領域成長法の適用を反復することで機械加工円筒面を認識する。

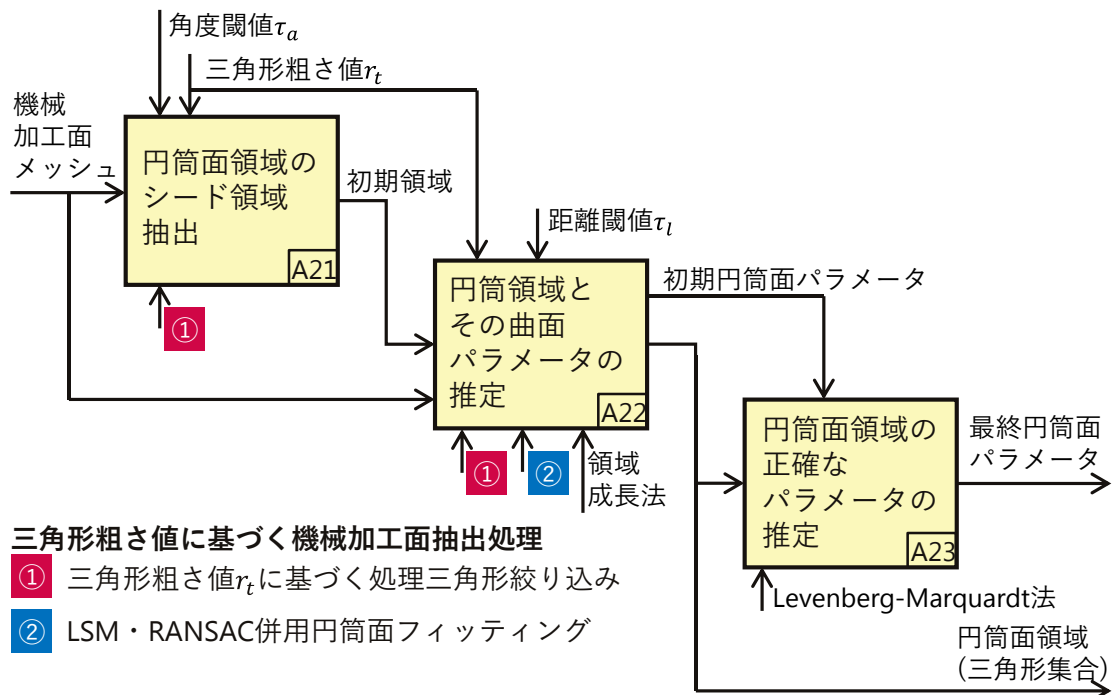


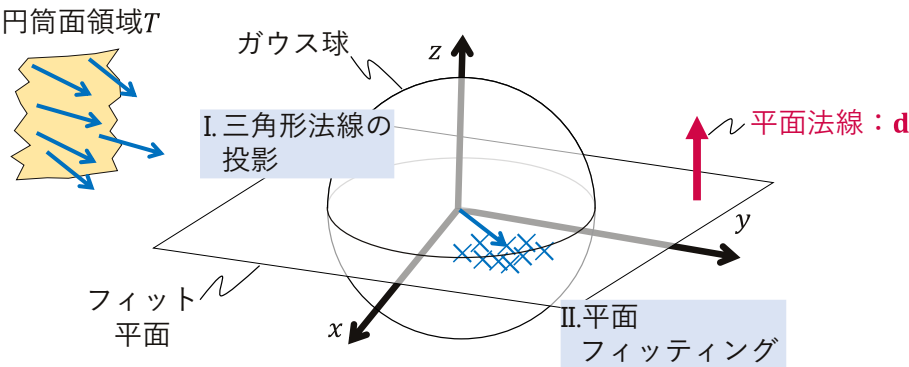
図 3.5 機械加工面の認識手法

円筒面領域の正確なパラメータの推定（図 3.5, A23）は，抽出した円筒面領域に対し，初期円筒面パラメータを初期値として非線形最小二乗法である Levenberg-Marquardt 法[17]により最終的な円筒面パラメータを抽出する．

表 3.1 外れ値に基づく適応的な平面・円フィッティング

	初期領域	成長後の領域	
外れ値の割合	高	低	高
フィッティング手法	RANSAC	LSM	RANSAC

■円筒軸 d の算出



■軸上点 a と半径 r の算出

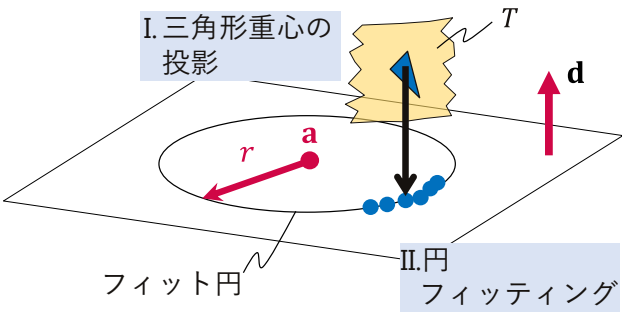


図 3.6 平面・円フィッティングに基づく円筒面パラメータ抽出

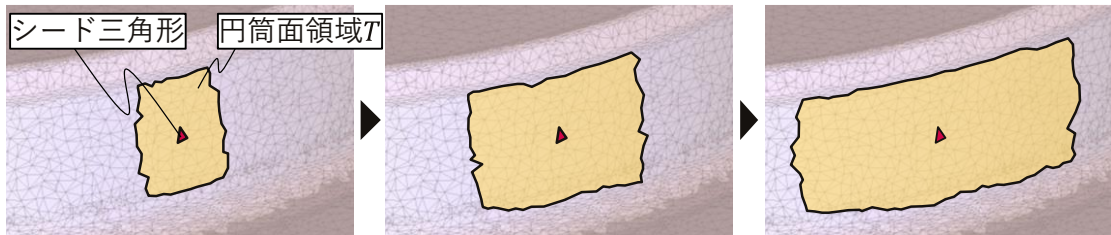


図 3.7 領域成長法による円筒面領域の抽出

3.3.1.2 面分類

抽出した円筒面領域に対して、図 3.8 に示すように閾値 τ_{rad} 以上の円筒半径を持つ円筒面領域を平面と分類し、初期機械加工平面・円筒面を得る。本研究では半径閾値 τ_{rad} を計測三角形メッシュのバウンディングボックスの対角線長とした。

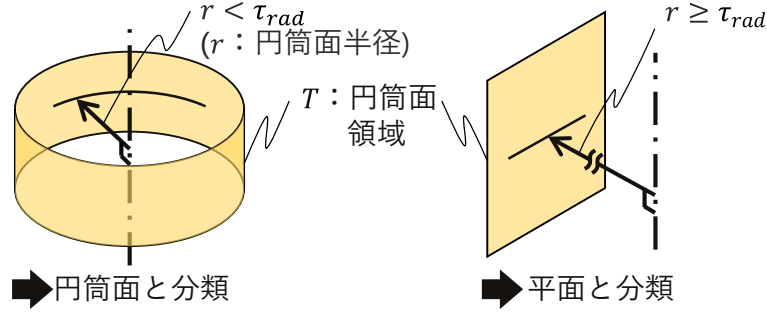


図 3.8 面分類手法

3.3.1.3 誤検出領域除去

これまでの手法で抽出された機械加工面の中には、鋳肌面上であっても比較的平滑な面を持つことから機械加工面として誤検出された鋳肌面が存在する場合がある。そこで、抽出した機械加工面に対し領域評価を行うことで誤検出領域を除去する。

図 3.9 に計測三角形メッシュと誤検出領域を示す。図 3.9 (b)に示すように、誤検出領域は正常に検出された機械加工面と比較して複数の穴と複雑な形状を持つため、領域面積に対する領域境界線の比が高く算出される。提案手法では式(3.4)により領域境界線長面積比 e_{la}^r を算出し、閾値 τ_{la} 以上の e_{la}^r が算出された機械加工面を鋳肌面として再分類する。

$$e_{la}^r = \frac{\sum_{i \in E_b} l_i}{\sum_{j \in T_r} a_j}, \quad (3.4)$$

ここで、 E_b は領域の境界線集合、 T_r は領域の三角形集合、 l_i はエッジ i の長さ、 a_j は三角形 j の面積である。また、 e_{la}^r は細長い機械加工面においても高く算出されるが、本研究では鋳造品に細長い機械加工面は現れないと仮定した。

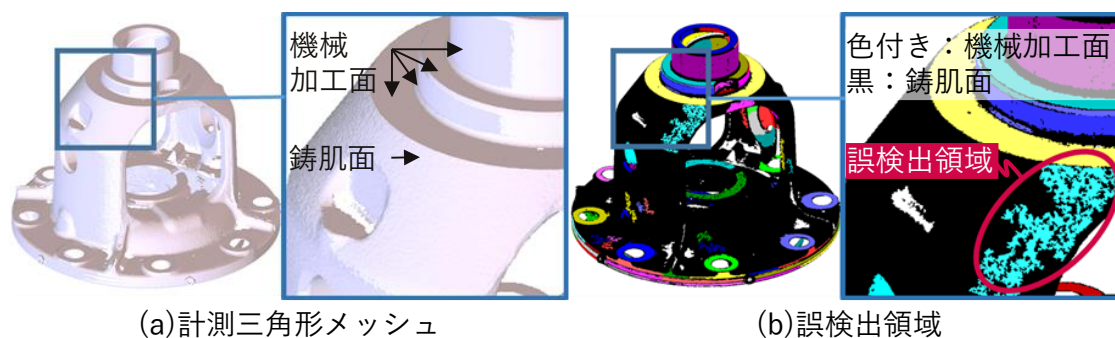


図 3.9 計測三角形メッシュと誤検出領域

3.3.2 ネジ加工面の認識

3.3.2.1 概要

ネジ加工面は機械加工部品において利用上重要な機能面であるにも関わらず、複雑な領域形状を持つことから、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することが困難であった。そこで、本研究ではネジ加工面領域の特徴である、均一の螺旋構造が規則的な間隔で配置していることを利用してネジ加工面領域の認識を行う。具体的には、均一面積の小領域への機械加工面の分割と分割領域のマッチングにより、均一形状の局所領域が多数存在する連結領域をネジ加工面の候補領域として認識する。

ネジ加工面領域の認識手法を図 3.10 に示す。まず、機械加工面メッシュ M_m に対し、クラスタリングとシード三角形の更新の反復により、分割領域のマッチングの基本単位となる均一面積の小領域に分割し、分割領域 R を取得する (A1)。次に、分割領域 R それぞれに対し、非隣接関係にある近傍分割領域を見つけ、それらが類似形状をもつ場合、その分割領域をネジ加工面候補領域として検出する (A2)。次に、ネジ加工面候補領域それぞれに対し、図 3.11 に示すネジ加工面領域の軸方向 $\mathbf{a}$ 、フランク角 α 、外径 d 、軸位置 $\mathbf{c}$ 、ピッチ p を抽出する (A3)。最後に、取得したネジ加工候補領域のパラメータを基に、ネジ加工面候補領域から誤検出領域を除去しネジ加工領域を得る (A4)。以下に、各処理の詳細を示す。

3.3.2.2 分割領域の生成

提案手法ではネジ加工領域検出の際に中心軸に沿って同一形状が一定間隔で存在することを利用する。この同一形状の存在判定は機械加工面メッシュの部分メッシュを用いて行うため、均等な面積を持つ分割領域へ分割するために図 3.12 及び次の手順で示す Lloyd のアルゴリズム[6]を用いて機械加工面メッシュから分割領域 R を得る。

1. 機械加工面メッシュからランダムにシード三角形を k 個選択 (図 3.12, ①)
(k : 機械加工面三角形数の $\frac{1}{100}$)
2. 領域に未所属の三角形が無くなるまで面積最小の領域に, その領域のシード三角形との法線間角度が最小の領域隣接三角形を逐次的に追加 (図 3.12, ②)
3. 各領域のシード三角形を領域重心に最も近い三角形に更新 (図 3.12, ③)
4. 規定の繰り返し回数に達するまで 2, 3 を繰り返す

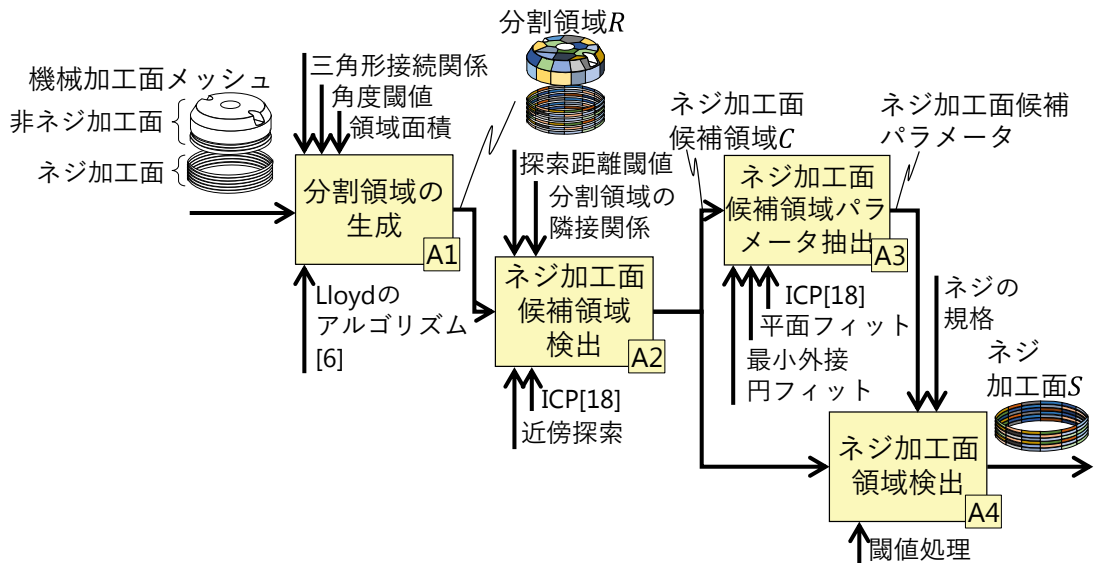


図 3.10 ネジ加工面領域Sの検出手法

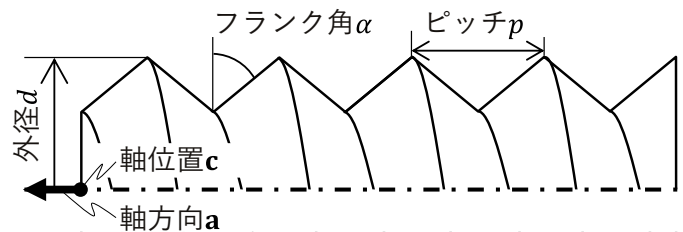


図 3.11 ネジ加工面抽出対象パラメータ

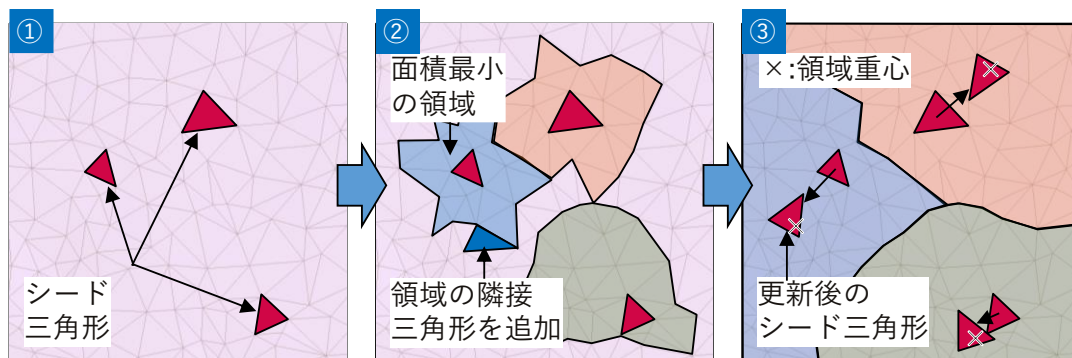


図 3.12 メッシュの領域分け

3.3.2.3 ネジ加工面候補領域検出

図 3.13 に示すように、各領域 $r_a \in R$ に対し、その近傍領域集合 $N(a)$ を抽出し、Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズム[18]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。式(3.5)に示す r_a の各頂点から r_n の最近点までの平均距離 E_{ave} が閾値 τ_E 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。

$$E_{ave} = \frac{1}{|V^n|} \sum_{v_i^n \in V^n} \|v_i^n - v_j^a\|^2, \quad (3.5)$$

ここで、 V^n は r_n の頂点集合、 v_i^n は V^n 内の頂点、 v_j^a は v_i^n に最近の r_a 内の頂点である。

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 3.14 に示すように、ネジ加工面領域はネジ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一つのネジ加工面として統合することで最終的なネジ加工候補領域集合 C を認識する。

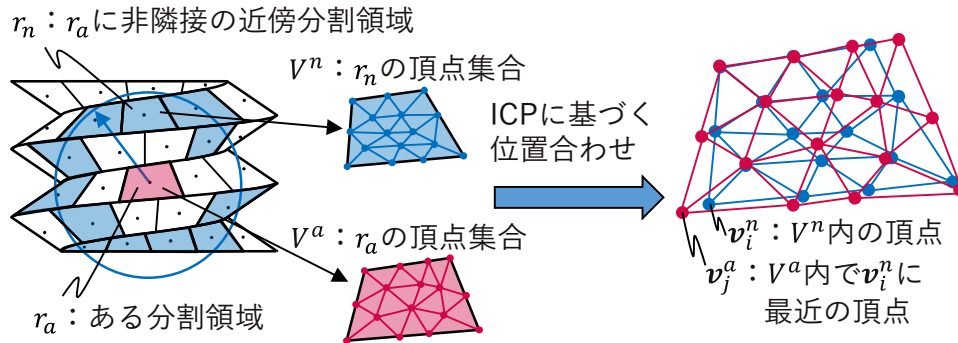


図 3.13 ネジ加工候補領域検出手法

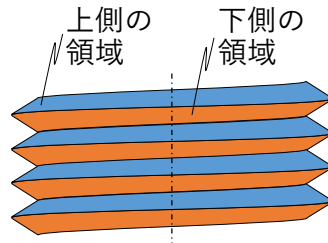


図 3.14 分割されたネジ加工面の候補領域

3.3.2.4 ネジ加工面領域パラメータ抽出

ネジのパラメータである，軸方向 $\mathbf{a}$ ，フランク角 α ，外形もしくは内径 d ，軸位置 $\mathbf{c}$ ，ピッチ p を認識したネジ加工面候補領域 $C_j \in C$ から推定する．

軸方向 $\mathbf{a}$ ：

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 3.15 (b)に示すように，ネジ加工面候補領域 C_j の三角形法線（図 3.15 (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．

フランク角 α ：

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 3.15 (c)に示すように，フランク角 α は，式(3.6)(3.6)によりガウス球の中心とフィット平面 F_p の距離 l から推定する．

$$\alpha = \sin^{-1}(l), \quad (3.6)$$

外径ネジの外径 d ：

ネジ加工面領域にフィットする最小外接円筒面の直径となることから，図 3.15 (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 C_j の頂点の像に対する最小外接円[19]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 ：

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 3.15 (e)に示すように，最初に，ネジ加工面候補領域 C_j からランダムに選択した一つの頂点を通過し，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[18]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．

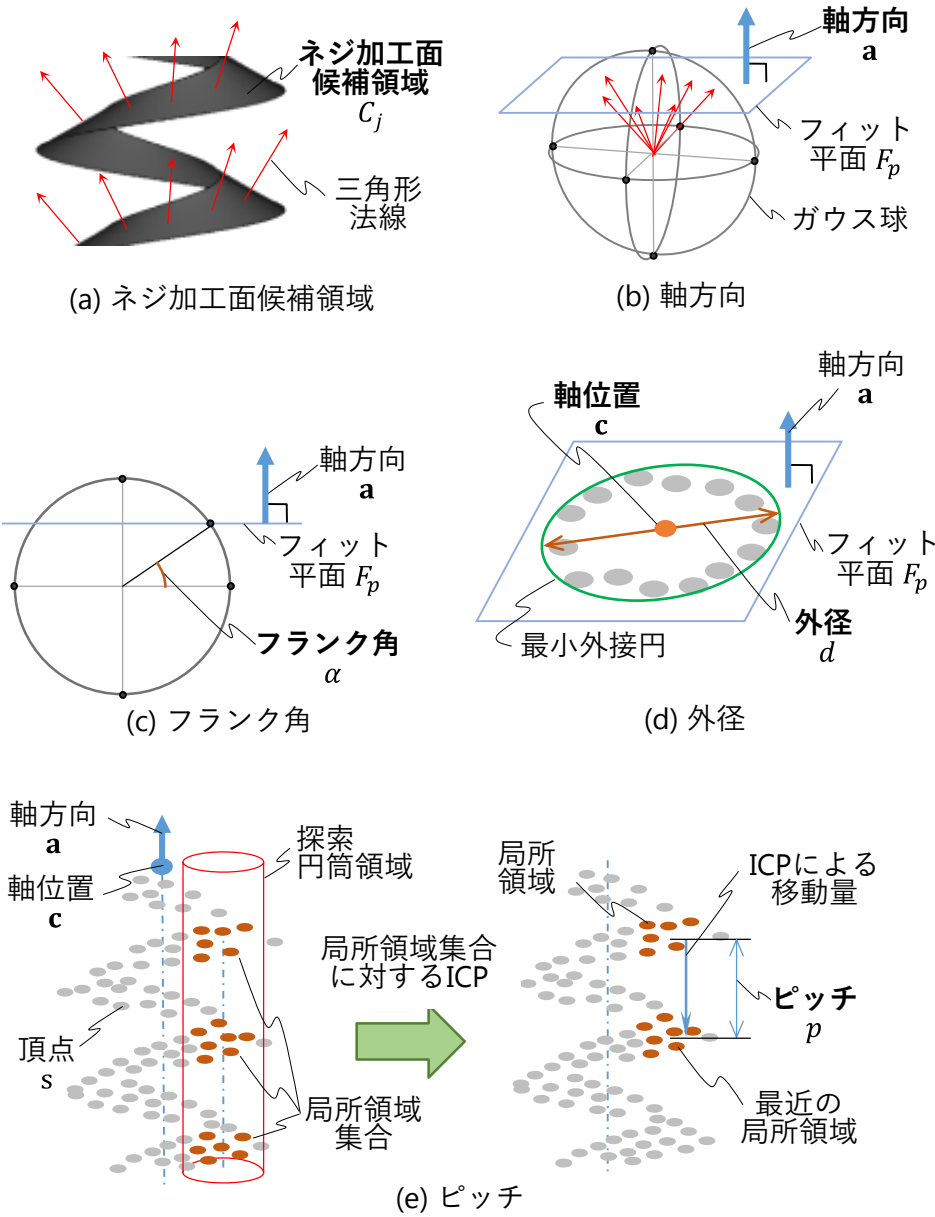


図 3.15 ネジ加工候補領域パラメータ抽出手法

3.3.2.5 ネジ加工面領域検出

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。具体的には、最終的に抽出したピッチが0ではなく、かつ、メートルネジのフランク角が30度、ユニファイネジのフランク角が27.5度であることからフランク角が45度以下のネジ加工候補領域をネジ加工領域として、ネジ加工領域集合 S を得る。

3.3.3 貫通穴の認識

3.3.3.1 概要

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、図3.16に示すように、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[1, 4]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。

図3.17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、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3.17 A1）。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もう一端の境界頂点集合を取得する（図3.17 A2）。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3.17 A3）。

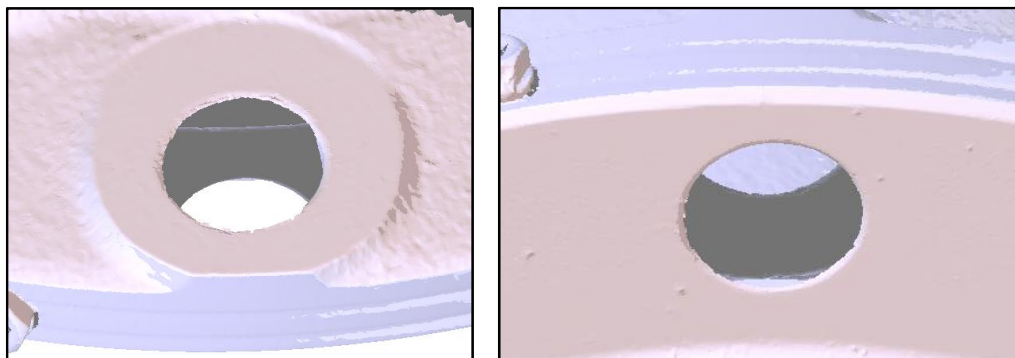


図 3.16 側面が未計測の貫通穴

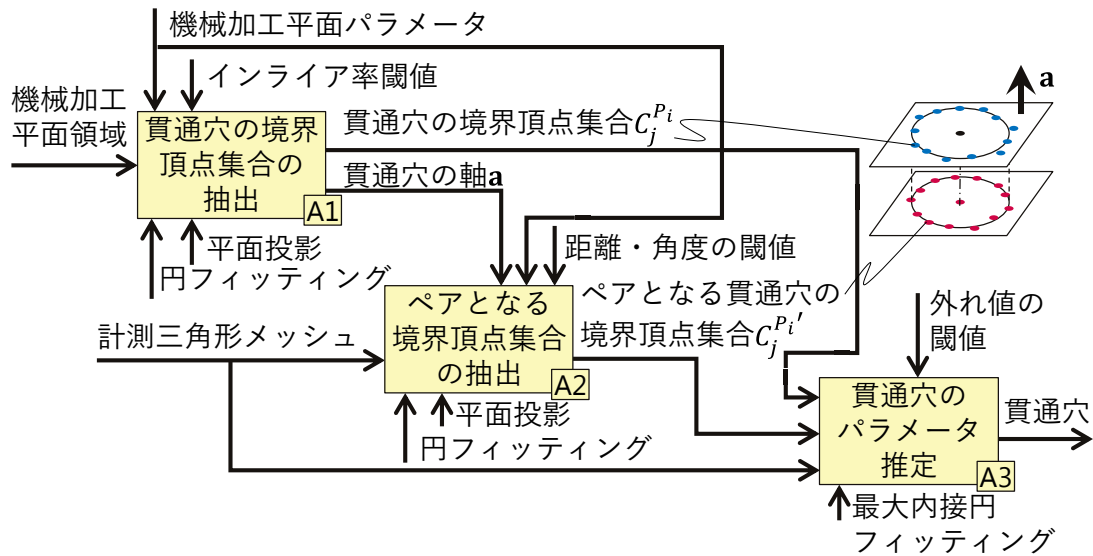


図 3.17 貫通穴の認識手法

3.3.3.2 円状境界頂点集合の抽出

最初に、図 3.18 (a)に示す抽出した機械加工平面 P_i のメッシュ M^{Pi} 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^{Pi} を抽出するために、図 3.18 (b)に示すように、 M^{Pi} 内の各境界ループ j 上の頂点集合 B_j^{Pi} を抽出する。そして、 B_j^{Pi} を平面 P_i に投影し、図 3.18 (c)に示すように、投影点に対し RANSAC[3]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^{Pi} を円状境界頂点集合 C_j^{Pi} として抽出する。

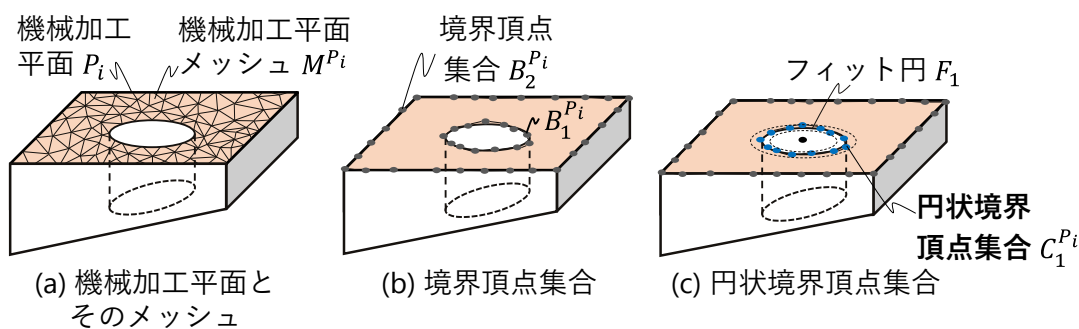


図 3.18 円状境界頂点集合の抽出手法

3.3.3.3 円状境界頂点集合のペア抽出

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 3.19 (a)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weep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、図 3.19 (b)に示す、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が近いものを選択する。

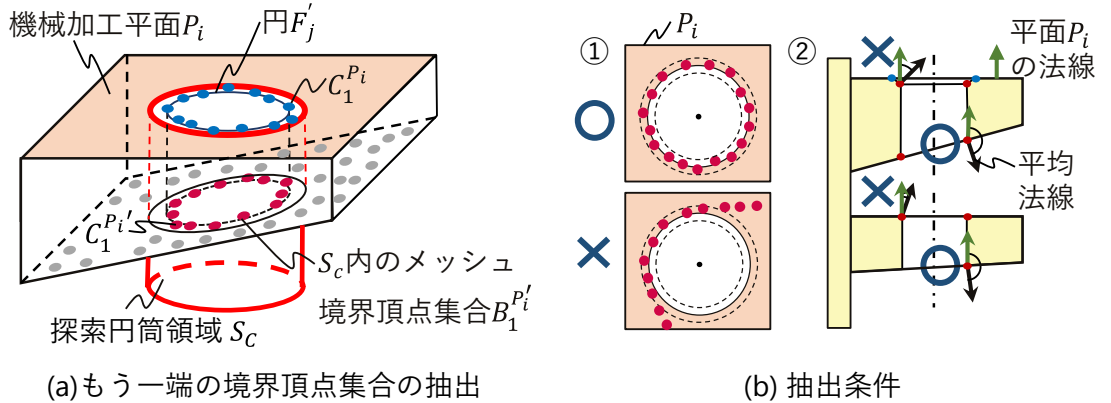


図 3.19 円状境界頂点集合のペア抽出手法

3.3.3.4 貫通穴のパラメータ抽出

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 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、図 3.20 に示すような最大内接円フィッティング[19]を用いて内径 r および軸上点 $\mathbf{p}$ を推定する。本手法では、内接円の中心点を、その初期位置から最近傍点の逆方向へ微小に繰り返して移動することで求め、内接円の半径を、最終的な中心点から最近傍点までの距離と

した．ここで，中心点の初期位置は $H_j^{P_i}$ の投影点のバウンディングボックスの重心点，中心点の移動距離の初期値は中心点の初期位置から最近傍点までの距離の 10%とし，以後，移動距離は中心点の移動 100 回毎に値を半分にし， τ_{move} 以下になるまで中心点の移動を繰り返した．

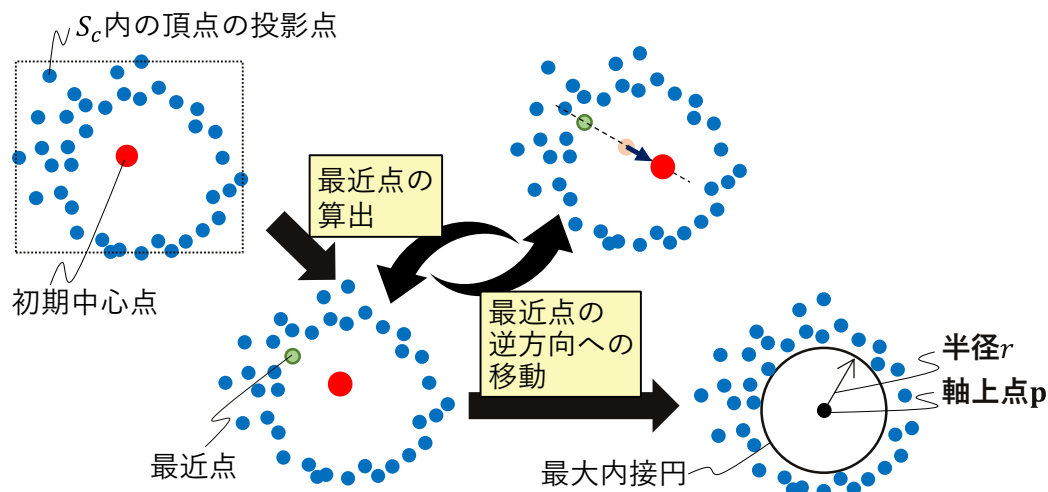


図 3.20 最大内接円フィッティングによる貫通穴パラメータの推定

3.3.4 機械加工面間回転面状従属フィーチャの認識

3.3.4.1 概要

3.2 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，3.3.3 項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．本手法では，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，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，そのプロファイル曲線を機械加工面上のその他の三角形集合 T_0 から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，隣接する機械加工面との接続を考慮しながら面が生成される．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 3.4.2 節で示す機械加工面整列手法により整列されているものとする．

3.3.4.2 回転面状従属フィーチャ領域の抽出

最初に、図 3.21 (a)に示すように、その他の三角形集合 T_0 から隣接している三角形を無条件で領域へ逐次的に加える領域成長を、領域に属していない三角形がなくなるまで適用することで連結三角形集合を抽出する。さらに、隣接する 2 つの機械加工面に接続し、接続している 2 つの機械加工面が同一法線もしくは軸方向を持つ連結三角形集合を回転面状従属フィーチャ領域の候補領域 C_i として抽出する。そして、図 3.21 (b)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 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。

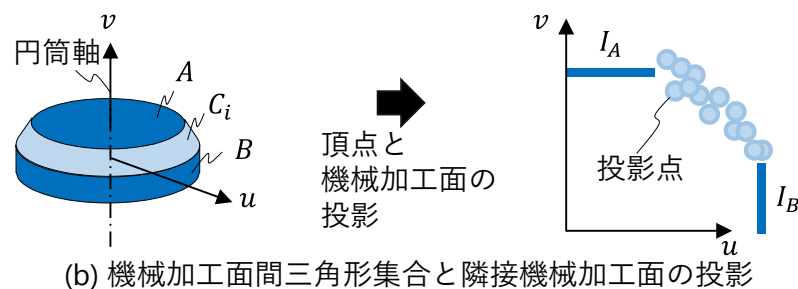
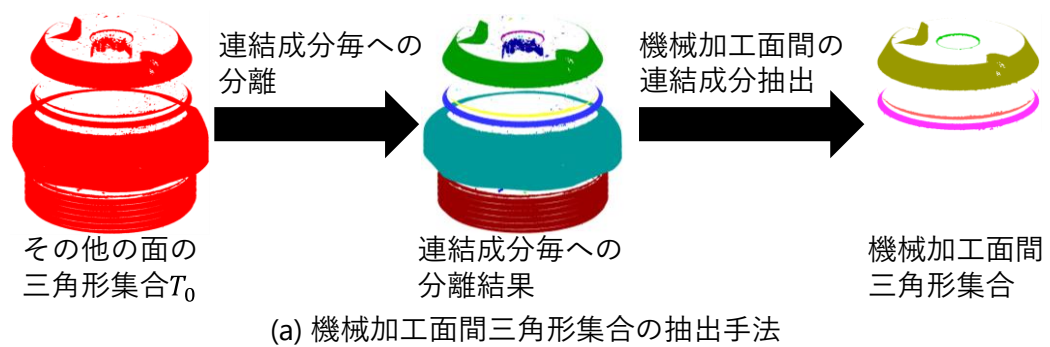


図 3.21 回転面状従属フィーチャ領域の抽出手法

3.3.4.3 プロファイル曲線の生成

次に、投影点に対し RANSAC[3]を用いた直線・円フィッティングによりプロファイル曲線を生成する。提案手法では直線から円の順番でフィッティングすることで冗長な曲面の生成を抑制する。

最初に、投影点にフィットした直線の近傍に大部分の投影点が存在する場合、面取りと判定し、図 3.22(a)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 3.22 (b)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 に正接する円をフィットし、円の近傍に大部分の投影点が存在する場合、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。

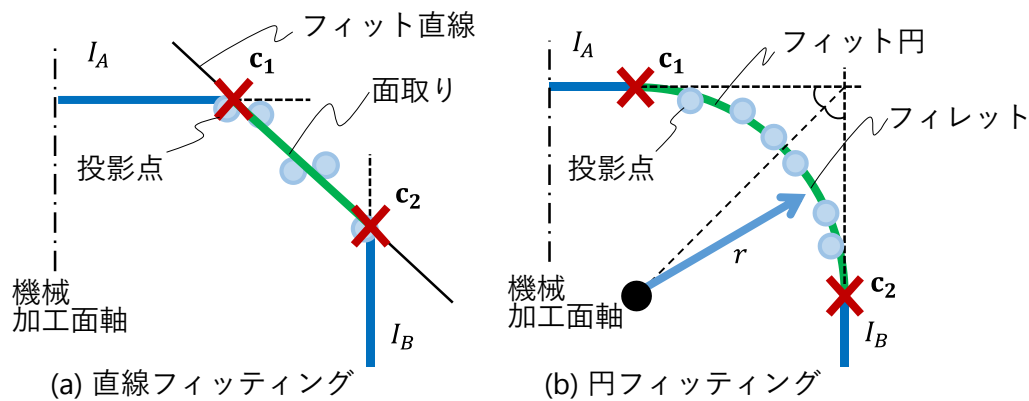


図 3.22 プロファイル曲線の生成手法

3.4 鋳肌面のメッシュ境界と機械加工面の整形

3.4.1 鋳肌面メッシュ境界の整形

3.4.1.1 概要

本研究では、鋳肌面領域を含む CAD モデルを生成する場合に、鋳肌面への自由曲面フィッティングによる自由曲面パッチ生成ならびに機械加工面ソリッドモデルとの集合演算を行う。従来、図 3.23 に示すような複雑な境界をもつ鋳肌面メッシュに対し自由曲面パッチを生成した場合、自由曲面パッチが過密化するため、パッチ数の少ない高品質な自由曲面パッチを生成するためには事前に手動で鋳肌面メッシュ境界を整形する必要があった。

そこで、本研究では、効率的に鋳肌面メッシュの高品質自由曲面モデルを生成するために自動的に鋳肌面の境界を平滑に整形する手法を提案する。このとき、高品質な CAD モデルを生成するために、図 3.24 に示すような以下の二つの条件を満たすように鋳肌面の境界を整形する。

- ①質の良い曲面パッチ（数が少ない等）を生成できるように整形後の鋳肌面メッシュの境界が滑らかであること（図 3.24 左）
- ②CAD モデルにおいて機械加工面と鋳肌面との間に隙間が生じないように、鋳肌面メッシュが隣接する機械加工面と交差するように鋳肌面メッシュの境界の位置が存在すること（図 3.24 右）。

図 3.25 に本研究で提案する鋳肌面メッシュ境界の整形手法を示す。提案手法では鋳肌面と機械加工面との境界は直線分と円弧の集合で近似できると仮定し、最初に、鋳肌面メッシュの境界頂点から直線・円フィッティングにより境界線を抽出する。次に、機械加工面との交差条件を満たす目標境界線を算出し、最後に、目標境界線上に鋳肌面の境界頂点を移動することで平滑化された鋳肌面メッシュの境界を得る。以下に各処理の詳細を示す。

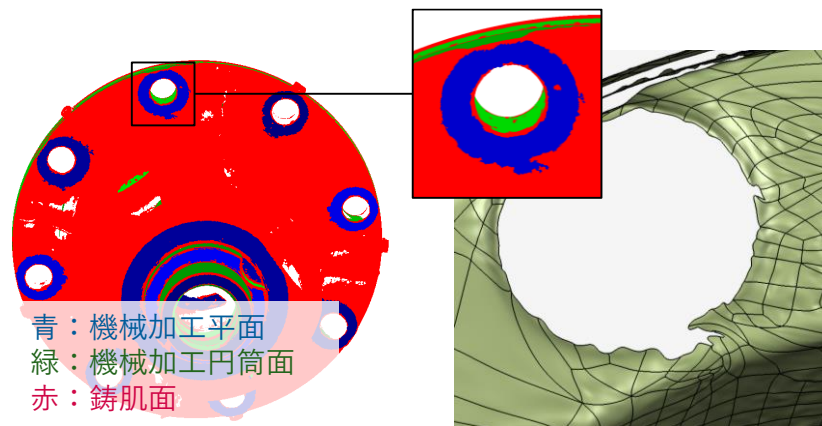


図 3.23 複雑な境界をもつ鋳肌面に対する自由曲線パッチ生成結果

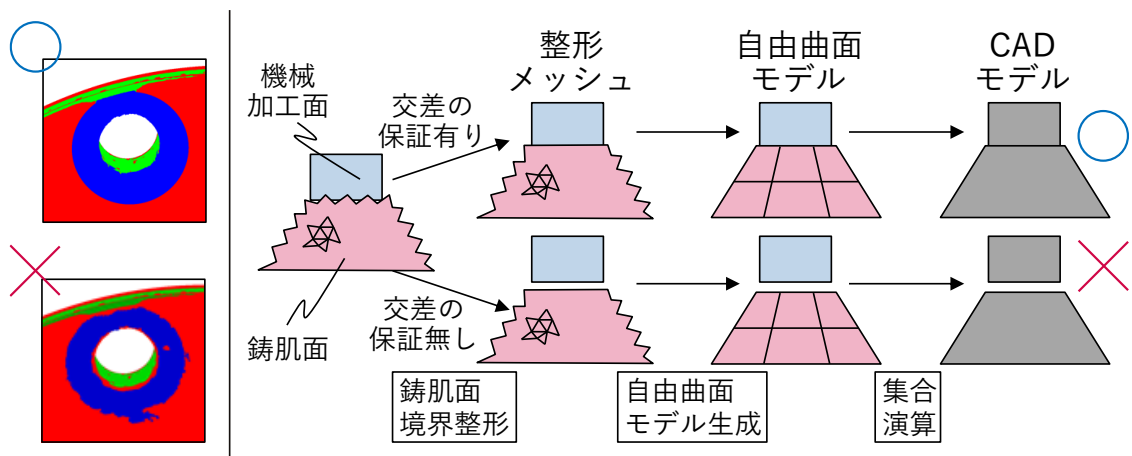


図 3.24 鋳肌面メッシュ境界の要求事項

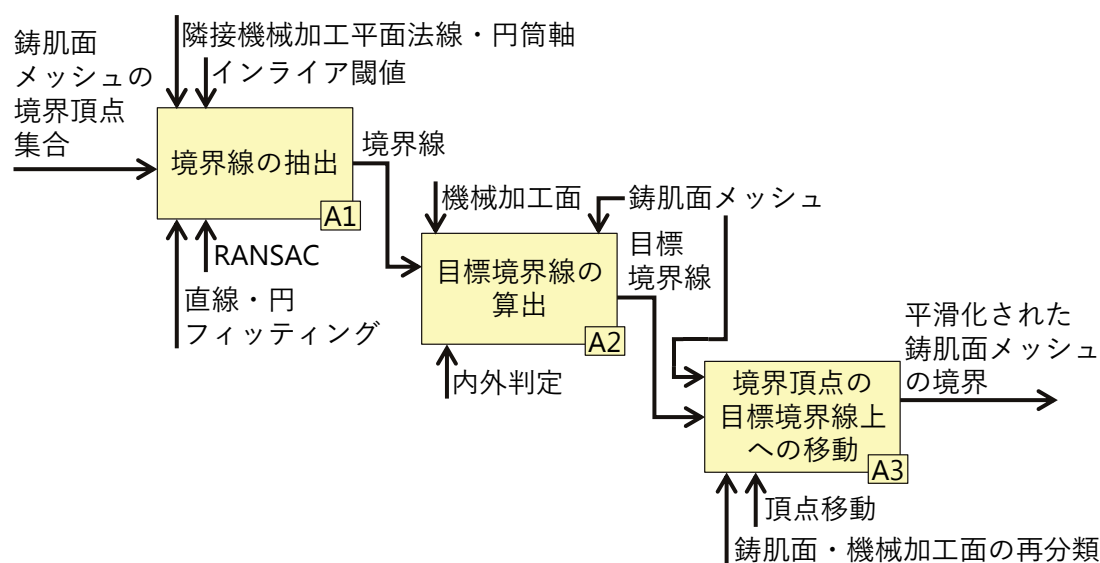


図 3.25 鋳肌面メッシュ境界の整形手法

3.4.1.2 境界曲線抽出

最初に、鋳肌面メッシュの境界頂点を隣接する機械加工面の平面法線・円筒軸を法線とする平面に投影する。次に、投影された境界頂点集合に対する RANSAC[3]による円フィッティングとインライア除去を、一定の半径以下もしくは一定以上のインライアを持つ円が得られなくなるまで繰り返す。同様に、RANSAC による直線フィッティングをインライア数が一定以下になるまで繰り返し、境界線を生成する。

3.4.1.3 ターゲット境界曲線の算出

集合演算の際に鋳肌面と機械加工面との交差を保証するために、図 3.26 に示すように目標境界線を機械加工面の平面・円筒面から見て周囲の鋳肌面メッシュと逆側の半空間上に存在するよう算出する。

(i) 機械加工平面の場合（図 3.26(a)）

境界線を機械加工平面から見て周囲の鋳肌面と逆側の半空間に位置するように移動する。まず、鋳肌面メッシュ境界周辺の頂点について機械加工平面に対する表裏判定を行ない投票処理によりとして求める。次に、鋳肌面側半空間と逆側の半空間に境界線を移動することで目標境界線を得る。本研究では、境界線の移動量を 1mm とした。

(ii) 機械加工円筒面の場合 (図 3.26(b))

境界線を機械加工円筒面から見て周囲の鋳肌面と逆側の半空間に位置するように拡大縮小する。まず、鋳肌面メッシュ境界周辺の頂点について機械加工円筒面に対する内外判定を行い、投票処理により多数側の半空間を鋳肌面側半空間として求める。次に、鋳肌面側半空間と逆側の半空間に境界線を拡大もしくは縮小することで目標境界線を得る。本研究では境界線の半径の拡大および縮小量を 1mm とした。

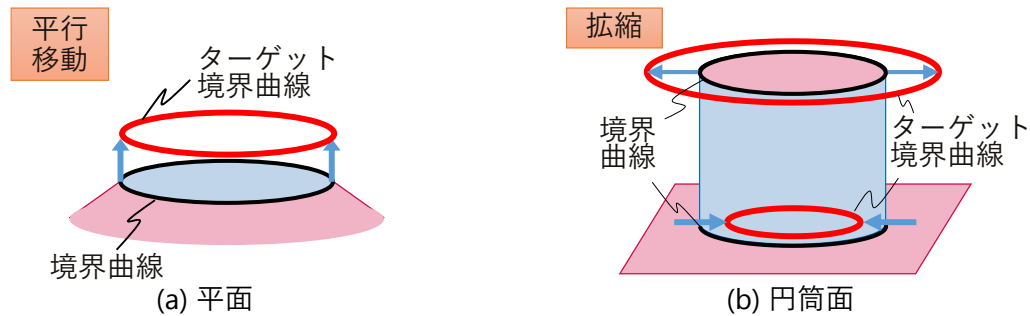


図 3.26 目標境界線の算出

3.4.1.4 境界頂点の移動によるメッシュ境界の整形

境界頂点を目標境界線上の再近傍の位置へ移動する。なお、図 3.27 に示すような鋳肌面とその隣接機械加工面がほぼ平行に位置する領域では、境界の形状が複雑になっている場合がある。そこで、鋳肌面とその隣接機械加工面がほぼ平行になっている場合には、境界頂点の移動に伴う三角形の裏返りや縮退の発生を低減するために、図 3.28 に示すように境界の再分類と頂点移動を行う。最初に、目標境界線の内側にある三角形を機械加工面、外側にある三角形を鋳肌面として再分類する。最後に、再分類後の境界頂点を目標境界線上で移動距離が最小となる位置へ移動する。

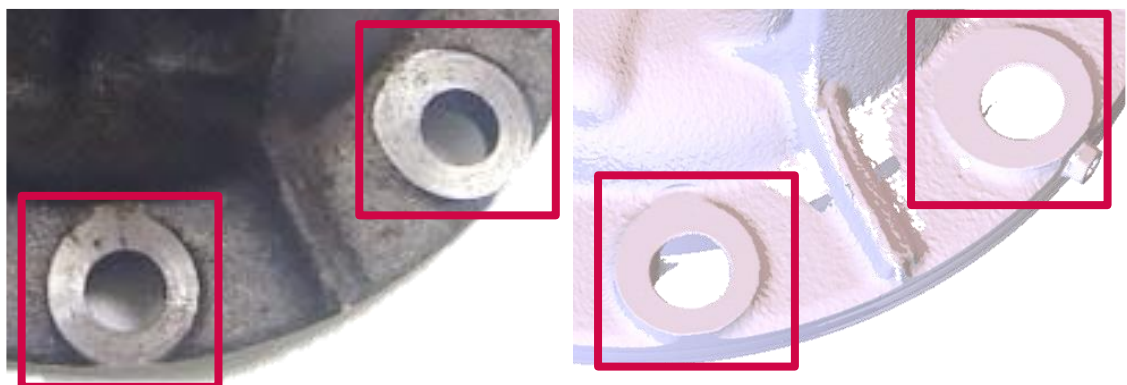


図 3.27 鋳肌面とその隣接機械加工面がほぼ平行に位置する領域 (図内赤枠内)

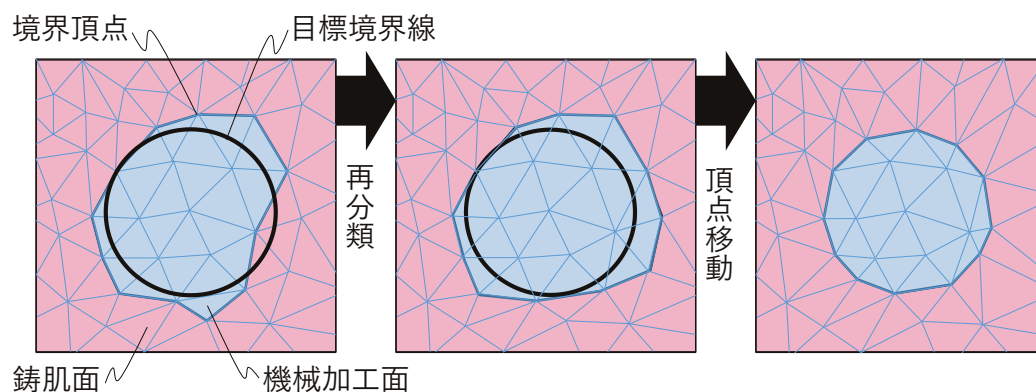


図 3.28 境界頂点の目標境界線上への移動

3.4.2 機械加工面の整列

3.4.2.1 概要

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列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つの関係に従い整列する。

図 3.29 に提案する機械加工面の整列手法を示す。本手法は大きく3つのプロセスからなり、最初に、機械加工平面法線・円筒軸の法線・軸方向ベクトルをガウス球に投影し、クラスタリングにより支配的な軸の集合を推定する。次に、支配的な軸の中から直交関係にある軸の組合せを抽出し、直交関係にある支配的な軸に属する機械加工平面・円筒面の法線・軸ベクトル集合に対する機械加工面面積の重み付き主成分分析を行ない、直交する支配的な軸を推定する。最後に、支配的な軸に属する平面法線・円筒軸を支配的な軸と一致させ、平面法線・円筒軸を固定した制約付き平面・円筒面フィッティングにより機械加工面を整列する。

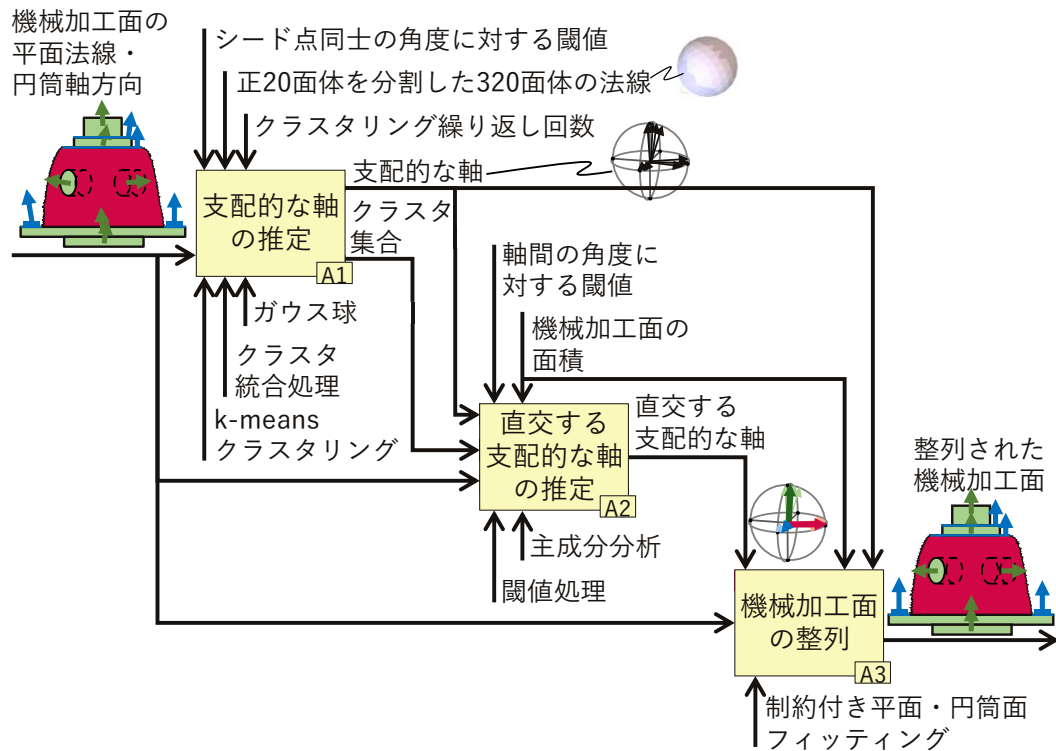


図 3.29 機械加工面の整列手法

3.4.2.2 支配的な軸の推定

本手法では、図 3.30 に示すように、ガウス球上に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投影し、以下の手順で示す k-means クラスタリングにより支配的な軸を推定する。

- ① クラスターのシードを定義（初期クラスターのシードは正 20 面体を分割した 320 面体の面法線）
- ② 全ての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の投影点を、その位置ベクトルとのなす角度が最小となるシードのクラスターに分類
- ③ クラスター内投影点の平均位置ベクトルをそのクラスターの新たなシードに設定
- ④ 隣接するクラスター同士のシード（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
- ⑤ 規定の反復回数に達した際のクラスターのシードを支配的な軸として推定

本実装では、ベクトル間角度の閾値を 10deg, クラスタリングの繰返し回数を 100 とした。

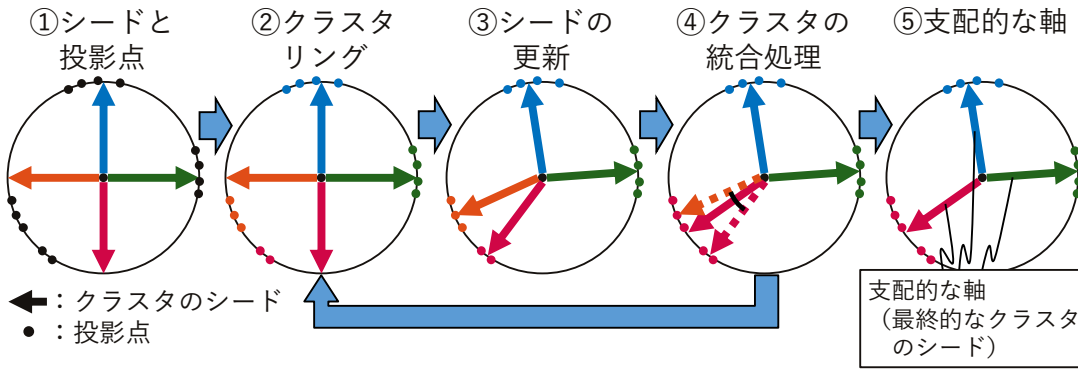


図 3.30 支配的な軸の推定手法

3.4.2.3 直交する支配的な軸の推定

最初に、図 3.31 (a)に示すように、推定された支配的な軸から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(3.7)で得られる行列 $\mathbf{C}$ の固有値解析を行う。

$$\mathbf{C} = \frac{1}{|M^{CC}|} \sum_{i \in M^{CC}} a_i^2 (\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T) \quad (3.7)$$

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、 $\mathbf{v}_i$ 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（図 3.31 (b)）。

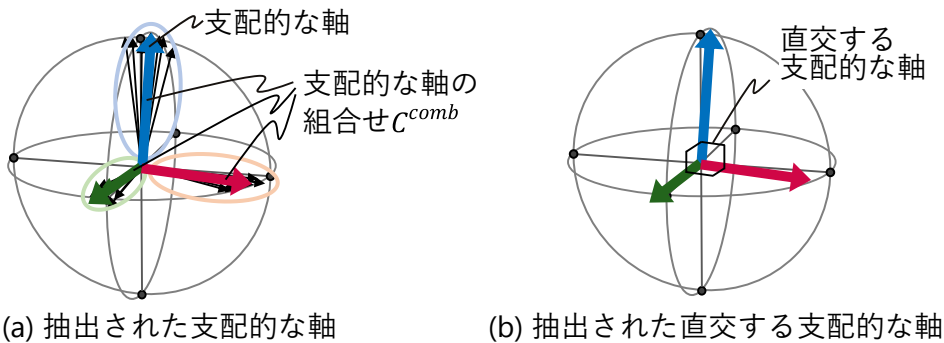


図 3.31 直交する支配的な軸の推定手法

3.4.2.4 機械加工面の整列

図 3.32(a)および(b)に示すように、 C^{comb} に属する法線と軸方向ベクトルを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、図 3.32(c)に示すように、同クラスに属し、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、図 3.32(d)に示すように、同クラスに属し、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た制約付きの平面もしくは円筒面再フィッティングにより、機械加工面のパラメータを修正する。

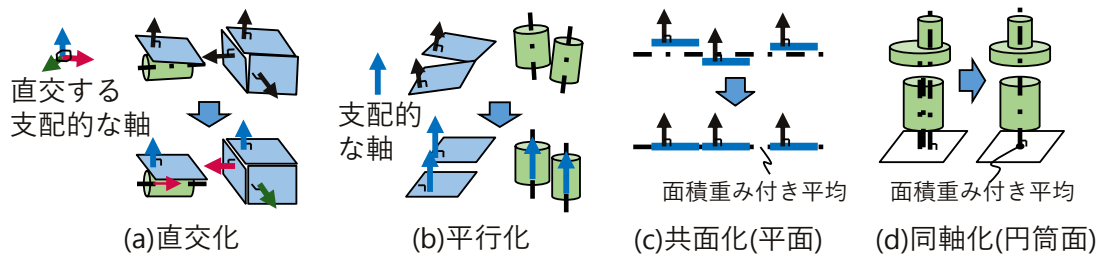


図 3.32 機械加工面の整列手法

3.5 機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルの生成

図 3.33 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鋳肌面と機械加工面に分離する（図 3.33 (A)）。そして、分離した鋳肌面に対し穴埋め、自由曲面フィッティング（図 3.33 (B)）、ソリッドモデル化（図 3.33 (C)）を適用し、鋳肌面のソリッドモデルを生成する。一方、分離した機械加工面は、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 3.33 (D)）。最後に、鋳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鋳造品のソリッドモデルを生成（図 3.33 (E)）する。

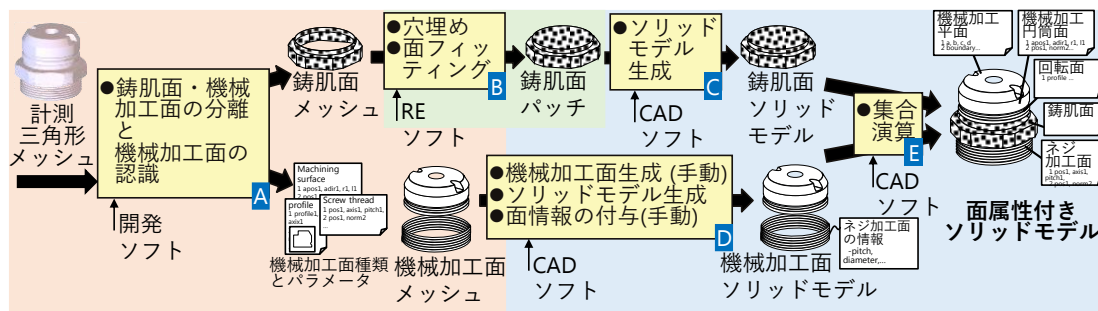


図 3.33 機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルの生成手法

3.6 実験結果と評価

3.6.1 実験の概要

本研究で使用した開発環境を以下に示す。

- OS: Windows 7 Professional 64bit
- CPU: Intel Core i7-6700K 4.00GHz
- RAM: 32.0 GB
- GPU: GeForce GTX 980
- 統合開発環境: Microsoft Visual Studio Professional 2010
- 使用言語: C++
- 使用ライブラリ: Open GL, Numerical Recipes

この節では、いくつかの計測三角形メッシュに対して提案手法を適用し、その有効性を検証する。また、表 3.2 に示す実験に用いた計測三角形メッシュは実際の鋳造品を COMET5 11M[20]により計測することにより取得した。

表 3.2 実験で用いた計測三角形メッシュ

モデル						
	(a) デフケース	(b) ジョイントA	(c) プラグ	(d) バルブ	(e) ジョイントB	(f) 粗さ標準片
頂点数	2.11M	0.55M	1.01	2.74M	1.70M	0.41M
三角形数	4.17M	1.04M	1.96M	5.29M	3.33M	0.51M
平均稜線長 [mm]	0.23	0.27	0.14	0.25	0.14	0.17

3.6.2 三角形粗さ値の推定結果

提案手法による三角形粗さ値推定の有効性を，従来手法により推定した三角形粗さ値との比較と，実際の鋳肌面の面粗さと提案手法により推定した三角形粗さ値との相関性の評価により示す．

図 3.34 に計測三角形メッシュとその三角形粗さ値推定結果を示す．カラーバーは推定した三角形粗さ値 r_t の高さを示している（赤：高，緑：中，青：低）．図 3.34(b)は提案手法により三角形粗さ値を推定した結果である．鋳肌面では三角形粗さ値が高く，機械加工面では三角形粗さ値が低く推定され，提案手法は鋳造品計測三角形メッシュの三角形粗さ値推定に対して有用であることがわかる．一方，図 3.34(c)及び(d)はそれぞれ従来法である曲げエネルギーに基づく三角形粗さ値[11]，スムージング前後の曲率差分に基づく三角形粗さ値[12]推定結果である．従来法による三角形粗さ値推定結果では，計測三角形メッシュに対する鋳肌面・機械加工面分離を目的とした場合に幾つかの問題が存在する．一つ目に，図 3.34(d)(A)のように鋳肌面上の三角形において三角形粗さ値が低く推定されるため，鋳肌面と機械加工面との誤分類が発生し得る．二つ目に，図 3.34(c)(B)及び図 3.34(d)(B)のように機械加工面境界付近で機械加工面上の三角形の三角形粗さ値が高く推定されるため，機械加工面の不十分な抽出が発生し得る．これらの問題は提案手法による三角形粗さ値推定結果では見られず，従来法と比較して正確に計測三角形メッシュを鋳肌面と機械加工面に分離できることを示している．

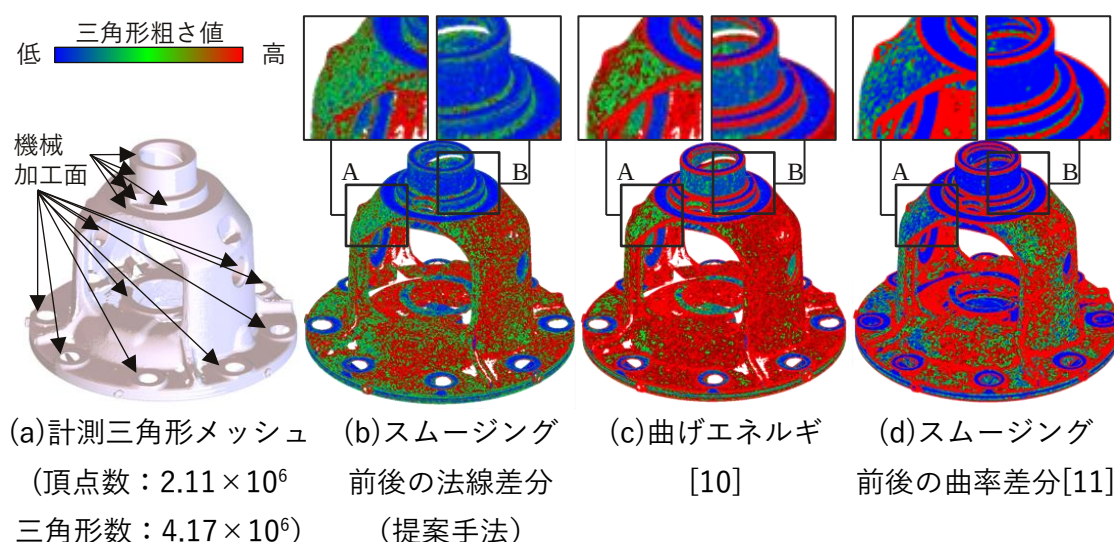


図 3.34 三角形粗さ値推定結果

図 3.35 に鋳肌面の粗さ標準片に対し，本研究で提案する三角形粗さ値の推定手法を適用した結果を示す．図 3.35 (a)に示す標準片は左側から順に 0.508, 1.524, 3.048, 5.080, 7.620, 10.668, 14.224, 18.288, 22.860 μm の二乗平均平方根面粗さを持つ．図

3.35 (b)は標準片を計測した計測三角形メッシュであり、頂点数は 410,501、三角形数は 506,324、平均エッジ長は 0.173mm である。図 3.35 (c)は計測三角形メッシュに対する三角形粗さ値の推定結果であり、標準片の面粗さの増加に応じて推定した三角形粗さ値が増加していることがわかる。

また、図 3.36 は、粗さ標準片の面粗さ毎に推定された三角形粗さ値の平均をプロットしたグラフである。推定結果に対し線形最小二乗法による近似を適用したところ、近似直線の相関係数 R^2 は 0.8996 となり、提案手法により推定される三角形粗さ値は実際の鋳肌面の面粗さに対して非常に強い相関を持つことが確認できる。

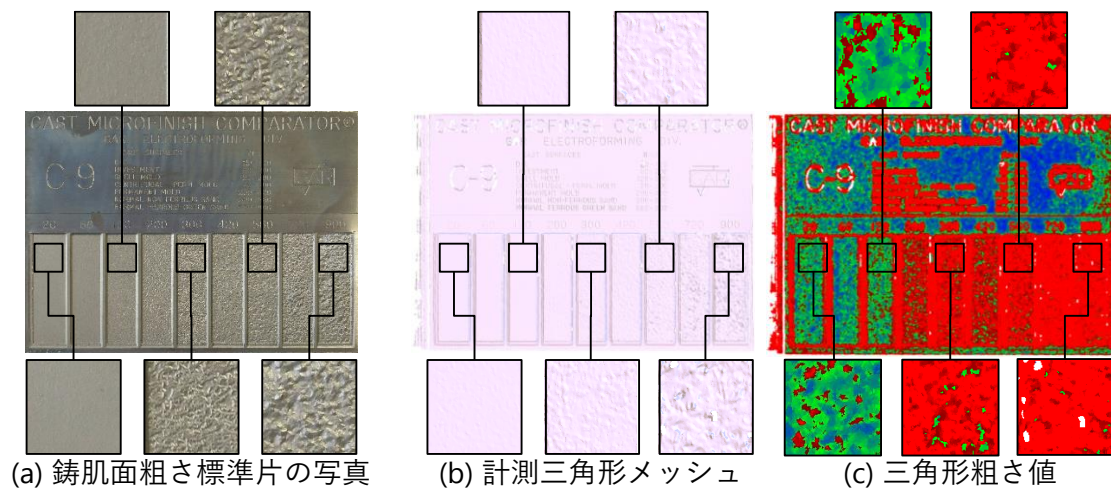


図 3.35 鋳肌面粗さ標準片に対する三角形粗さ値推定結果

二乗平均平方根面粗さに対する三角形粗さ値の推定結果

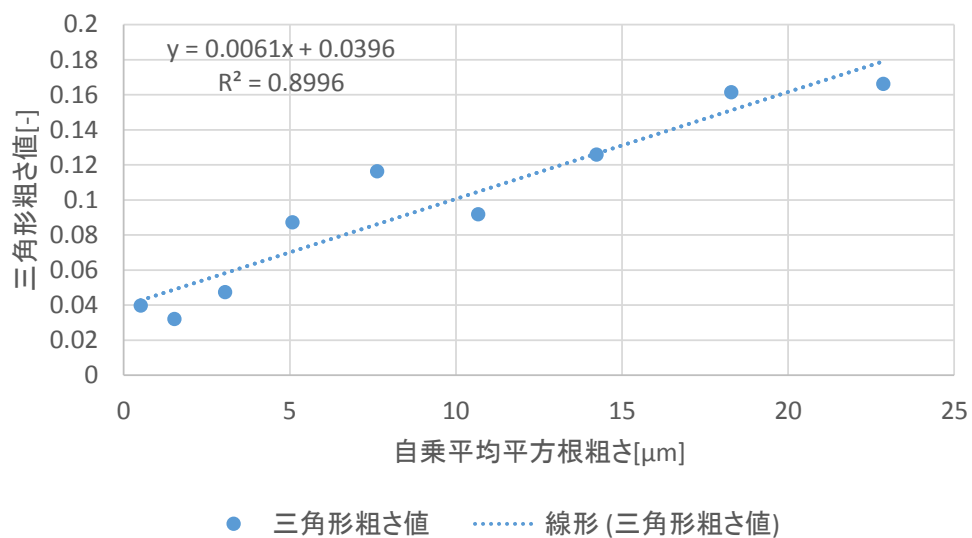


図 3.36 鋳肌面粗さ標準片に対する三角形粗さ値推定結果

また、表 3.3 に(a) 粗さ標準片、(b) デフケース、(c) プラグ、(d)ジョイントに対する三角形粗さ値の推定結果および処理時間を示す。いずれの計測三角形メッシュでも鋳肌面では三角形粗さ値が高く、機械加工面では三角形粗さ値が低く推定できていることが確認できる。本実験では、スムージングにおける λ - μ アルゴリズム[12]の反復回数を 200 回とした。この値は反復回数に伴う最大及び平均三角形粗さ値の変化の関係を実験から求め、最大及び平均三角形粗さ値の変化量が十分に小さくなる反復回数として求めた。

表 3.3 計測三角形メッシュに対する三角形粗さ値推定結果と処理時間

	(a) 粗さ標準片	(b) デフケース	(c) プラグ	(d)ジョイント
頂点数/ 三角形数	0.76 $\times 10^6$ / 1.51 $\times 10^6$	2.11 $\times 10^6$ / 4.17 $\times 10^6$	1.01 $\times 10^6$ / 1.96 $\times 10^6$	0.55 $\times 10^6$ / 1.04 $\times 10^6$
処理時間[s]	13.2	43.0	18.1	8.9

3.6.3 鋳肌面・機械加工面分離と機械加工平面・円筒面の認識結果

表 3.4 に機械加工面抽出結果（青：機械加工平面，緑：機械加工円筒面，赤：鋳肌面）を示す。表 3.4(a)は鋳肌面の粗さ標準片に対する鋳肌面・機械加工面分離結果である。本実験では面分離のための面粗さ閾値 τ_r に対し、二乗平均平方根粗さが 5.080 μm 以上の面を鋳肌面として分離することが可能な値として 0.04 と設定した。表 3.4 の(b)デフケース、(c)プラグ、(d)ジョイントにおいても同様の面粗さ閾値 τ_r を用いた。

表 3.4 (b)デフケースおよび(c)プラグでは全ての機械加工面が抽出された。一方、表 3.4 (d)ジョイントではほとんどの機械加工面を抽出できたが、部品上部の段付き部分の二つの平面が未検出となった。これは領域の幅が狭く、面粗さが高く推定されたこととして、該当箇所が十分に計測できていなかったことが原因である。

また、3.2.2 節における閾値 τ_a 、 τ_{rad} 、 τ_l はそれぞれ、18°、メッシュの平均稜線長の二倍、メッシュのバウンディングボックスの対角線長とし、閾値 τ_{la} は実行時に対話的処理により決定した。

本提案手法の 3.5.3 節までの成果を実際の RE 作業に適用し、その効果を検証した。RE 作業における CAD データ作成では、計測三角形メッシュが鋳肌面と機械加工面に

分離され、機械加工面における自由曲面サーフェス生成の精度の考慮が不要となり、鋳肌面のみへのラフな自由曲面パッチ生成が可能となった。図 3.37 に示すように、実際に作成した CAD データはデータ容量が削減され、RE 作業の効率性が向上した。

また、実際に RE 作業の熟練者 2 名が、現物の鋳造品を基に CAD データ及び木型製作用の CAM データ作成を実施したところ、図 3.38 に示すように、従来手法と比較して作業時間が 4 時間から 3 時間（75%）に短縮された。なお、RE 作業において、鋳造品の測定には COMET 5 11M[20]、CAD モデルの作成には Geomagic[21] 及び SolidWorks[22]、CAM データの作成には WorkNC[23]が使用された。

表 3.4 機械加工面抽出結果

		(a) 粗さ標準片	(b) デフケース	(c) プラグ	(d) ジョイント
青：機械加工平面 緑：機械加工円筒面 赤：鋳肌面					
頂点数/ 三角形数		$0.76 \times 10^6 /$ 1.51×10^6	$2.11 \times 10^6 /$ 4.17×10^6	$1.01 \times 10^6 /$ 1.96×10^6	$0.55 \times 10^6 /$ 1.04×10^6
処理時間[s]		1.1	14.7	7.8	2.6
認識 成功率	平面	—	100%(22/22)	100%(1/1)	75%(6/8)
	円筒面	—	100%(10/10)	100%(4/4)	100%(12/12)

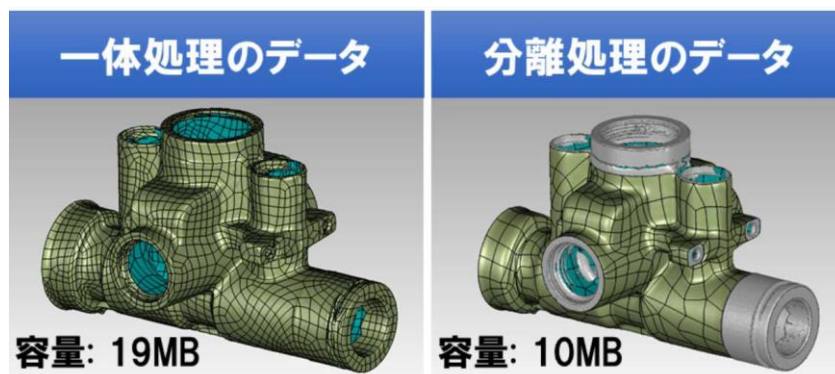


図 3.37 CAD データ量の低減

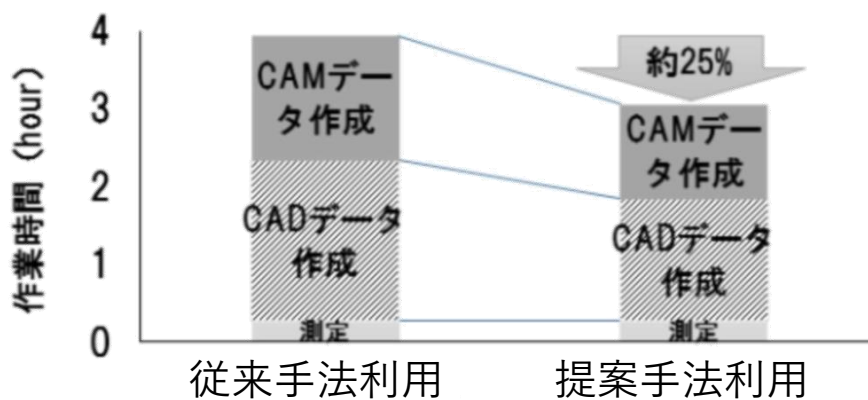


図 3.38 RE データ作成時間の短縮

3.6.4 貫通穴の認識結果

バルブとデフケースの計測三角形メッシュに対する貫通穴の認識結果を図 3.39 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 3.39 (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 3.39 (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 3.5 は図 7(b)中の A,B の貫通穴の直径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．なお，処理時間はバルブでは 215 秒，デフケースでは 237 秒であった．

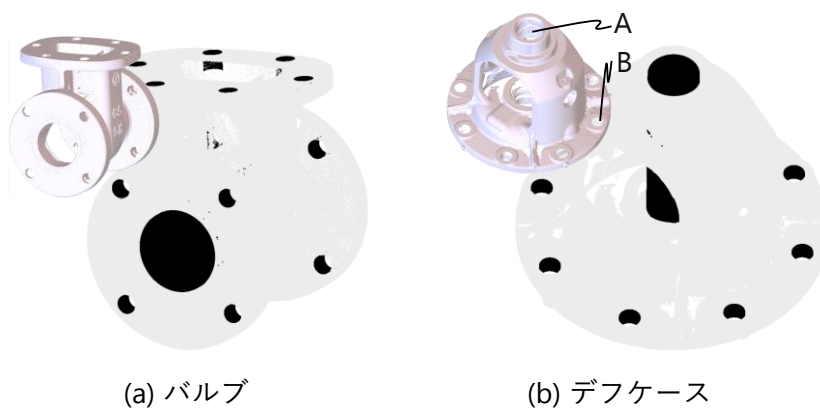


図 3.39 貫通穴の認識結果

表 3.5 推定された貫通穴の直径[mm]

	手動計測	提案手法	誤差
貫通穴 A	27.0	26.8	0.2
貫通穴 B	11.3	最大：11.2	0.1
		最小：11.1	0.2

3.6.5 ネジ加工面の認識結果

図 3.40 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 3.6 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．また，処理時間はプラグでは 64[s]，ジョイントでは 88[s]であった．なお，RE ソフトウェアでの手動計測は以下の方法で複数回行い，平均値を抽出パラメータとして採用した．

- ・外径：ネジ部外縁の正反対の位置に存在する頂点間の距離を計測
- ・ピッチ：同位相上にある頂点間の距離を計測
- ・フランク角：フランク面の傾きを画面上で計測



(a) プラグ



(b) ジョイント

図 3.40 ネジ加工面の認識結果

表 3.6 推定されたネジ加工面のパラメータ

	プラグ			ジョイント		
	提案手法	手動計測	G2 (JIS B 0202)	提案手法	手動計測	G3/4 (JIS B 0202)
外径[mm]	59.7	59.6	26.9	26.9	26.3	26.4
ピッチ[mm]	2.3	2.3	2.3	1.8	1.8	1.8
フランク角[deg]	29.0	27.5	26.5	27.2	27.5	27.5

3.6.6 機械加工面間回転面状従属フィーチャの認識

図 3.42 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．

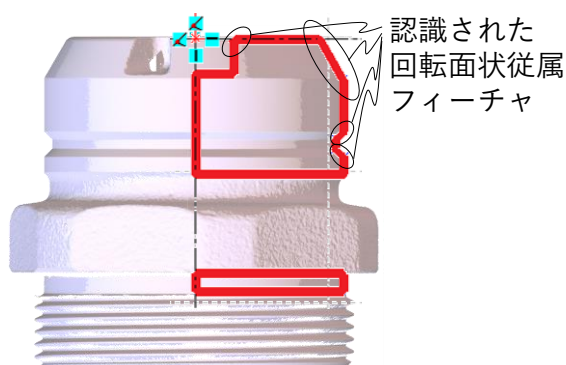


図 3.41 機械加工面間回転面状従属フィーチャの認識結果

3.6.7 鋳肌面メッシュ境界の整形結果

図 3.42 に境界の整形前後の鋳肌面メッシュ（赤：鋳肌面，青・緑：機械加工面）と自由曲面パッチ生成の結果を示す．整形処理の結果から，鋳肌面メッシュ境界の形状が平滑化され，境界付近に存在していた過密な自由曲面パッチが生成されないことを確認した．なお，自由曲面パッチ生成には Geomagic Studio 2012[21]を使用した．

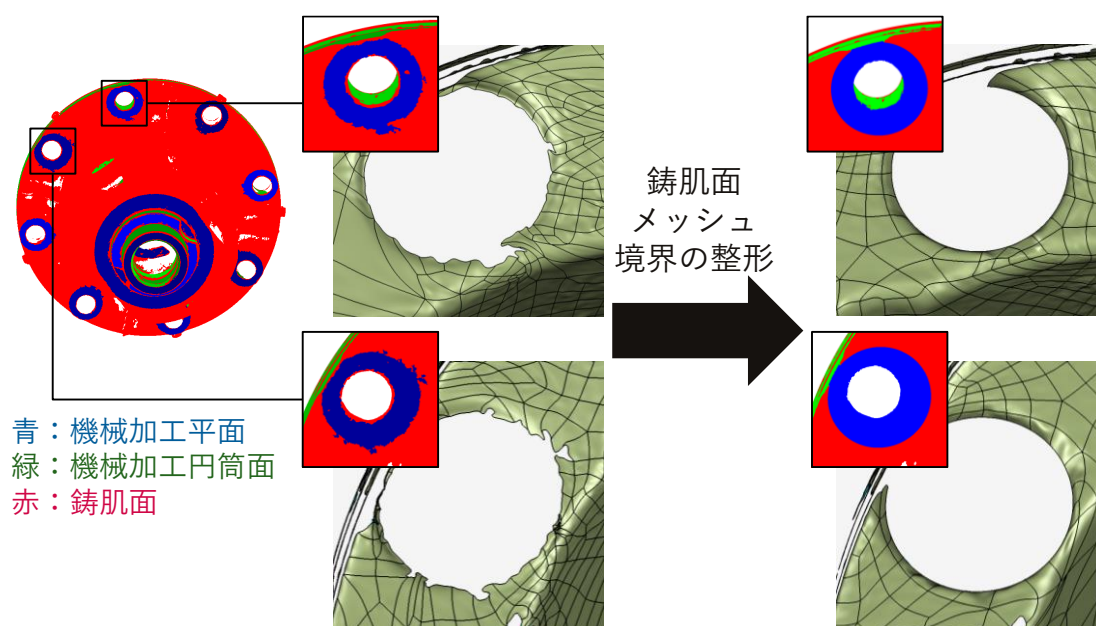


図 3.42 鋳肌面メッシュ境界の平滑化結果

3.6.8 機械加工面の整列結果

図 3.43 に機械加工面の整列結果を示す．図 3.43 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 3.43 (a)の軸方向は最大で 0.58 度，図 3.43 (b)の軸方向は最大で 0.79 度修正された．処理時間はデフケースでは 0.36[s]，ジョイントでは 0.11[s]であった．

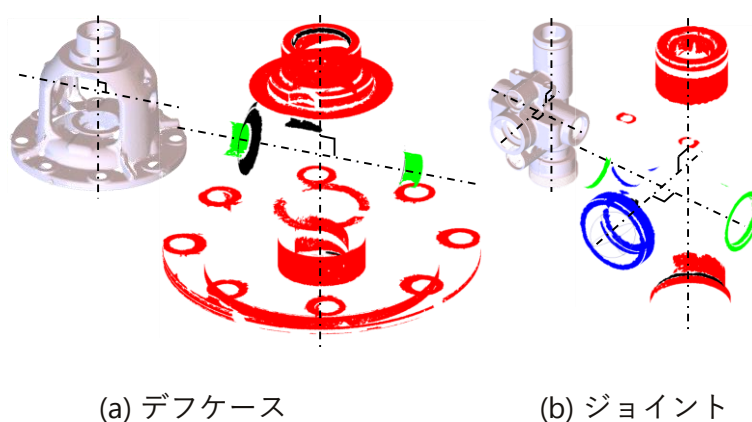


図 3.43 機械加工面の整列結果

3.6.9 機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルの生成結果

図 3.44 に従来手法によるソリッドモデル生成の流れと課題を示す。従来手法によるソリッドモデル生成手法には大きく分けて手動による方法（図 3.44(a)）と自動面貼りによる方法（図 3.44(b)）があるが、いずれの手法によって生成されるソリッドモデル生成でも鋳肌面と機械加工面の区別をしていない、自動面貼りによる手法では機会加工に必要な情報が得られないという課題が存在する。図 3.45 に提案するソリッドモデル生成の流れを示す。提案手法では最初に計測三角形メッシュを鋳肌面メッシュと機械加工面に分離する。次に、分離された鋳肌面メッシュに対しては RE ソフトウェア上で穴埋め、自由曲面フィッティングを適用し鋳肌面自由曲面モデルを生成し、CAD ソフトウェア上でソリッドモデル化することで鋳肌面ソリッドモデルを生成する。そして、分離された機械加工面メッシュに対しては認識された曲面タイプとパラメータを用いて CAD ソフトウェア上で機械加工面生成、ソリッドモデル化、ネジ加工面のピッチや外径といった曲面情報の付与により機械加工面ソリッドモデルを生成する。最後に、鋳肌面ソリッドモデルと機械加工面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ソリッドモデルを生成する。

図 3.46 (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鋳肌面の穴埋め、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 2012 [21]、鋳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 V5 [24]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、鋳造品の三次元計測には Steinbichler 社製 COMET 5 11M [20]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 3.7 に提案手法に基づくソリッドモデル生成処理の作業時間[A]、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[B]を示す。

表 3.7 [A]に示すように、提案手法によるプラグおよびジョイントのモデリング作業時間はそれぞれ 20 分と 36 分であった。表 3[B]と比較し、プラグは熟練作業者による RE とほぼ同等の作業時間であり、ジョイントの作業時間は 28%短縮された。また、機械加工面生成の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。

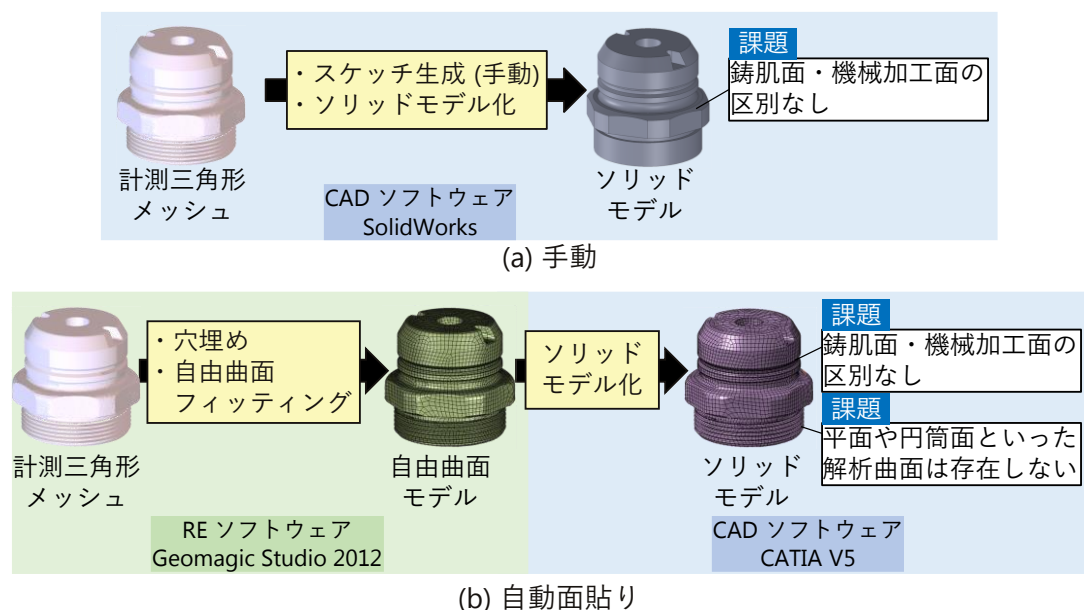
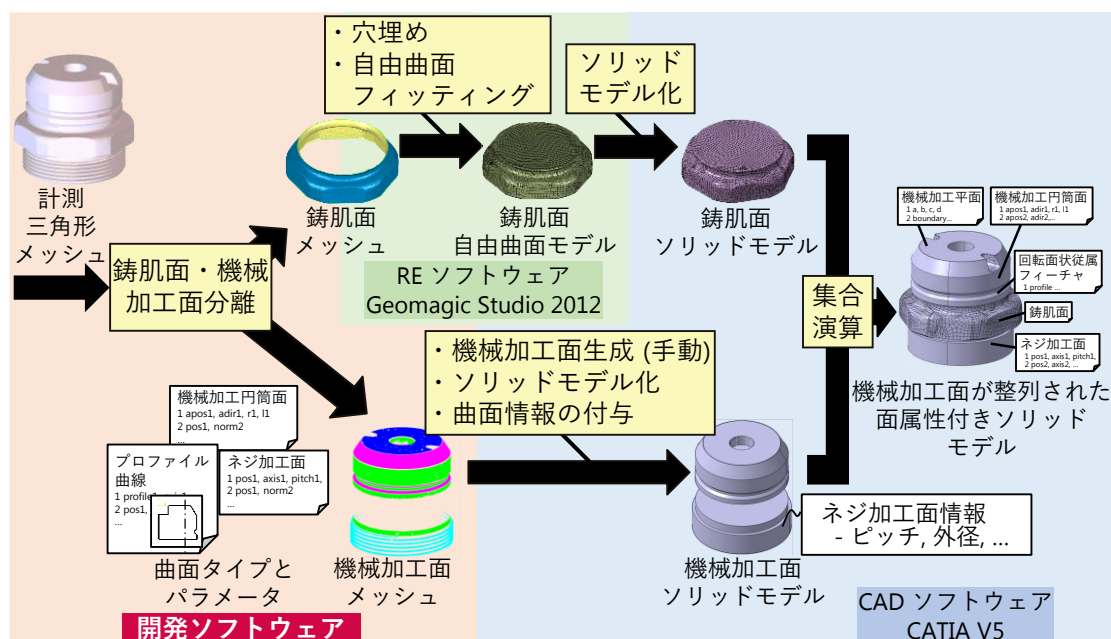


図 3.44 従来手法によるソリッドモデル生成の流れと課題



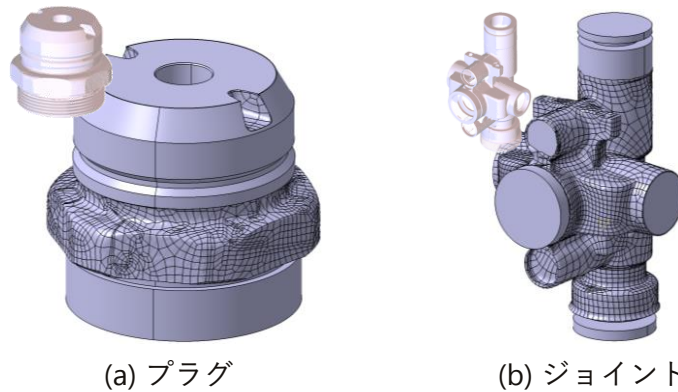


図 3.46 機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルの生成結果

表 3.7 ソリッドモデル生成の処理時間

モデル	[A] 作業時間 [min]									[B] 従来手法 による 作業時間 (手動) [min]
	面分離と 曲面認識 (提案手法)	鋳肌面処理			機械加工面処理			集合 演算	合計	
		穴埋め	自由曲面 フィッテ ィング	ソリッド モデル化	機械 加工面 生成 (手動)	ソリッド モデル化	曲面 情報の 付与			
プラグ	1	2	5	1	7	1	1	2	20	19
ジョイ ント	1	11	4	1	14	1	-	4	36	50

3.7 まとめ

本章では鋳造品の計測三角形メッシュからの機械加工面が整列された面属性付きソリッドモデルの生成手法を提案した。提案手法は以下の4つのプロセスからなり、それぞれの結果をまとめる。

- 鋳肌面・機械加工面の分離

鋳造品の計測三角形メッシュに対し、スムージング前後の法線ベクトルの差分に基づき三角形粗さ値を推定する手法を提案し、さらに、推定した三角形粗さ値に対する閾値処理により計測三角形メッシュを鋳肌面と機械加工面に分離する手法を提案した。三角形粗さ値の推定手法は既存研究の曲げエネルギーに基づく手法とスムージング前後の曲率差分に基づく手法と比較を行い、本研究で提案した手法は既存手法と比較し、鋳肌面上で粗さ値が低く推定されにくい、機械加工面境界付近でも三角形粗さ値が高く推定されにくいという結果が観察でき、鋳造品の鋳肌面・機械加工面分離において有用であることを確認した。

- 機械加工面の認識

計測三角形メッシュから分離された機械加工面から、各種の機械加工面を認識する手法を提案した。本研究では、平面、円筒面、ネジ加工面、貫通穴、機械加工面間回転面状従属フィーチャを認識するアルゴリズムを開発した。実際の鋳造品の計測三角形メッシュへの適用を通して各種の機械加工面の認識手法の有効性を検証した。

- 鋳肌面・機械加工面の整形

分離された鋳肌面と認識された機械加工面に対する二つの整形手法を提案した。計測三角形メッシュから分離された鋳肌面に対して、集合演算の際に隣接する機械加工面との交差を保証するために、鋳肌面メッシュ境界を整形する手法を提案した。提案手法を実際の鋳造品の計測三角形メッシュへ適用した結果、分離された鋳肌面メッシュ境界が隣接する機械加工面と交差する位置に整形できていることを確認した。また、認識された機械加工面に対して、平面の法線ベクトルと円筒面の軸ベクトルをガウス球に投影し、クラスタリングと主成分分析により鋳造品の直交する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整列する手法を提案した。提案手法を鋳造品の計測三角形メッシュに適用した結果、鋳造品に含まれる直交する支配的な軸を認識し、対応する法線ベクトル・軸ベクトルを持つ機械加工平面・円筒面を整列できることを確認した。

- 機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルの生成

分離された鋳肌面から生成したソリッドモデルと認識された機械加工面から生成したソリッドモデルとの集合演算により、機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルを生成する手法を提案した。提案手法により生成されたソリッドモデルは、従来手法により生成されたソリッドモデルとは異なり、表面が鋳肌面か機械加工面であるかが区別され、さらに、機械加工面は平面、円筒面、ネジ加工面、機械加工面間従属フィーチャである回転面といった面属性が付与されており、後工程においてその情報を利用することで従来の RE 手法によるソリッドモデルよりも有用に活用できることが期待できる。

第4章 鋳造品のための最適計測計画

4.1 鋳造品のための最適計測計画の概要と特徴

高品質な鋳造品ソリッドモデルを生成するためには、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取得することが重要である。鋳造品の三次元計測に用いている縞投影による光学式三次元形状測定機は一般的に、三次元計測の際の計測表面とカメラ光軸とのなす角が垂直であるほど計測精度が高くなるため、計測対象物に対する計測位置姿勢（計測機の位置と計測方向）を適切に設定した上で計測を実施する必要があるが、現状の計測機の位置姿勢の決定は計測作業者の経験に頼っており、必ずしも質の高い計測三角形メッシュが取得できているとはいえない。また、計測三角形メッシュの質を高めるために計測回数が必要以上に増加してしまうという問題もある。そこで本研究では鋳造品を対象とした、質の高い計測三角形メッシュを効率よく取得可能な次の最適計測姿勢を自動で推定する手法を提案する。また、本提案手法の有用性を評価するための計測シミュレーション手法を4.5節で説明する。なお、本研究では、図4.1に示すように、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。

図4.2に提案手法の概要を示す。本手法は最初に、既計測の三角形メッシュを既提案手法である鋳肌面・機械加工面分離と機械加工面認識手法を適用する（図4.2, A1）。次に、分離された鋳肌面と認識された機械加工面それぞれから複数の最適計測位置姿勢の候補集合 S_{NBV} を算出する（図4.2, A2）。最後に、算出された候補集合 S_{NBV} から未計測領域の計測可能性と各機械加工面の計測品質の二つの評価の重み付き和を最大とする計測位置姿勢を最適計測位置姿勢として決定する（図4.2, A3）。各プロセスの詳細を以下に示す。

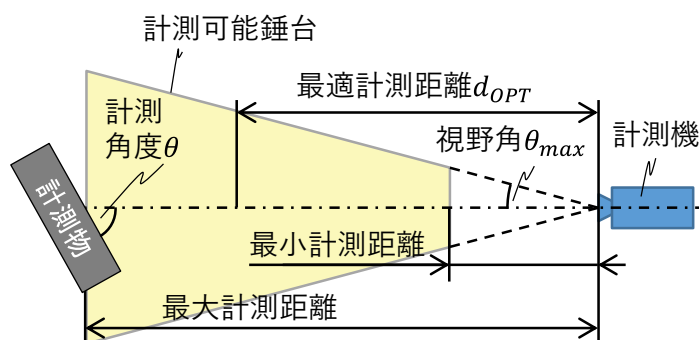


図 4.1 計測機のモデル

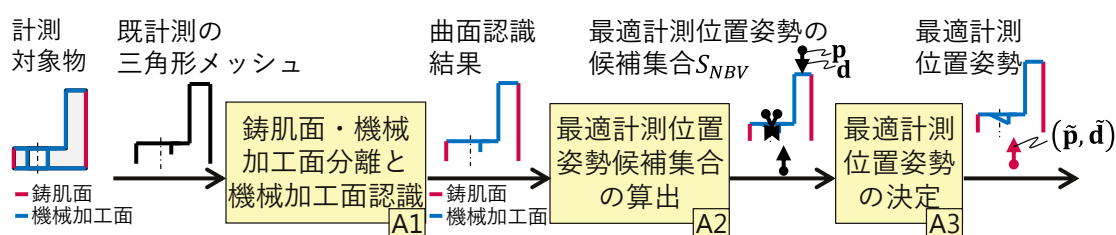


図 4.2 提案する最適計測位置姿勢の推定手法

4.2 鋳肌面・機械加工面分離と機械加工面認識

既計測の三角形メッシュに対して、3.2 節で示した鋳肌面・機械加工面分離および 3.3 節で示した機械加工面認識手法を適用する。適用の結果、既計測の三角形メッシュは鋳肌面と機械加工面に分離され、さらに、機械加工面からは平面、円筒面、ネジ加工面、貫通穴が認識される。

4.3 最適計測位置姿勢候補集合の算出

最初に、既計測の三角形メッシュから境界エッジループを抽出し、各ループを以下の三種類に分類する。

- ①鋳肌面境界ループ：鋳肌面メッシュの境界エッジのみで構成されるループ
- ②機械加工面境界ループ：機械加工面メッシュの境界エッジのみで構成されるループ
- ③混合境界ループ：上記①②以外のループ

次に、未計測部を計測するための次の計測位置姿勢候補を、①および③の境界ループ集合から未計測部が計測機からなるべくよく観察できる位置姿勢として求める。本研究では、Karaszewski ら[16]と同様に、境界エッジループへのフィット平面に垂直に計測した場合、未計測部を効率よく計測できると仮定し、計測位置姿勢の候補を算出

する．具体的には，図 4.2 に示すように，メッシュ境界に対し，RANSAC に基づき複数平面フィッティングし，それぞれの f_i に垂直かつ f_i に属する境界の重心 c_i を計測中心軸が通る計測位置 p_i と姿勢 d_i を候補として算出する．

そして，認識された機械加工面に対し，その曲面種類に基づき計測品質を最大化可能な計測位置姿勢を算出する．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 4.4(a) に示すように，軸・円周方向に一定間隔で分割し，各分割領域 C_j において②の境界ループが含まれる場合，円筒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 p_j と姿勢 d_j を候補として算出する．また，凹円筒面・雌ネジ加工面は，図 4.4(b) に示すように，円筒面を軸に沿って複数に分割し，各分割領域 D_k において②の境界ループが含まれる場合，円筒等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機の位置 p_k と姿勢 d_k を候補として算出する．

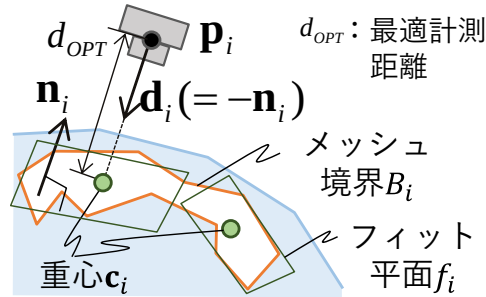
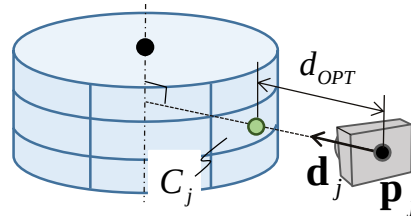
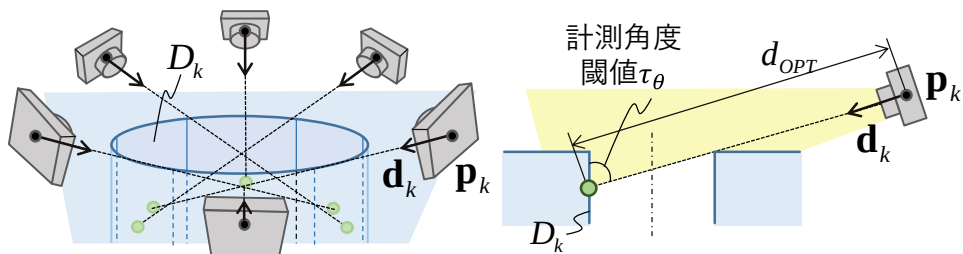


図 4.3 鋳肌面からの計測位置姿勢の候補の算出手法



(a)凸円筒面・雄ネジ加工面



(b)凹円筒面・雌ネジ加工面

図 4.4 機械加工面からの計測位置姿勢の候補の算出手法

4.4 最適計測位置姿勢の決定

4.3 節で算出された計測位置姿勢候補集合 $S = \{(\mathbf{p}_i, \mathbf{d}_i)\}$ から、式(4.1)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。

$$(\tilde{\mathbf{p}}, \tilde{\mathbf{d}}) = \arg \max_{(\mathbf{p}, \mathbf{d}) \in S_{NBV}} \left\{ (1 - \alpha) o(\mathbf{p}, \mathbf{d}) + \alpha \sum_{m_j \in M} q(\mathbf{p}, \mathbf{d}, m_j) a(\mathbf{p}, \mathbf{d}, m_j) \right\} \quad (4.1)$$

ここで、 α は重み、 $o(\mathbf{p}, \mathbf{d})$ は $(\mathbf{p}, \mathbf{d})$ から可視な境界ループの総長であり、 $(\mathbf{p}, \mathbf{d})$ 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。 M は機械加工面集合である、 $q(\mathbf{p}, \mathbf{d}, m_j)$ 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、図 4.5 に示すように、機械加工平面の単位法線ベクトルと単位計測方向ベクトル $\mathbf{d}$ との内積値であり、機械加工円筒面・ネジ加工面では単位軸方向ベクトルと単位計測方向ベクトル $\mathbf{d}$ との外積値の絶対値である。また、 $a(\mathbf{p}, \mathbf{d}, m_j)$ は、機械加工面 m_j の $(\mathbf{p}, \mathbf{d})$ から可視な面積である。

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可能であり、 $\alpha = 0$ のとき計測面積のみを考慮、 $\alpha = 1$ のとき計測品質のみを考慮する。また、

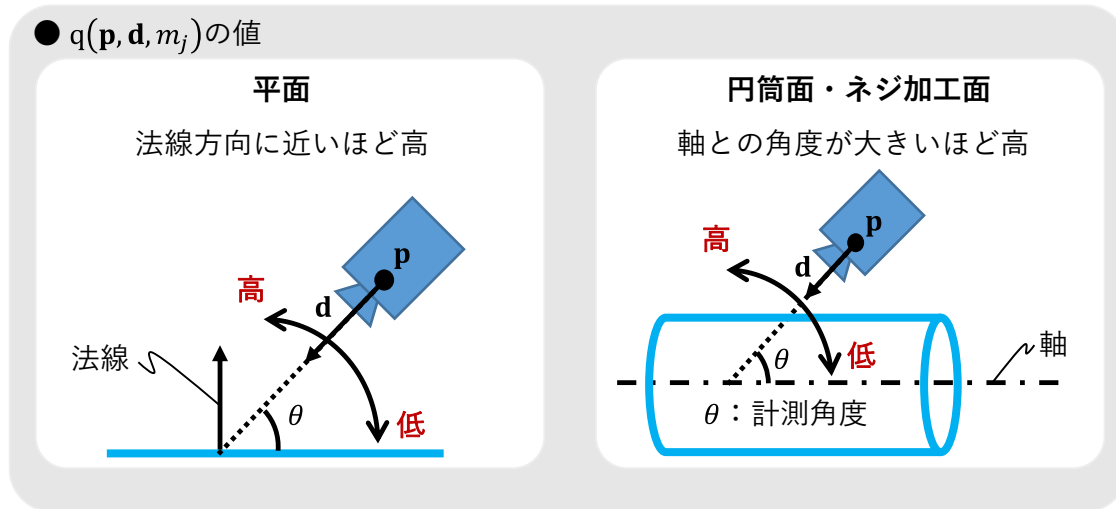


図 4.5 機械加工面集合に対する評価関数 q の値

4.5 計測シミュレーションを用いた推定された最適計測位置姿勢の評価

本研究では、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により実施する。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様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。また、メッシュの各三角形に鋳肌面か否かの情報を事前に付与し、各三角形は、計測済みレベル、ならびに計測されたときの計測角度 q_t の3つのパラメータを持つ。計測シミュレーションでは、図4.6に示すように、計測された（計測機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計測角度 q_t に付与する。

なお、三角形の鋳肌面か否かのパラメータは、フリーのメッシュ操作ソフトである MeshLab [25]を用いて鋳肌面上のメッシュ頂点に黒、機械加工面上に灰のカラー情報を付与し、図4.7に示すように、黒色の頂点に一つでも接続している三角形を鋳肌面、それ以外の三角形を機械加工面と判定することで取得した。また、計測シミュレーションでは、可視三角形を取得するために、図4.8に示すように、三角形メッシュの三角形それぞれに固有の色を割り当てた上でレンダリングを行い、レンダリング画像に含まれる色に対応する三角形を可視三角形として取得する。

推定した最適計測位置姿勢の評価は図4.9に示す手順で行う。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を行うラフ計測シミュレーションを行う。具体的には、ターンテーブルを模した水平面に対し斜め45度上方から計測物鉛直軸周りに120度ずつ3回の計測を実施し、さらに、計測物を裏返した状態での計測を模した斜め45度下方から計測物鉛直軸周りに120度ずつ3回の計測を行う。次に、4.4節までで提案した最適計測位置姿勢の推定手法により最適計測位置姿勢 $(\tilde{\mathbf{p}}, \tilde{\mathbf{d}})$ を推定し、 $(\tilde{\mathbf{p}}, \tilde{\mathbf{d}})$ からの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 τ_A より大きければ計測シミュレーションを継続し、閾値 τ_A 以下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、式(4.2)、(4.3)、(4.4)でそれぞれ示される計測率 A 、未計測部網羅率 C 、計測品質 Q を評価する。

$$A = \frac{A_N}{A_S} \quad (4.2)$$

$$C = \frac{A_N - A_{occ}}{A_{occ}} \quad (4.3)$$

$$Q = \frac{1}{|T_N|} \sum_{t \in T_N} q_t \quad (4.4)$$

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、 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。

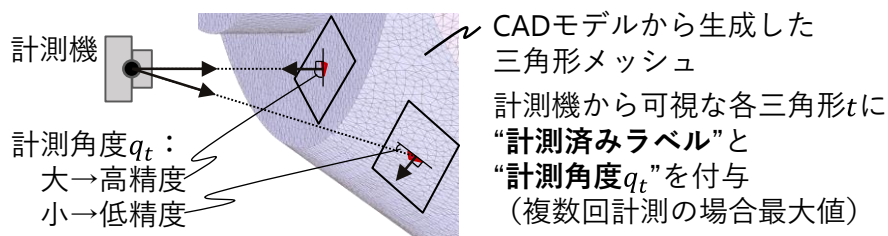


図 4.6 計測シミュレーション



図 4.7 三角形メッシュへの鋳肌面・機械加工面情報の付与結果

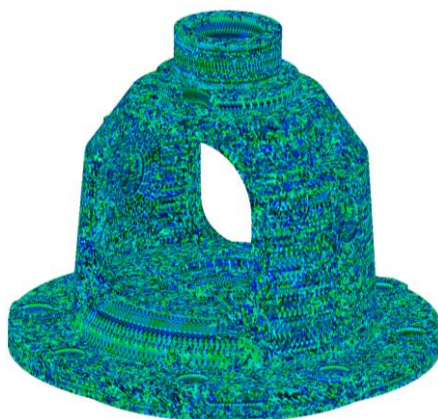


図 4.8 三角形毎に固有の色を割り当てた描画結果

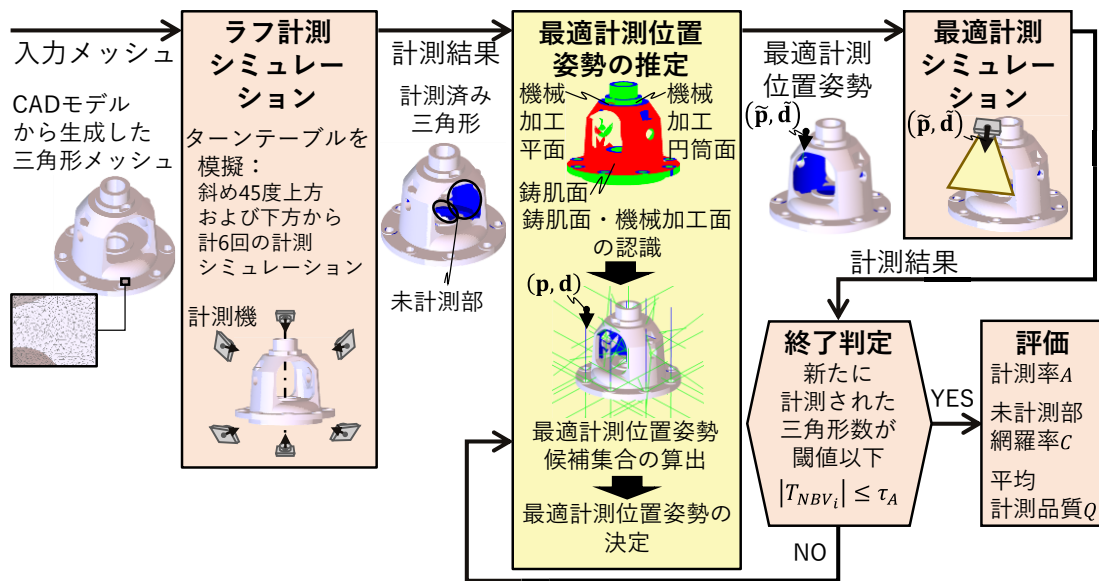


図 4.9 計測シミュレーションによる提案手法の有用性評価プロセス

4.6 実験結果と評価

本研究では、最適計測位置姿勢を算出する式(4.1)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 4.10 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（黄：計測済み三角形、赤：新たに計測された三角形）を示す。ケース 1 では 15 回目、ケース 2 では 6 回目の最適計測で計測が終了した。また、図 4.11 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、青：未計測部）である。また、図 4.12 に計測率 A と未計測部網羅率 C の推移、図 4.13 に計測品質 Q の推移を示す。ここで、図 4.12 および図 4.13 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 $(A, C, Q) = (98.8\%, 91.8\%, 53.4^\circ)$ 、ケース 2 では $(A, C, Q) = (91.7\%, 44.4\%, 54.1^\circ)$ 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 4.3 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る。

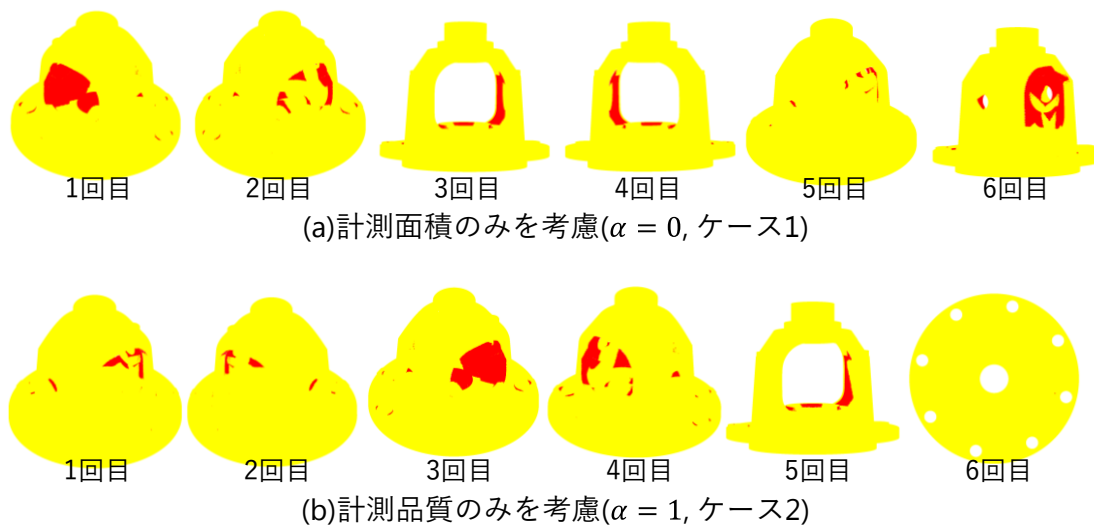


図 4.10 各最適計測位置姿勢における計測結果

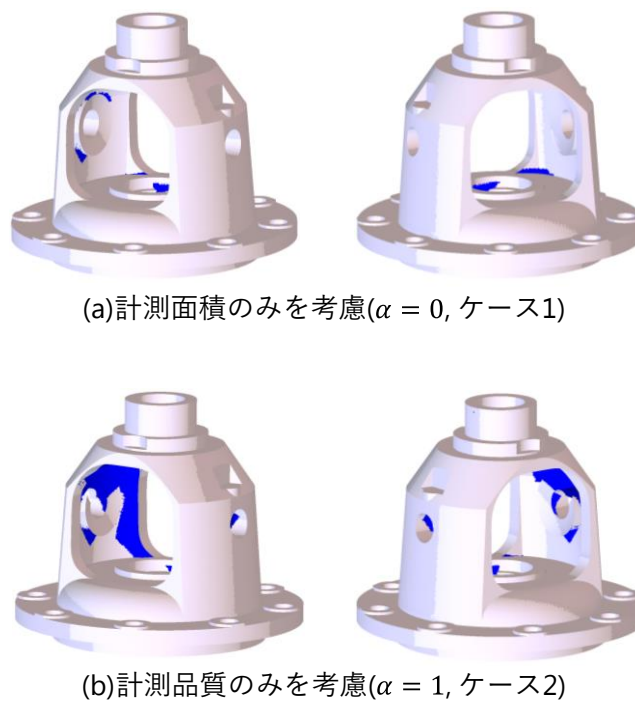


図 4.11 計測シミュレーション結果

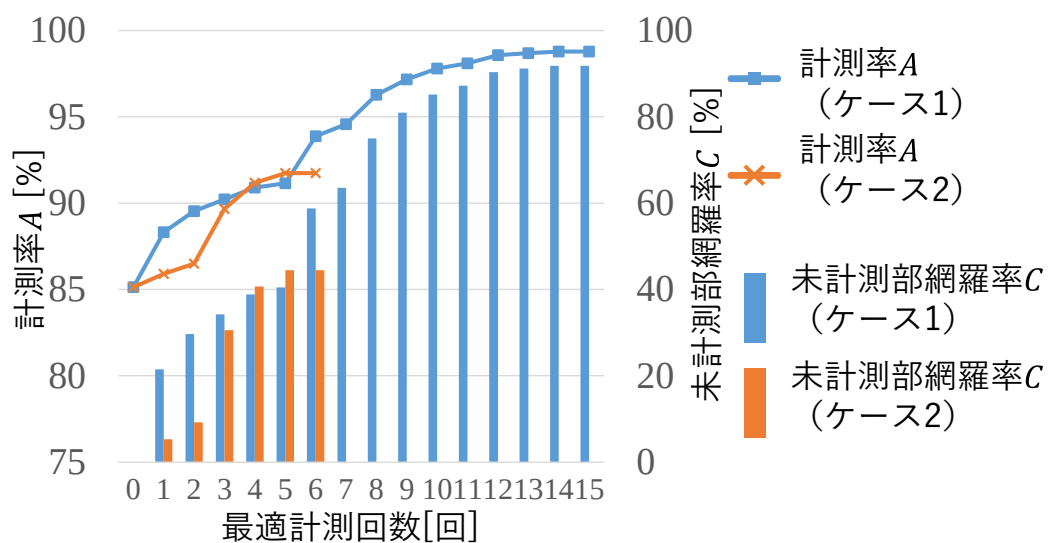


図 4.12 計測率Aと未計測部網羅率Cの推移

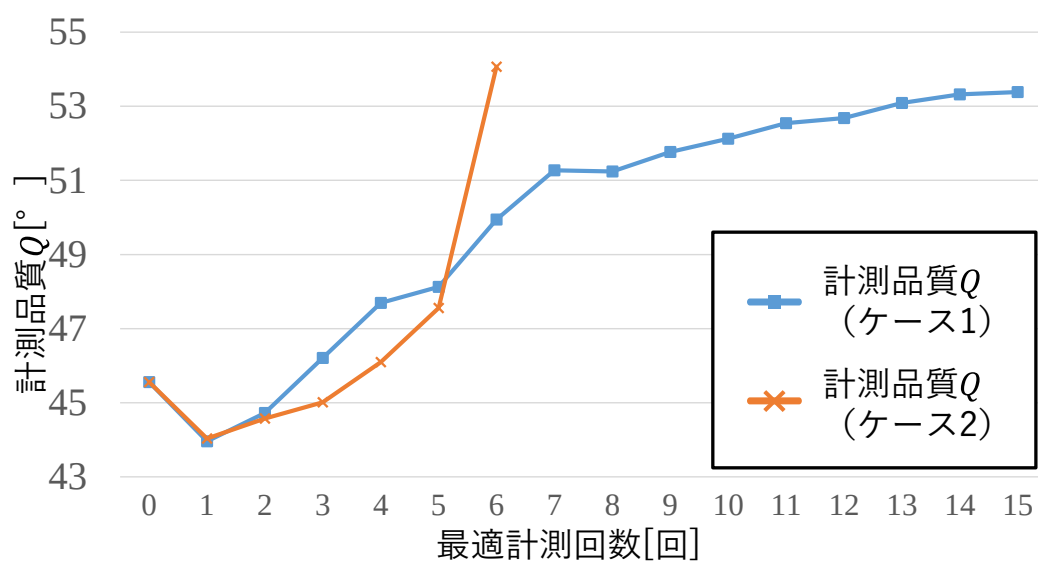


図 4.13 計測品質Qの推移

4.7 まとめ

本章では、鋳造品を対象とした最適計測位置姿勢の自動決定手法の確立を目的に、鋳肌面の未計測部を最小化し、かつ、機械加工面の高精度な計測を可能とする最適計測位置姿勢決定手法を提案した。提案手法は以下の3つのプロセスからなる。

- 鋳肌面・機械加工面分離と機械加工面認識
既計測の三角形メッシュに対し、鋳造品の鋳肌面と機械加工面からそれぞれ未計測部の最小化と計測品質の最大化を実現する次の計測位置姿勢の候補算出のために、3.2節で提案した鋳肌面・機械加工面分離と3.3節で示した機械加工面認識手法を適用する。
- 最適計測位置姿勢候補集合の算出
分離された鋳肌面および認識された機械加工面それぞれから、未計測部の最小化と機械加工面の計測品質の最大化を実現する計測位置姿勢の候補集合を算出する。分離された鋳肌面からは境界エッジグループに対するフィット平面に基づき未計測部の計測面積を最大化する計測位置姿勢を算出する。一方、機械加工面からは、認識された機械加工面の種類に基づき表面への計測角度が垂直となるような計測品質を最大化する計測位置姿勢を算出する。
- 最適計測位置姿勢の決定
鋳肌面と機械加工面から算出された計測位置姿勢の候補集合の中から未計測部計測面積の最大化と計測品質の最大化の二つの項からなる重み付き和を評価し、最大の評価を持つ計測位置姿勢を最適計測位置姿勢として決定する。

また、提案した最適計測位置姿勢決定手法に対し、計測シミュレーション結果を用いてその有用性を検証した。検証の結果、提案手法は未計測部の面積の最小化と計測角度の最大化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。

第5章 結論と今後の課題

5.1 結論

本研究では、効率的かつ利用しやすいソリッドモデルの生成可能な鋳造品の新しいリバースエンジニアリング技術の確立を目的とした、鋳造品の計測データからのソリッドモデル生成手法、ならびに、鋳造品向けの最適計測位置姿勢の推定手法の開発を行った。本研究では、鋳造品のリバースエンジニアリングにおいて、鋳肌面と機械加工面の要求精度が異なるという観点に注目した新たな手法群を開発した。以下では、各章についてのまとめを述べる。

第2章では、従来のリバースエンジニアリングにおける曲面認識手法、ならびに工業製品の最適計測位置姿勢の推定手法に関する関連研究について述べ、本研究の位置づけならびに役割を示した。従来、利用目的や要求精度に応じ、各種の適した幾何処理を自動かつ選択的に適用することによるリバースエンジニアリング技術は存在せず、本技術の新規性、ならびに有用性を明らかにした。

第3章では、鋳肌面・機械加工面認識に基づく鋳造品の面属性付きソリッドモデルの生成手法を提案した。提案手法は大きく4つのプロセスからなり、それぞれ、鋳肌面・機械加工面分離、機械加工面認識、鋳肌面・機械加工面整形、面属性付きソリッドモデルの生成である。

- 鋳肌面・機械加工面の分離では、鋳造品の計測三角形メッシュに対し、スムージング前後の法線ベクトルの差分に基づき三角形粗さ値を推定する手法を提案し、さらに、推定した三角形粗さ値に対する閾値処理により計測三角形メッシュを鋳肌面と機械加工面に分離する手法を提案した。三角形粗さ値の推定手法は既存研究の曲げエネルギーに基づく手法とスムージング前後の曲率差分に基づく手法と比較を行い、本研究で提案した手法は既存手法と比較し、鋳肌面上で粗さ値が低く推定されにくい、機械加工面境界付近でも三角形粗さ値が高く推定されにくいという結果が観察でき、鋳造品の鋳肌面・機械加工面分離において有用であることを確認した。
- 機械加工面の認識では、計測三角形メッシュから分離された機械加工面から、各種の機械加工面を認識する手法を提案した。本研究では、平面、円筒面、ネジ

加工面，貫通穴，機械加工面間回転面状従属フィーチャを認識するアルゴリズムを開発した．実際の鋳造品の計測三角形メッシュへの適用を通して各種の機械加工面の認識手法の有効性を検証した．

- 鋳肌面・機械加工面の整形では，分離された鋳肌面と認識された機械加工面に対する二つの整形手法を提案した．計測三角形メッシュから分離された鋳肌面に対して，集合演算の際に隣接する機械加工面との交差を保証するために，鋳肌面メッシュ境界を整形する手法を提案した．提案手法を実際の鋳造品の計測三角形メッシュへ適用した結果，分離された鋳肌面メッシュ境界が隣接する機械加工面と交差する位置に整形できていることを確認した．また，認識された機械加工面に対して，平面の法線ベクトルと円筒面の軸ベクトルをガウス球に投影し，クラスタリングと主成分分析により鋳造品の直交する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整列する手法を提案した．提案手法を鋳造品の計測三角形メッシュに適用した結果，鋳造品に含まれる直交する支配的な軸を認識し，対応する法線ベクトル・軸ベクトルを持つ機械加工平面・円筒面を整列できることを確認した．
- 鋳造品の面属性付きソリッドモデルの生成では，分離された鋳肌面から生成したソリッドモデルと認識された機械加工面から生成したソリッドモデルとの集合演算により，機械加工面が整列された鋳造品の面属性付きソリッドモデルを生成する手法を提案した．提案手法により生成されたソリッドモデルは，従来手法により生成されたソリッドモデルとは異なり，表面が鋳肌面か機械加工面であるかが区別され，さらに，機械加工面は平面，円筒面，ネジ加工面，機械加工面間従属フィーチャである回転面といった面属性が付与されており，後工程においてその情報を利用することで従来の RE 手法により生成されるソリッドモデルよりも有用に活用できることが期待できる．

第 4 章では，鋳造品の高品質計測三角形メッシュモデルの取得のための，最適計測位置姿勢の推定手法を提案した．提案手法は大きく 3 つの処理からなる．

- 鋳肌面・機械加工面分離と機械加工面認識では，既計測の三角形メッシュに対し，3.2 節で提案した鋳肌面・機械加工面分離と 3.3 節で示した機械加工面認識手法を適用し，計測三角形メッシュからの鋳肌面・機械加工面の分離と機械加工面の認識を行った．

- 最適計測位置姿勢候補集合の算出では、分離された鋳肌面および認識された機械加工面それぞれから、未計測部の最小化と機械加工面の計測品質の最大化を実現する計測位置姿勢の候補集合を算出する。分離された鋳肌面からは境界エッジループに対するフィット平面に基づき未計測部の計測面積を最大化する計測位置姿勢を算出する。一方、機械加工面からは、認識された機械加工面の種類に基づき表面への計測角度が垂直となるような計測品質を最大化する計測位置姿勢を算出した。
- 最適計測位置姿勢の決定では、鋳肌面と機械加工面から算出された計測位置姿勢の候補集合の中から未計測部計測面積の最大化と計測品質の最大化の二つの項からなる重み付き和を評価し、最大の評価を持つ計測位置姿勢を最適計測位置姿勢として決定した。

提案した最適計測位置姿勢決定手法に対し、計測シミュレーション結果を用いてその有用性を検証した。検証の結果、提案手法は未計測部の計測面積の最小化と計測角度の最大化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。

5.2 今後の課題

本論文で提案した手法に対する今後の課題を以下に述べる。

- (1) 生成した面属性付きの鋳造品のソリッドモデルを生成したが、今後、このモデルを使用した複製や検査といった後工程での検証を行い、その有用性を確認する必要がある。
- (2) 最適計測値姿勢の候補の算出手法が離散的であり、必ずしも最適な候補を算出できる保証がない。今後、より高い計測率を得るために異なる計測位置姿勢の算出方法の実装を行う必要がある。
- (3) RE の現場で提案手法を用いるために、算出された最適計測位置姿勢を計測作業者に提示するシステムの開発を行う必要がある。

参考文献

- [1] Tsuchie, Shoichi, and Masatake Higashi. "Extraction of Surface-feature Lines on Meshes Using Normal Tensor Framework." *Computer-Aided Design and Applications* 11.2 (2014): 172-181.
- [2] Vieira, Miguel, and Kenji Shimada. "Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing." *Computer aided geometric design* 22.8 (2005): 771-792.
- [3] Schnabel, Ruwen, Roland Wahl, and Reinhard Klein. "Efficient RANSAC for point-cloud shape detection." *Computer graphics forum*.26.2. (2007): 1-12.
- [4] Yan, Dong-Ming, Yang Liu, and Wenping Wang. "Quadric surface extraction by variational shape approximation." *Geometric Modeling and Processing-GMP 2006*. Springer Berlin Heidelberg, (2006): 73-86.
- [5] Cohen-Steiner, David, Pierre Alliez, and Mathieu Desbrun. "Variational shape approximation." *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 23.3 (2004): 905-914.
- [6] Lloyd, Stuart. "Least squares quantization in PCM." *IEEE transactions on information theory* 28.2 (1982): 129-137.
- [7] Kosarevsky Sergey, and Viktor Latypov. "Development of an algorithm to detect screw threads in planar point clouds." *Measurement Science Review* 10.4 (2010): 136-141.
- [8] Sergey Kosarevsky, and Viktor Latypov. "Detection of screw threads in computed tomography 3D density fields." *Measurement Science Review* 13.6 (2013): 292-297.
- [9] 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." "精密工学会学術講演会講演論文集 2016 年度精密工学会秋季大会. 公益社団法人精密工学会, 2016.
- [10] Qi-Xing Huang, Simon Flöry, Natasha Gelfand, Michael Hofer, and Helmut Pottmann. "Reassembling fractured objects by geometric matching." *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 25.3 (2006): 569-578.
- [11] Lavoué, Guillaume. "A local roughness measure for 3D meshes and its application to visual masking." *ACM Transactions on Applied perception (TAP)* 5.4 (2009): 21.
- [12] Taubin, Gabriel. "A signal processing approach to fair surface design." *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM, (1995): 351-358.
- [13] Lai, P., C. Samson, and P. Bose. "Surface roughness of rock faces through the curvature of triangulated meshes." *Computers & Geosciences* 70 (2014): 229-237.
- [14] Kovács, István, Tamás Várady, and Péter Salvi. "Applying geometric constraints for

- perfecting CAD models in reverse engineering." *Graphical Models* 82 (2015): 44-57.
- [15] Kriegel, Simon, et al. "A surface-based next-best-view approach for automated 3D model completion of unknown objects." *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE (2011): 4869-4874.
- [16] Karaszewski, Maciej, Robert Sitnik, and Eryk Bunsch. "On-line, collision-free positioning of a scanner during fully automated three-dimensional measurement of cultural heritage objects." *Robotics and Autonomous Systems* 60.9 (2012): 1205-1219.
- [17] Shakarji, Craig M. "Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system." *Journal of Research-National Institute of Standards and Technology* 103 (1998): 633-641.
- [18] Besl, Paul J., N.D. McKay. "A Method for Registration of 3-D Shapes". *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14.2 (1992): 239-256.
- [19] 石畑清: 点の集合を包含する球, *情報処理*, 43, 9 (2002) 1009.
- [20] COMET 5 11M, <https://optotechnik.zeiss.com/en/products/3d-scanning/>, accessed 2018. 09.19.
- [21] Geomagic Studio 2012, <https://ja.3dsystems.com/software/>, accessed 2018. 09.19.
- [22] SolidWorks, <https://www.solidworks.com/ja>, accessed 2018. 12.25.
- [23] WorkNC, <http://www.worknc.jp/products>, accessed 2018. 12.25.
- [24] CATIA V5, <https://www.3ds.com/products-services/catia/>, accessed 2018. 09.19.
- [25] MeshLab, <http://www.meshlab.net/>, accessed 2018. 12.18.

謝辞

本論文は北海道大学大学院情報科学研究科 システム情報科学専攻 博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。論文執筆に当たり、多くの方々からのご指導、ご協力いただいたことに感謝の意を表します。

同専攻准教授の伊達宏昭先生には指導教官として、また、旭川高専専攻科在籍時のインターンシップから長きに渡りご指導いただきました。学会参加や国際会議、投稿論文といった多岐にわたり発表の機会を与えていただくことで、研究者として貴重な経験を積むことができました。ここの感謝の意を表します。

本論文の審査にあたり、同専攻教授の金井理先生、金子俊一先生には適切なご助言、ご指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。

本研究の実施にあたり、共同研究者である旭川工業高等専門学校 機械システム工学科教授の後藤孝行先生、北海道立総合研究機構 道立工業試験場の安田星季様から多くのご助言、試料の提供をいただきました。心より御礼申し上げます。

付録

A. 本研究で使用した三次元形状測定機の計測角度に対する精度の検証

A.1 COMET5 11M の計測精度の入射角依存性

図 A.1 に示すように、ターンテーブル上に平坦な面を配置し、その面の法線方向が COMET5 11M の計測カメラに対し垂直となるように配置した環境で、-70 度から 50 度まで 10 度刻みで平坦な面を傾け計測を行い、それぞれの傾きにおける計測データの平面度を算出することで COMET5 11M の計測精度の入射角依存性の調査を行った。

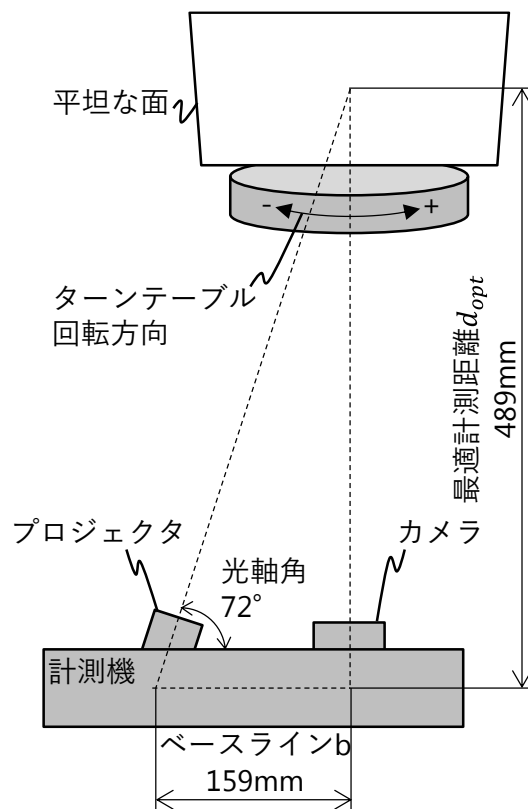


図 A.1 計測品質 Q の推移

図 A.2 に取得された計測データを示す。平面度の検証では、図 A.2(上)に示す計測データの中心部（-10 度のメッシュのみ中心部に計測抜けがあるため上部右側）である、直径約 70mm の範囲を切り出した図 A.2(下)のメッシュ（3 万～6 万三角形）を使用し

た.

図 A.3 に各計測角度の平面度（値が低いほど良好）を算出した結果を示す. なお, 本研究では平面度を図 A.4 に示すようにフィット平面に対する正と負方向のそれぞれの最遠点までの距離の和として定義し, 以下の手順で求めた.

1. メッシュに対して最小二乗平面を算出
2. 最小二乗平面に対する正の方向の最大距離と負の方向の最大距離の和を平面度として算出

図 A.3 の結果から-50 度から 30 度までの範囲では $100\mu\text{m}$ 以内の平面度, かつ $5\mu\text{m}$ 以内の標準偏差で計測可能であることがわかった. また, 40 度以上および-60 度以下の計測角度では計測三角形メッシュの端部が乱れ, 標準偏差が高くなる傾向が見られた.

以上の結果から, COMET5 11M により高精度に計測する場合, 計測物の表面に対して計測機のカメラの光軸が左右方向に-50~30 度以内の入射角となるように計測する必要が有ることがわかった.

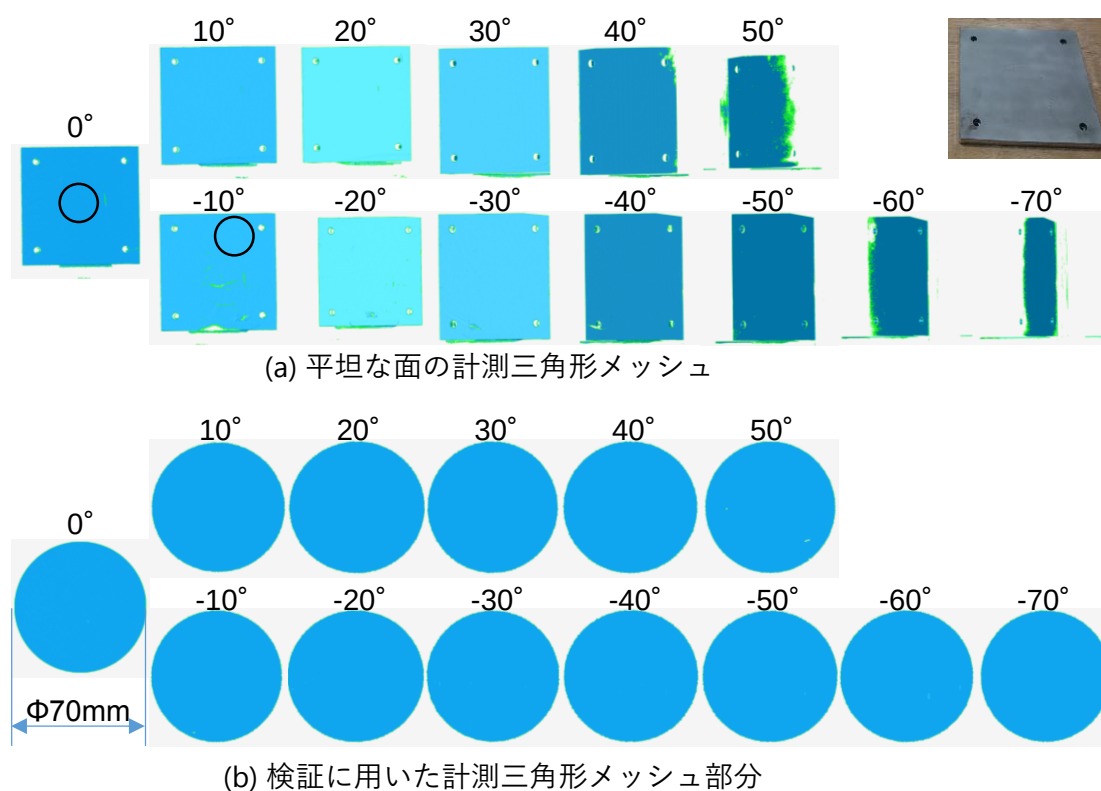


図 A.2 検証に使用した計測三角形メッシュ

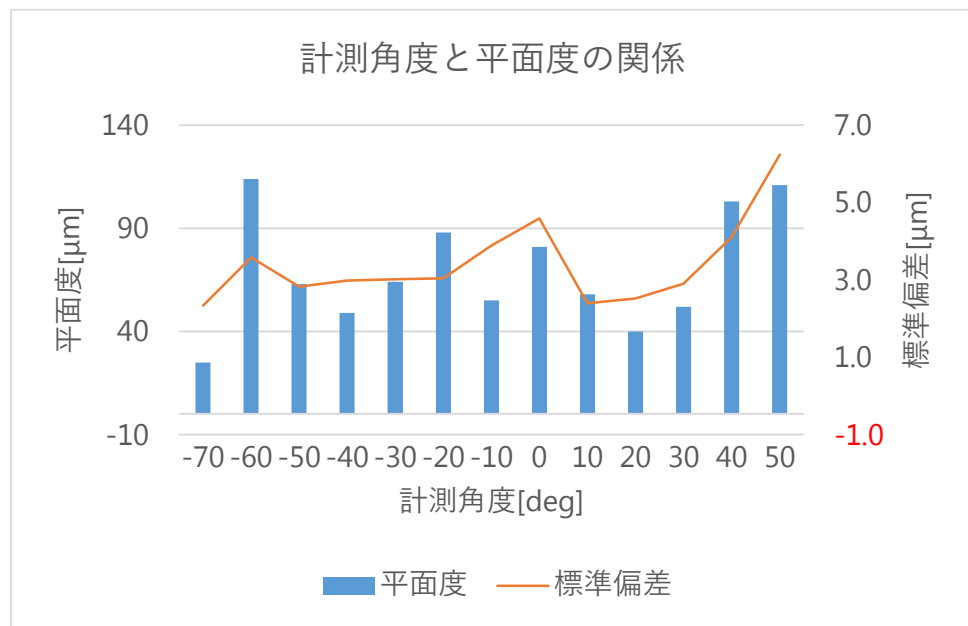


図 A.3 計測角度と平面度の関係

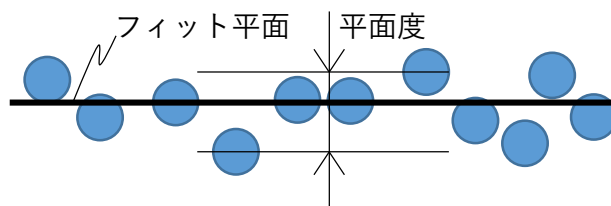


図 A.4 平面度の定義

A.2 COMET5 11M の計測角度閾値

COMET5 11M による計測ソフトウェアには計測点の計測角度に対する計測角度閾値 τ_θ を設定できる。そこで、 τ_θ が計測データに与える影響を調査するため、図 A.5 に示すドーム状の物体の計測三角形メッシュに対し、図 A.5 (a) の①～⑧の部分について最大計測角度を調査した。なお、遮蔽の生じやすい溝および穴周辺や外縁部では遮蔽されかつ計測点間距離が近いため、COMET5 11M の付属ソフトによって計測点群が三角形メッシュ化される際に、図 A.6 に示すように本来の面ではない箇所に三角形メッシュが生成される。そこで本調査では図 A.7 に示すように溝および穴周辺の三角形メッシュの除去、さらに外縁部のみを取り出した三角形メッシュに対して最大計測角度の計算を行った。また、座標軸に対する計測物の傾きは、高さ方向を Y 軸、奥行方向を Z 軸としたときに X 軸回りに約 1.629 度、Y 軸回りに約 0.003 度傾いていた。

表 A.1 に最大計測角度を算出した結果を示す。①および⑤の部分で計測角度閾値と最大計測角度が概ね一致していることがわかった。一方、プロジェクタ側に位置する

⑦の部分で計測角度閾値+約 10 度, カメラ側に位置する③の部分で計測角度閾値-約 10 度となることがわかった. これに対する考察として, 図 A.8 に示すように COMET5 ではカメラとプロジェクタ間の光軸の中間に位置する仮想測定軸を考え, この仮想測定軸に対する計測角度に対して閾値処理を適用しているのではないかと推測している.

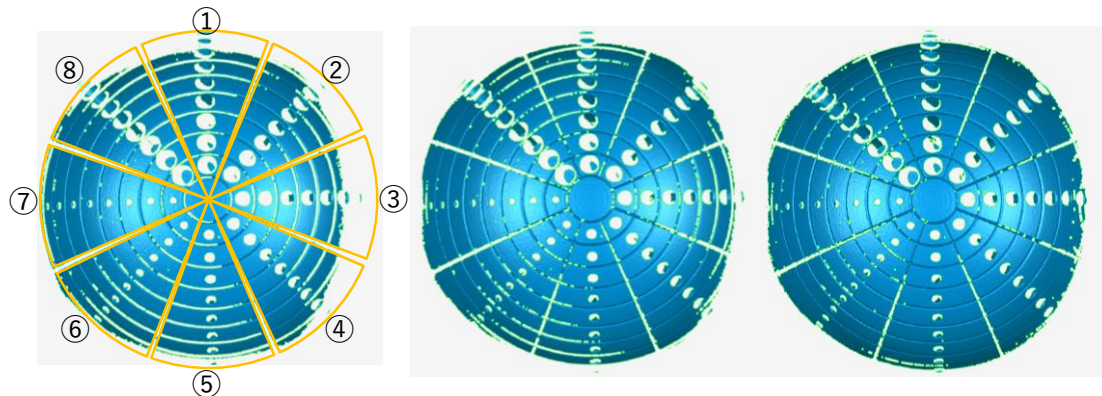


図 A.5 ドーム状の物体に対する計測結果

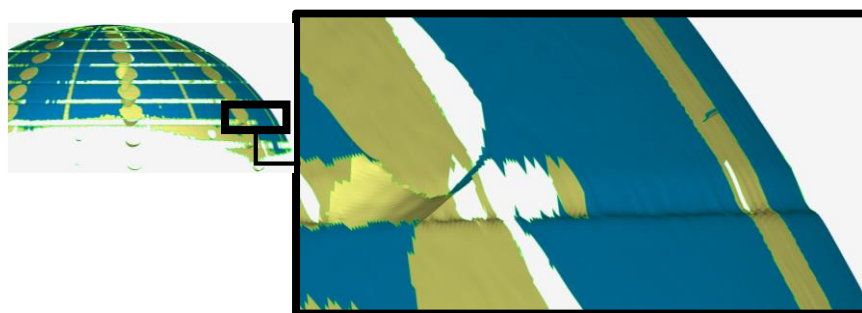


図 A.6 未計測部に生成される三角形メッシュ

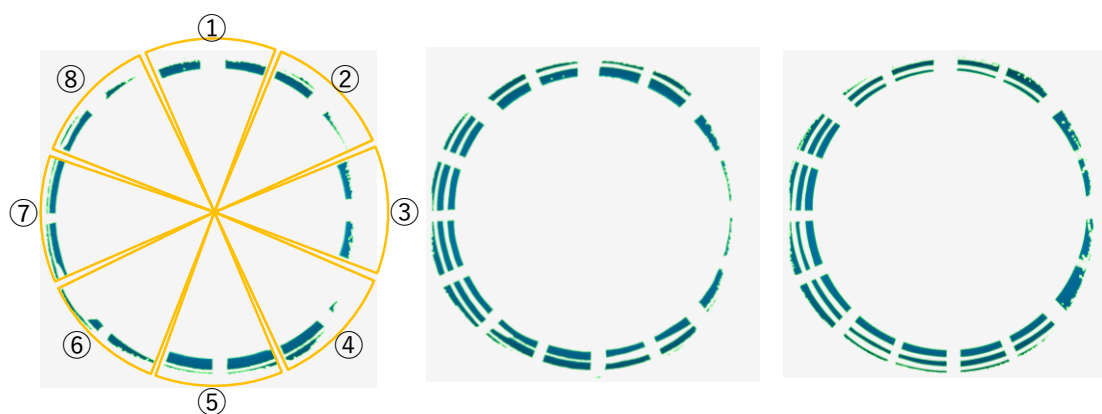


図 A.7 外縁部のみを取り出した計測三角形メッシュ

表 A.1 各部分の最大計測角度

計測角度 閾値 τ_θ [deg]	最大計測角度							
	①上	②右上	③右	④右下	⑤下	⑥左下	⑦左	⑧左上
60	61.403	63.899	51.283	63.684	61.686	72.848	71.008	73.253
65	66.27	67.445	57.413	68.027	68.027	77.028	76.054	76.164
70	71.091	72.122	62.178	70.161	70.567	78.826	78.485	79.633

B. 对外発表実績

1. 査読付学会誌等

- (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--計測三角形メッシュからの鋳肌面と機械加工面の分離-, 精密工学会誌, 83, 5, pp.474-480, 2017.
- (2) 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--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-, 精密工学会誌, (掲載決定)

2. 査読付国際会議プロシーディング

- (1) Urata, H.Date, S.Kanai, T.Gotoh, S.Yasuda, Generation Of Solid Models With Surface Properties From Scanned Triangular Meshes Of Castings,CAD Conference and Exhibition (CAD'18), pp.342-346, Paris, 2018 年 7 月.
- (2) Urata, H.Date, S.Kanai, T.Gotoh, S.Yasuda, Surface extraction based on roughness for rapid reverse engineering of castings, Asian Conference on Design and Digital Engineering 2015, 40, Kitakyushu, 2015 年 11 月.

3. 論文 (その他)

- (1) Urata, H.Date, S.Kanai, T.Gotoh, S.Yasuda, Rapid reverse engineering of castings based on separation of casting and machining surfaces, Asia Design Engineering Workshop 2016 (A-DEWS 2016),pp.132-141, Osaka, 2016 年 12 月.

4. 講演 (学位論文関係)

- (1) 浦田昇尚, 伊達宏昭, 金井理, 後藤孝行, 安田星季, 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--, 2018 年度精密工学会北海道支部学術講演会, C-12, 北海道江別市, 2018 年 10 月.
- (2) 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 -計測シミュレーションに基づく鋳造品の最適計測姿勢推定手法の有用性評価 -, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 1P(T)55, 北海道函館市, 2018 年 9 月.
- (3) 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 - 高品質 CAD モデル生成のための最適計測姿勢推定 -,

2018 年度精密工学会春季大会学術講演会, B74, 東京都文京区, 2018 年 3 月.

- (4) 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 - 機械加工面間の微小フィーチャー認識と CAD モデル生成 -, 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会, F35, 大阪府吹田市, 2017 年 9 月.
- (5) 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のための機械加工面間の回転面状従属フィーチャー認識と CAD モデル生成, 2017 年度精密工学会北海道支部学術講演会, C-03, 北海道札幌市, 2017 年 9 月.
- (6) Urata, H.Date, S.Kanai, T.Gotoh, S.Yasuda, Rapid reverse engineering of castings based on separation of casting and machining surfaces, Asia Design Engineering Workshop 2016, 25, Osaka, 2016 年 12 月.
- (7) 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- 計測メッシュからの計測困難な貫通穴の推定 -, 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会, I61, 茨城県水戸市, 2016 年 9 月.
- (8) 浦田昇尚, 伊達宏昭, 金井理, 後藤孝行, 安田星季, 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, 2016 年度精密工学会北海道支部学術講演会, B-08, 北海道旭川市, 2016 年 8 月.
- (9) 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 - 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, C63, 千葉県野田市, 2016 年 3 月.
- (10) 浦田昇尚, 伊達宏昭, 金井理, 後藤孝行, 安田星季, 鋳肌面・機械加工面分離に基づく鋳造品の迅速リバースエンジニアリングに関する研究, 日本設計工学会 2015 年度秋季大会研究発表講演会, A12, 北海道札幌市, 2015 年 10 月.
- (11) 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 - ネジ加工領域の検出とそのパラメータ抽出 -, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, A32, 宮城県仙台市, 2015 年 9 月.
- (12) 浦田昇尚, 伊達宏昭, 金井理, 後藤孝行, 安田星季, 鋳造品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ネジ加工領域の認識, 2015 年度精密工学会北海道支部学術講演会, C-05, 北海道千歳市, 2015 年 8 月.
- (13) 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

ニアリングに関する研究 - 面粗さ推定法と鋳肌面分離性能の改善 -, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会, H02, 東京都文京区, 2015 年 3 月.

(14) 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 - 機械加工円筒面抽出処理の高速化 -, 2014 年度精密工学会北海道支部学術講演会, C-P45, 北海道札幌市, 2014 年 8 月.

(15) 浦田昇尚, 後藤孝行, 伊達宏昭, 金井理, 安田星季, 三次元メッシュデータからの幾何形状情報抽出に関する研究, 2013 年度精密工学会北海道支部学術講演会, A-15, 北海道北見市, 2013 年 8 月.