

東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻

平成 29 年度
修士論文

レーザーキャナと空間型 AR を用いた
曲がり外板の加熱加工指示システムの開発

2018 年 2 月 8 日提出

指導教員 稗方 和夫 准教授 印

学生証番号 47-166685

岡田 航太

目次

目次.....	I
図目次.....	VI
表目次.....	X
第1章 序論.....	1
1.1 背景.....	2
1.2 本研究の目的.....	4
1.3 論文の構成.....	5
第2章 関連研究.....	7
2.1 はじめに.....	8
2.2 非接触3次元計測技術とその活用.....	8
2.2.1 トータルステーション.....	8
2.2.2 ステレオ視による計測技術.....	9
2.2.3 レーザスキャナ.....	9
2.3 曲がり外板の加工工程の高度化に関する取り組み.....	10
2.3.1 工作精度の評価に関する研究.....	10
2.3.2 木型のバーチャル化に関する研究.....	11
2.3.3 曲率線展開法.....	12
2.3.4 全自動化に関する研究.....	13
2.4 AUGMENTED REALITY.....	15
2.4.1 ARとVR.....	15
2.4.2 ARの活用・研究事例.....	16
2.5 本研究の位置づけ.....	18
第3章 要素技術.....	21
3.1 はじめに.....	22
3.2 曲面の基本理論.....	22

3.2.1 曲面と法曲率	22
3.2.2 NURBS による曲線・曲面の表現	23
3.2.3 NURBS 曲面への点の投影	23
3.2.4 任意方向の法曲率の導出	24
3.3 点群処理技術	25
3.3.1 レーザスキャナと点群データ	25
3.3.2 主成分分析による平面フィッティングと法線ベクトルの算出	27
3.3.3 領域成長法	28
3.3.4 ICP アルゴリズムを用いた点群と曲面の位置合わせ	29
3.3.5 本研究における位置合わせ処理	30
3.3.6 重み付き最小二乗法による曲線フィッティング	32
3.3.7 大規模点群処理プラットフォーム「Pupulpit」	34
3.4 空間型 AR	35
3.4.1 透視カメラ	36
3.4.2 プロジェクタのキャリブレーション	39
3.4.3 投影映像の生成	40
3.4.4 OpenCV	40
第 4 章 提案する加熱加工指示システム	42
4.1 はじめに	43
4.2 システムのコンセプト	43
4.3 システムを構成するエンジン	44
4.3.1 加熱指示生成エンジン	44
4.3.2 指示投影エンジン	44
4.4 システムの実装	45
4.4.1 ハードウェア	45
4.4.2 ソフトウェア	48
第 5 章 加熱指示生成エンジンの開発	50
5.1 はじめに	51
5.2 加熱指示生成のアプローチ	51
5.3 概要	51

5.4 加熱指示生成プロセス.....	52
5.4.1 外板点群の抽出と位置合わせ.....	54
5.4.2 複数方向の計測法曲率の算出.....	55
5.4.3 所要収縮量を指標とした加熱指示情報の生成.....	59
5.4.4 可視化と出力.....	61
5.5 開発したソフトウェア.....	63
5.5.1 フォルダ構成.....	63
5.5.2 データの読み込み.....	64
5.5.3 開発したプラグインによる解析と可視化.....	65
第6章 指示投影エンジンの開発.....	70
6.1 はじめに.....	71
6.2 概要.....	71
6.3 エンジンの機能.....	72
6.3.1 プロジェクタのキャリブレーション.....	72
6.3.2 投影画像の生成と投影.....	72
6.4 開発したソフトウェア.....	73
6.4.1 フォルダ構成.....	73
6.4.2 各機能の実行.....	74
第7章 実験によるシステムの検証と評価.....	77
7.1 はじめに.....	78
7.2 テストデータを用いた法曲率算出の精度の検証.....	78
7.2.1 目的.....	78
7.2.2 レーザスキャナ・シミュレータ.....	78
7.2.3 検証方法.....	79
7.2.4 結果.....	82
7.3 実環境における法曲率算出の実用性の評価.....	84
7.3.1 目的.....	84
7.3.2 実験環境.....	85
7.3.3 実験方法.....	89
7.3.4 結果と評価.....	93

7.4 加熱指示生成エンジンの実現可能性の評価	95
7.4.1 目的	95
7.4.2 実験環境	96
7.4.3 実験方法	96
7.4.4 結果と評価	97
7.5 指示投影エンジンを用いた加熱指示実験	102
7.5.1 目的	102
7.5.2 プロトタイピング	102
7.5.3 実験方法	107
7.5.4 結果	112
7.6 まとめ	113
第8章 考察	115
8.1 はじめに	116
8.2 加熱指示生成エンジンに関する考察	116
8.2.1 7.3 で取得したデータへの加熱指示生成エンジンの適用	116
8.2.2 生成する加熱指示の課題	117
8.2.3 高度な加熱指示への拡張について	118
8.2.4 外部応力の影響の検討	119
8.2.5 レーザスキャナの変数の設定について	121
8.3 指示投影エンジンの精度と範囲に関する考察	123
第9章 結論	124
9.1 結論	125
9.2 今後の展望	126
9.2.1 加熱指示の高度化	126
9.2.2 造船所での実用を考慮したシステムの再設計	126
謝辞	127
参考文献	131
APPENDIX	136
A. 外板加工工程について	136

B.	キャリブレーション用のソフトウェアについて	138
----	-----------------------------	-----

図目次

図 1-1	船舶の曲がり外板[2].....	2
図 1-2	ぎょう鉄の加工工程の繰り返しフロー	3
図 2-1	トータルステーションの例[9].....	9
図 2-2	設備の再構成の様子[15]	10
図 2-3	曲がり外板の精度評価システム[6].....	11
図 2-4	工場へ導入された精度評価システムのレイアウト[17]	11
図 2-5	バーチャル木型のインタフェース[7]	12
図 2-6	曲率線展開法に基づく外板加工プロセス[19].....	13
図 2-7	IHIMU – α の稼働の様子（左）と加熱方案算出フロー（右） [20].....	14
図 2-8	Park らの開発した自動加熱加工システム[22].....	15
図 2-9	松尾らによるアプリケーションのデモンストレーション[24].....	16
図 2-10	3次元モデル AR を用いた保守点検作業支援技術[25]	17
図 2-11	システムの構成（左）と作業指示のデモンストレーション（右） [26]	18
図 2-12	開発フェーズと TRLs の関連性のイメージ[31].....	19
図 3-1	曲面上の点における法平面と法断面の例.....	22
図 3-2	曲面への点の投影	24
図 3-3	レーザスキャナの計測における座標系	26
図 3-4	点群データの形式	27
図 3-5	平面フィッティングと法線ベクトル.....	28
図 3-6	領域成長法による領域探索[6].....	29
図 3-7	位置合わせの流れ	31
図 3-8	位置合わせの結果が本来の結果と反転するケース.....	32
図 3-9	重み付き最小二乗法による曲線フィッティングの例	33
図 3-10	Pupulpit の基本的なユーザインタフェース	34
図 3-11	プラグインの実行	35
図 3-12	透視投影	36
図 4-1	加熱加工指示システムのコンセプト	43
図 4-2	本システムが導入される作業場を表した見取り図.....	46

図 4-3	蜂の巣定盤（左）と固定用の枕木（右）のイメージ	46
図 4-4	クレーンによる外板の反転作業の様子	47
図 4-5	本システムのハードウェアの構成	47
図 4-6	本システムのソフトウェアの構成	49
図 5-1	加熱指示生成エンジンの概要図	52
図 5-2	読み込みを行った設計データの例	53
図 5-3	計測データ（上）と外板点群の抽出（下）	54
図 5-4	位置合わせの様子	55
図 5-5	複数方向の計測法曲率の算出のコンセプト	56
図 5-6	複数方向の計測法曲率の算出フロー	56
図 5-7	加熱指示情報の生成フロー	60
図 5-8	加熱指示情報の生成の概略図	61
図 5-9	加熱指示情報の点群への変換	62
図 5-10	3次元ビューワ上での加熱指示線の可視化	63
図 5-11	加熱指示生成エンジン：ソフトウェアのフォルダ構成	64
図 5-12	入力データの選択と読み込み	65
図 5-13	データの選択と設計法曲率の算出の実行	66
図 5-14	シード点の選択とプラグインの実行	66
図 5-15	データ入力とパラメータ設定	67
図 5-16	解析結果のデータ構造	68
図 5-17	加熱指示の生成用ウィンドウ	68
図 5-18	加熱指示情報の保存形式	69
図 5-19	指示投影エンジンに入力するためのデータ変換を行うウィンドウ	69
図 6-1	指示投影エンジンの概要図	71
図 6-2	指示投影エンジンを用いた投影の例[43]	73
図 6-3	指示投影エンジン：ソフトウェアのフォルダ構成	74
図 6-4	指示投影エンジンのソフトウェア概要	75
図 6-5	指示投影エンジンの実行用ウィンドウ	75
図 7-1	レーザスキャナ・シミュレータ	79
図 7-2	使用した円筒モデルとスキャナの関係	80
図 7-3	評価対象の点群	81

図 7-4	生成した計測データ(D)	83
図 7-5	各条件の誤差の箱ひげ図.....	84
図 7-6	第 1 回の現場適用実験にて用いた部材 T.....	86
図 7-7	部材 T の展開図	86
図 7-8	設計曲面データ	87
図 7-9	評価対象の点群.....	87
図 7-10	各機材の配置図.....	88
図 7-11	実験のフロー	89
図 7-12	プレス加工時のプレス線 (緑色)	91
図 7-13	木型を並べた状態での枕木の調整	92
図 7-14	作業員によるフレーム線の形状評価の様子.....	92
図 7-15	【加工前】作業員によるフレーム線の形状評価の結果.....	93
図 7-16	作業員による 1 本の線状加熱のログ.....	94
図 7-17	フレーム線 A 上の評価点における加工前後の法曲率の変化.....	95
図 7-18	巻き尺と分度器を用いた加熱線のマーキングの様子.....	97
図 7-19	精度評価カラーマップ上に可視化された加熱指示線	98
図 7-20	裏側から加熱を行う様子.....	99
図 7-21	加熱箇所における全 12 方向の所要収縮量の変化	100
図 7-22	加熱前後の精度評価カラーマップの変化.....	101
図 7-23	作成したプロトタイプ	104
図 7-24	使用した CFRP 製の外板の模型.....	104
図 7-25	外板模型の上にマーカが設置された様子	106
図 7-26	十字映像を投影しキャリブレーションを行う様子.....	106
図 7-27	デモンストレーションにて投影を行ったカラーマップ.....	107
図 7-28	外板模型上に生成した 3 本のフレーム線と名称.....	109
図 7-29	3 本のフレーム線上の「加熱箇所の点群」の読み込み	109
図 7-30	生成する加熱指示の例.....	110
図 7-31	生成した加熱指示線の投影映像の例.....	110
図 7-32	加熱指示実験のフロー	111
図 7-33	被験者が投影された映像を見てマーキングを行う様子とその結果....	112
図 7-34	各セットでマーキング作業に要した時間の比較	113

図 8-1	生成された加熱指示線の様子	117
図 8-2	色や文字情報の付与による情報提示のイメージ	119
図 8-3	生成された加熱指示線と検討箇所	120
図 8-4	検討箇所周辺の計測データ	120
図 8-5	検討箇所の部材と枕木の関係	121
図 8-6	位置関係の変動による計測データの変化.....	122
図 8-7	投影位置に誤差が発生するケース	123
図 9-1	プレス機によるプレスの様子	136
図 9-2	ぎょう鉄による変形のメカニズム	137
図 9-3	加熱方法の種類.....	138
図 9-4	データの読み込み	140
図 9-5	マーカー周辺のクリッピング	140
図 9-6	重心の抽出.....	141

表目次

表 2-1 各プロセスに対する既存のアプローチと TRL による評価	19
表 4-1 本システムを構成するエンジン	44
表 7-1 円筒モデルの変数	80
表 7-2 シミュレータの設計変数の組み合わせ	81
表 7-3 曲率算出時に設定した変数の値	81
表 7-4 実験に使用した計算機の仕様	82
表 7-5 計算された各条件の誤差の統計量	83
表 7-6 使用したレーザスキャナの仕様	88
表 7-7 計測条件	89
表 7-8 設定した変数の値	91
表 7-9 設定した変数の値	96
表 7-10 作業員に伝達した加熱指示の情報	99
表 7-11 使用したプロジェクタの仕様	103
表 7-12 2 標本検定の結果	113

第1章 序論

1.1 背景.....	2
1.2 本研究の目的.....	4
1.3 論文の構成	5

1.1 背景

船舶の外殻を構成する分厚く 3 次元的な曲面を持つ鉄板は曲がり外板と呼ばれ、その加工精度は船の流体力学的性能を左右する。外板の形状は一律ではないため、連続的な加工工程による成形を行うことは難しい。従ってプレス機などを用いた冷間曲げで大まかな形状を形作った上で、「ガスバーナーによる加熱と水による冷却を組み合わせた成形作業を複数回繰り返すことで設計形状に近づける加工工程」を必要とする[1]。この作業は「ぎょう鉄」と呼ばれ、造船工程の中でも特殊な作業として位置づけられている。



図 1-1 船舶の曲がり外板[2]

ぎょう鉄による加工工程は図 1-2 のように「形状評価」、「方案決定」、「加熱成形」の 3 つの作業の繰り返しの工程と捉えられる。まず作業員は“木型”と呼ばれる木製の曲げ型を外板のフレーム線上に設置する。そしてすき間や曲率のずれ、凹凸などの工作指標を目視確認し、外板の全体形状の評価を行う(形状評価)。続いて目標形状を考慮しつつ、形状評価の結果を総合的に検討することで追加の加熱方案を決定する(方案決定)。その加熱方案に基づき、入熱量を調整しながら加熱により外板を変形させる(加熱成形)。

このぎょう鉄の各プロセスはいずれも定性的で曖昧な尺度を基準に行われるため、経験や暗黙知に頼るところが大きい。そのため作業内容(手順・精度・品質・実作業時間など)に個人差があり、管理が難しい。また高度なスキルを持つ職人の高齢化に伴い、技能の伝承ならびに後継者育成も課題となっている[3]。



図 1-2 ぎょう鉄の加工工程の繰り返しフロー

以上のような現状を踏まえ、高品質な外板の安定的な製造を保つべく、外板加工に関する「技能の自動化・技術化」の取り組みが行われてきている[4].

その例として、IHIMU - α に代表される「大型設備による加熱加工を前提とした全自動化システムの開発」がある[5]. 全自動化システムは、前述の3つのプロセスを機械化により完全代替することに焦点を当てているが、予測できない変形に対する手直しが必要な場合が多く、対象とする形状にも制限がある。またシステムの導入から運用に要するコストが膨大である点も課題である。

一方で作業員による加工作業を前提とした事例として、レーザスキャナと呼ばれる3次元計測機器を活用したものがある。レーザスキャナは手軽な大きさである上に、近年は計測の

精度やスピードが飛躍的に向上しており、低価格化も進んでいることから、現場への導入受容性が比較的高い。代表的な事例としては、精度評価システムの開発[6]や木型のバーチャル化[7]が挙げられる。これらは加工途中の外板の形状を任意のタイミングで高精度に取得できるレーザスキャナの特性を生かし、工作指標を定量化しフィードバックすることで「形状評価」と「方案決定」を支援することを志向した研究である。しかしいずれの手法も明示的な加熱方案を提示するわけではなく、「方案決定」のプロセスは依然として作業員に委ねられるため、属人的なままである。以上より、レーザスキャナの活用による更なる技術化を発展させ、工程から属人性を排除するためには、加工途中の外板の形状から計算機上でシステムティックに「方案決定」を行い、加熱指示をする手法を確立することが求められる。

また作業員に指示が伝達される際には、任意の箇所と方向に加熱線の情報が提示されることが想定される。しかし特徴点が少なく規模の大きな外板上で作業員が該当箇所を特定するためには、巻き尺を用いたり事前にマーキング線を引くなどの一定の手間が生じる。従って「方案決定」を計算機が担う場合、作業員に対して伝わりやすく手間のかからない手段で情報伝達が行われることが重要である。

1.2 本研究の目的

本研究の目的は、レーザスキャナと空間型 AR を用いた曲がり外板の加熱加工指示システムの開発である。具体的には、計測した加工途中の曲がり外板の 3 次元形状と設計データを用いて加熱指示を生成し、プロジェクトから外板上に指示映像を投影することで、作業員に加工指示を行うシステムである。

本研究ではシステム全体の構想を提案した上で、システムを(1)加熱指示生成エンジンと(2)指示投影エンジンに分けて開発し、それぞれを検証実験により評価する。具体的な取り組みを以下に述べる。

加熱指示生成エンジンの開発と評価

レーザスキャナで計測した外板の任意点における複数方向の法曲率を算出し設計データと比較することで、曲率の誤差が大きい箇所を修正する加熱指示を生成するエンジンを開発する。また提案したエンジンを実装し、以下のように評価する。

-
- ▶ テストデータを用いた法曲率算出の精度の検証
レーザスキャナによる計測の誤差が、加熱指示生成エンジンを用いた法曲率算出の精度に与える影響を、テストデータを用いて検証する。

 - ▶ 実環境における法曲率算出の実用性の評価
造船所の現場で取得した計測データを用いて、加熱指示生成エンジンを用いた法曲率算出の実用性を評価する。

 - ▶ 加熱指示生成エンジンの実現可能性の評価
造船所にて加工途中の外板に対して加熱指示生成エンジンを適用し、出力した加熱指示に従って加工を行う実験を行うことで、実現可能性を評価する。
- 🌈 指示投影エンジンの開発と評価
- 空間型 AR の技術を用いて、プロジェクタから外板の特定箇所に加熱指示を映し出すエンジンを開発し、必要な設備と合わせてプロトタイピングを行う。そして外板の模型を用いて加熱指示プロセスを模擬した実験を実施することで、情報投影による加熱指示の有用性を評価する。

1.3 論文の構成

本論文の構成を以下に述べる。

第 1 章では、背景と目的を述べた。

第 2 章では、曲がり外板の高度化に関する研究事例の紹介を中心に、関連研究を網羅的に説明し、最後に本研究の位置づけを述べる。

第 3 章では、本研究で用いる要素技術について説明する。

第 4 章では、提案する曲がり外板の加熱加工指示システムの構想を述べる。

第 5 章では、開発した加熱指示生成エンジンについて述べる。

第 6 章では、開発した指示投影エンジンについて述べる。

第 7 章では、実施した検証実験の説明を行う。

第 8 章では、開発を行ったシステムについて考察を行う。

第 9 章では, 本研究の結論を述べる.
論文の末尾には, Appendix を設けている.

第2章 関連研究

2.1 はじめに.....	8
2.2 非接触 3次元計測技術とその活用.....	8
2.2.1 トータルステーション.....	8
2.2.2 ステレオ視による計測技術.....	9
2.2.3 レーザスキャナ.....	9
2.3 曲がり外板の加工工程の高度化に関する取り組み.....	10
2.3.1 工作精度の評価に関する研究.....	10
2.3.2 木型のバーチャル化に関する研究.....	11
2.3.3 曲率線展開法.....	12
2.3.4 全自動化に関する研究.....	13
2.4 AUGMENTED REALITY.....	15
2.4.1 AR と VR.....	15
2.4.2 AR の活用・研究事例.....	16
2.5 本研究の位置づけ.....	18

2.1 はじめに

本章では関連研究について説明する。まずはじめに非接触 3 次元計測技術の産業活用事例について概観する。続いて、本研究の主題となる曲がり外板の加工工程の高度化に関する事例を紹介する。そしてコンピュータ・グラフィックスを用いた映像表現手法である AR (Augmented Reality: 拡張現実感) について、様々な領域への活用事例を踏まえつつ説明する。最後に関連研究を再度整理した上で、本研究の位置づけを述べる。

2.2 非接触 3 次元計測技術とその活用

近年、市場には多様な 3 次元計測機器が出回っており、目的に応じて選べる機種の幅が広がっている[8]。3 次元計測機器は計測方法や機器の形状で呼称や分類方法が異なる。3 次元計測機が導入された当初は、据え置き型の接触型の計測機が主流であった。接触型の計測機は一般的に計測の精度が非常に高いという利点があるが、導入コストが高い、対象物を計測範囲に運搬する必要がある、計測対象物のサイズ制限があるなどの課題がある。

その課題を解決するべく開発されたものが、非接触型かつポータブルな 3 次元計測機である。非接触型の機器は、計測の範囲や速度が接触型のものに比べて優れていることが知られており、建築業や造船業など屋外で大規模な対象物を扱う産業や計測主体が移動するロボット産業などでは非接触型のものが採用される傾向にある。以上を踏まえ、以下に主要な非接触型 3 次元計測機器とその活用例の紹介を行う。

2.2.1 トータルステーション

トータルステーションとは、測定対象の点に向けてレーザを照射し距離を測定するレーザ測距機器である。トータルステーションの 1 つである SOKKIA 社の 3D Station NET1AXII を図 2-1 に示す[9]。トータルステーションの特徴としては、3 次元計測機器の中でも特に計測の精度が高いことが挙げられる。一方で計測は 1 点ずつ実施するため、対象物の表面の情報を連続的に取得するには不向きである。トータルステーションを活用した研究事例としては、建築構造物の施工管理システムの開発[10]や船殻ブロックの精度の計測に関する研究[11]がある。



図 2-1 トータルステーションの例[9]

2.2.2 ステレオ視による計測技術

ステレオ視 (Stereo Method) とは、対象物を複数の視点から撮影した画像を用い、3 角測量の原理によりシーン中の各点までの距離を撮影する技術を活用した技術である。ステレオ視は非接触かつ受動的に距離計測が可能であるため、移動ロボットにおける 3 次元視覚センサや 3 次元シーンのモデリングにおける入力部として期待される技術である[12]。その歴史は古く、これまでも様々な研究が行われてきた。例えば、車載ステレオカメラで撮影された画像から 3D 地表サーフェスマップを生成する手法[13]や複数の顔の表情や細かい指の動作、そして胴体や腕などの大きな動作を同時にキャプチャするモデリング手法に関する研究がある[14]。画像を用いた計測は、同時計測および広い範囲の計測が可能である上に色情報を用いた対象物の識別が行える点などの利点がある。

2.2.3 レーザスキャナ

レーザスキャナとは、計測対象物に向かってレーザを照射し、反射光から対象物の 3 次元位置を特定する計測機器である。レーザスキャナの計測原理および取得されるデータ形式に関しては 3.3.1 で述べる。レーザスキャナはトータルステーションと比べて一度に大量の点を取得することができるため、高密度な計測により対象物の正確な形状を取得することに向いている。松岡らは工場やプラントなどの生産設備の 3 次元計測ならびにモデル化を目的とし、レーザスキャナにより取得した配管系統の単一の計測データからパイプ、エルボ、ティー、

フランジの形状モデルを生成し再構成する手法を提案した[15]. 手法による配管の再構成の例を図 2-2 に示す. そして続く第 2 報では複数地点から計測したデータを統合することで, より信頼性を高める取り組みを行った[16].

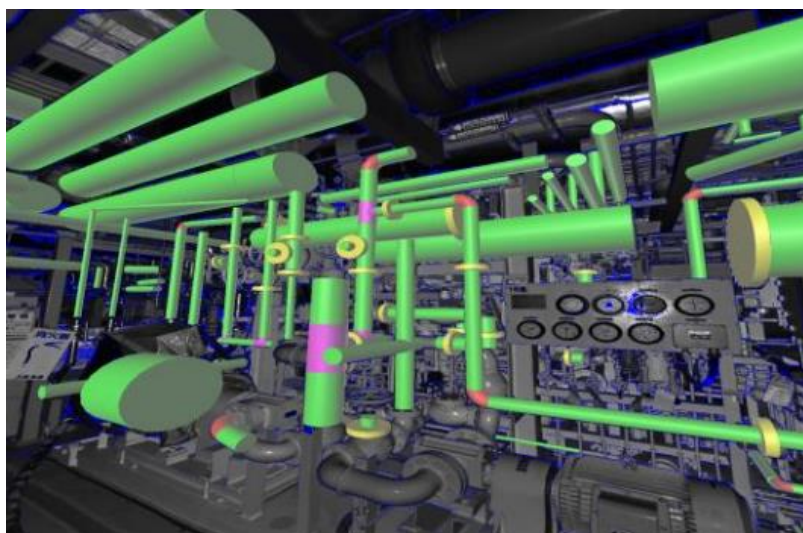


図 2-2 設備の再構成の様子[15]

2.3 曲がり外板の加工工程の高度化に関する取り組み

2.3.1 工作精度の評価に関する研究

稗方らは, 2.2.3 で述べたレーザスキャナを用いた曲がり外板の精度評価システムの開発を行った[6]. その概要図を図 2-3 に示す. このシステムはレーザスキャナで計測された外板の 3 次元データを設計データと重ね合わせ, その距離誤差を工作精度と定義することで, 外板の工作精度誤差を定量的に評価しカラーマップやヒストグラムで可視化を行うものである. 従来は作業員が局所的に木型をあてがい目視確認によって行っていた外板の面全体の形状評価プロセスを, システム上で行う事が可能になった.

またこのシステムは中垣らによって図 2-4 に示すようなレイアウトで実際の現場に導入されており, 加工作業中にも任意のタイミングで評価を行える環境が構築された[17].

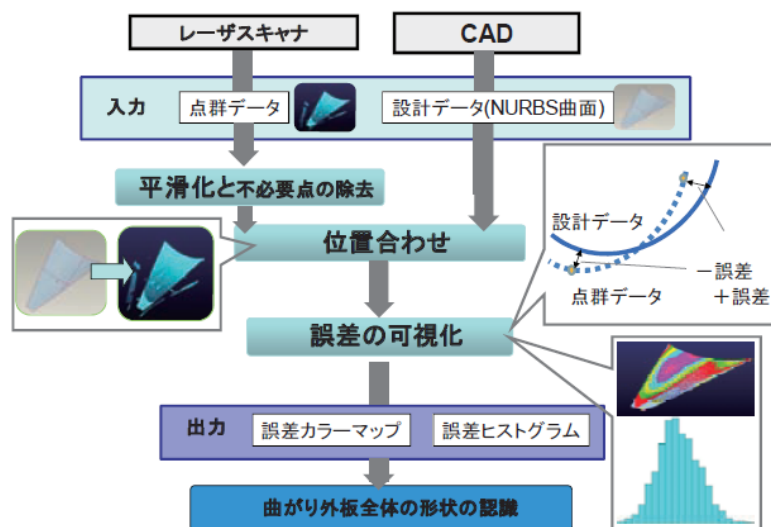


図 2-3 曲がり外板の精度評価システム[6]

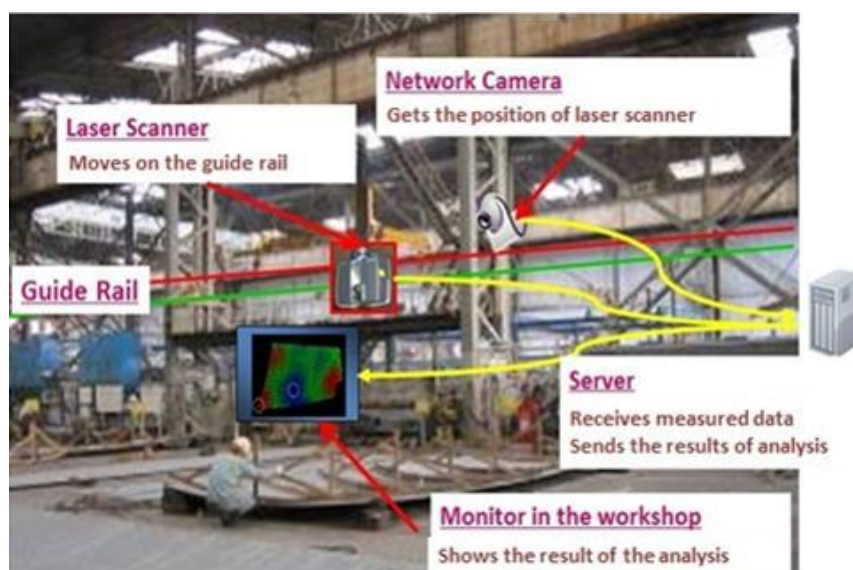


図 2-4 工場へ導入された精度評価システムのレイアウト[17]

2.3.2 木型のバーチャル化に関する研究

ソナらは木型を用いた現行のプロセスのバーチャル化による定量的な工作指標の評価を目的とし、バーチャル木型を用いた曲がり外板加工方案生成システムの開発を行った[7]。システムは図 2-5 に示すように、専用のインタフェース上に設計データをもとにバーチャル木型を生成し、レーザーキャナを用いて取得した外板の 3 次元データのフレーム線上に位置合

わせが行われる。そして木型間の角度や板とのずれ具合を定量化して表示し、ユーザーがバーチャル木型を操作し検討する事で、現行のプロセスをバーチャル環境で再現することが出来る。ソんらは実際の現場で試験的な導入を行い、複数枚の外板を加工することで加工方案生成手法の妥当性とバーチャル環境の有効性を確認した。またこのシステムを活用し、Ripple Down Rules を用いた曲がり外板の暗黙知の抽出と記述に関する取り組みも行われている[18]。

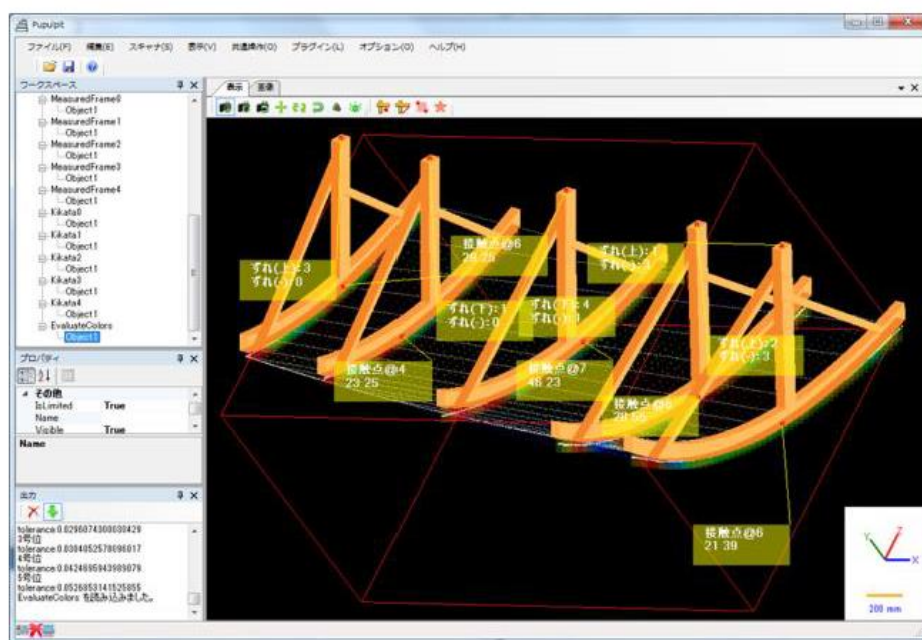


図 2-5 バーチャル木型のインターフェース[7]

2.3.3 曲率線展開法

松尾らはぎょう鉄加工の効率化および作業標準化への取り組みとして、ぎょう鉄に最適な外板現図展開手法の研究開発を行った[19]。これは外板曲面上の曲率線を計算し、その曲率線を展開基線とする新しい展開手法である。曲率線とは、曲面上の最大曲率と最小曲率の方向(主方向)をそれぞれ連続して追っていった2組の互いに直交する曲面上曲線である。図 2-6 に示した外板上の実線(CL2)が最小曲率の方向の曲率線、点線(CL1)が最大曲率の方向の曲率線を表す。

展開した平面には目的曲面の曲率線格子を写したものがマーキングされ、実際に作業を行う際の施工線となる。具体的には、図 2-6 に示すように最大曲率方向に直交する第2曲率

線(CL2)に沿ってプレス加工を行い, 最小曲率方向に直交する第 1 曲率線(CL1)に沿ってガス加熱で熱絞りを行う. このように幾何学的特性に従って施工を行うことで, 理論的には最短経路での目的形状への到達を可能とする. 松尾らはこの曲率線展開法を搭載したソフトウェアの開発と実証を行っており, 既に採用する造船所も増えつつある.

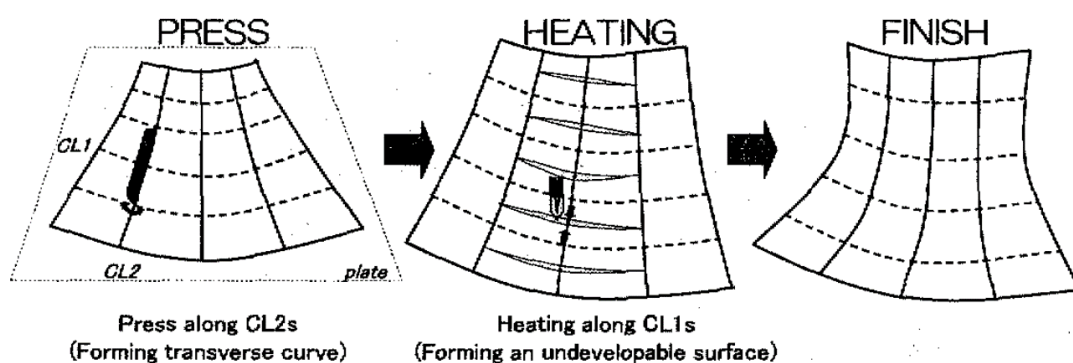


図 2-6 曲率線展開法に基づく外板加工プロセス[19]

2.3.4 全自動化に関する研究

2.3.1, 2.3.2, 2.3.3 では作業員による作業を前提とした加工支援に関する取り組みを紹介した. 一方で, 曲げ加工の理論的解析に基づき, 大型設備を用いた曲げ加工の自動化に関する取り組みも行われている. その代表例として, IHIMU - α を紹介する. このシステムは, 加熱条件と変形量の関係を系統的に整理した「加熱 — 変形データベース」と, このデータベースを参照しながら加熱方案を自動算出する加熱方案生成プログラムおよびこの加熱方案を実行するハードウェアによって構成されている[20]. 図 2-7 にハードウェアと加熱方案算出のフローを示す. ハードウェアに関しては, 7 軸多関節を持つロボット加熱装置, 高さ調節が可能な電動ジャッキ付きの支持定盤, 自動的に鋼板を反転させる鋼板反転装置などを備えている. 加熱方案算出に関しては, FEM モデルで表現される目的形状と板厚, 材質を入力すると, 固有歪み理論に基づく弾性 FEM(Finite Element Method)解析を中核とした独自の解析手法と最適化により, 加熱方案(加熱位置・順序・加熱速度・鋼板の支持方法・反転のタイミング)が出力される. 加熱方案の生成手法の詳細に関しては, 丹後らの研究[5]を参照されたい. また素材の特性値や残留応力などのばらつきに対応するために, 離散点のレーザー計測による形状評価ならびに修正加熱方案の算出を行う仕組みを導入している.

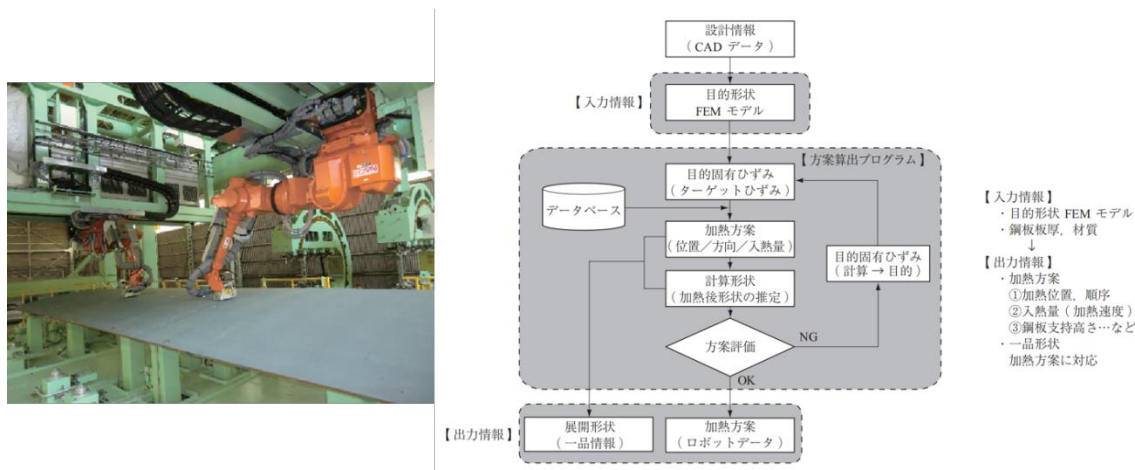


図 2-7 IHIMU - αの稼働の様子 (左) と加熱方案算出フロー (右) [20]

同様に韓国では, Park らも同様のアプローチによる自動加熱加工システムを開発し, その検証を行った[21][22]. その外観を図 2-8 に示す. Park らのシステムでもレーザ計測機器を搭載し, 鋼板の計測データを NURBS 曲面で近似し弾性 FEM 解析シミュレーションに入力することで, 修正の加工方案の生成を行う機能を有している. Park らはシステムを小規模の鋼板に適用する実験を行うことで, 鋼板全体の 90%を許容誤差 4.5mm 以内に収まる形状に加工することが出来たとしている.

紹介した全自動化システムの課題としては, 加熱条件と鋼板の変形を体系的に調べたデータベースを参照したシミュレーションにより加熱方案を算出するため, 想定通りに加工が行われないケースが発生する点がある. 従って, その場では対応が出来ないため, 最終的に人手による修正を要することになる. そして板厚や材質の変動を始めとした状況の変化に対応するためには, その都度データベースの拡張を行う必要がある. またその他にも, 曲率の小さい板(曲率半径 5m 以上)にしか使えない, 大規模な設備を必要とする, 運用時に加工のための膨大なエネルギーを要するなどの点も挙げられるため, 普及に至っていないのが現状である.

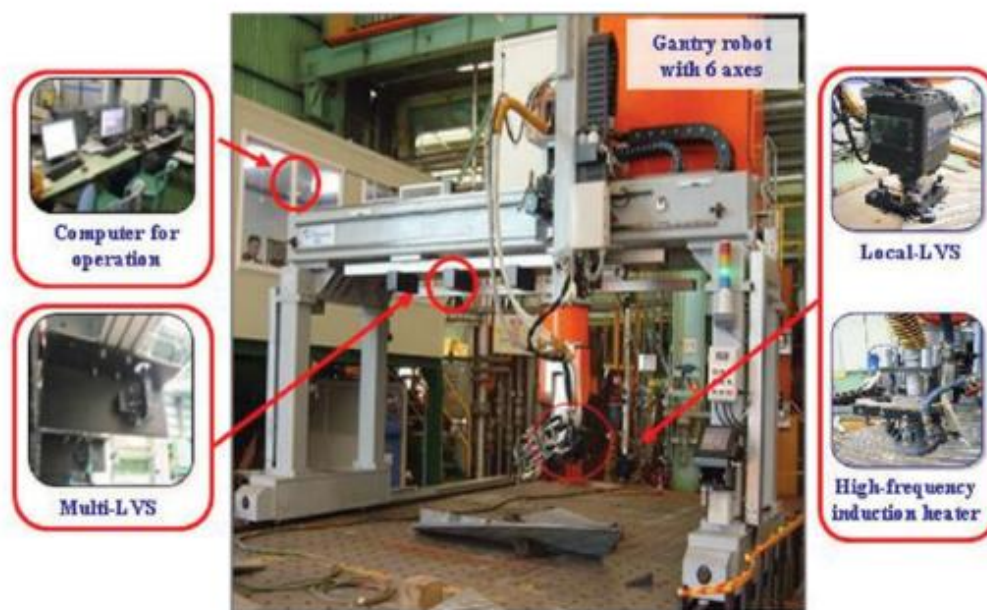


図 2-8 Park らの開発した自動加熱加工システム[22]

2.4 Augmented Reality

2.4.1 AR と VR

近年、製造業のデジタル化・コンピュータ化を目指すドイツ発祥のインダストリー4.0 を筆頭に、IoT(Internet of Things: モノのインターネット)や AI(Artificial Intelligence: 人工知能)といった情報技術の用語をキーワードとし、製造業の革新へ向けた様々な取り組みが行われている。その中で、コンピュータとユーザの間のインタフェースの研究を行う HCI(Human-Computer Interaction: ヒューマン・コンピュータ・インタラクション)の分野で扱われてきた、VR(Virtual Reality: 実質的な現実感)や AR(Augmented Reality: 拡張現実感)も、大きな注目を集めている。VR は HMD(Head Mounted Display: ヘッドマウントディスプレイ)の装着や大型スクリーンなどの活用により、コンピュータが作り出した映像を見ることで、ユーザが仮想空間上に入り込んだかのような体験をすることができる技術である。一方で AR はタブレット型端末などで映像を撮影し、撮影した現実の映像に仮想的な映像を重ね合わせて表示することで、情報を付与する技術である。近年では AR を実現するデバイスとして、Microsoft 社がヘッドマウントディスプレイ方式の HoloLens[23]を発売し、話題を呼んだ。これらの技術は、セ

ンシング技術や CPU の処理能力向上などにより飛躍的に利便性が向上し、エンターテインメント産業だけでなく製造業や医療，教育の現場での活用が期待されている。以下では，AR に焦点を当て，その活用事例や研究を紹介する。

2.4.2 AR の活用・研究事例

松尾らは造船工程への AR の応用・実用化を目的とし，タブレット型端末を用いた AR アプリケーションの開発を行った[24]。松尾らは AR を造船工程へ応用する用途として，「生産の指示，支援のためのツール」，「教材，技能伝承のためのツール」，「計測，測量のためのツール」と述べている。また具体的な活用方法としては，重量・重心，温度や物の背後など，本来作業員が見ることが出来ない情報の表示による認知の支援や，組立形状や作業手順を 2 次元図面に落とし込まずに 3 次的に表示する「3 次元図面」による新しい情報提示提供を挙げている。図 2-9 に松尾らが開発した配管施工支援 AR アプリケーションのデモンストレーションの様子を示す。これは現場合わせ管の工程を簡易化し，効率よく施工を進める事を目的としたアプリケーションである。配管を画像計測することで配管設計を自動的に行い，その結果をタブレット上に撮影映像と重ね合わせて表示するものである。



図 2-9 松尾らによるアプリケーションのデモンストレーション[24]

三菱電機株式会社は，ウェアラブル端末を活用し AR 表示による点検作業の確認とハンズフリーでの点検効果の音声入力ができる，保守点検作業支援技術を開発した[25]。そのアーキテクチャを図 2-10 に示す。この技術は水処理プラントやビルの電気設備などの現場

での、作業員の負荷軽減や点検ミスの抑制につながるとしている。

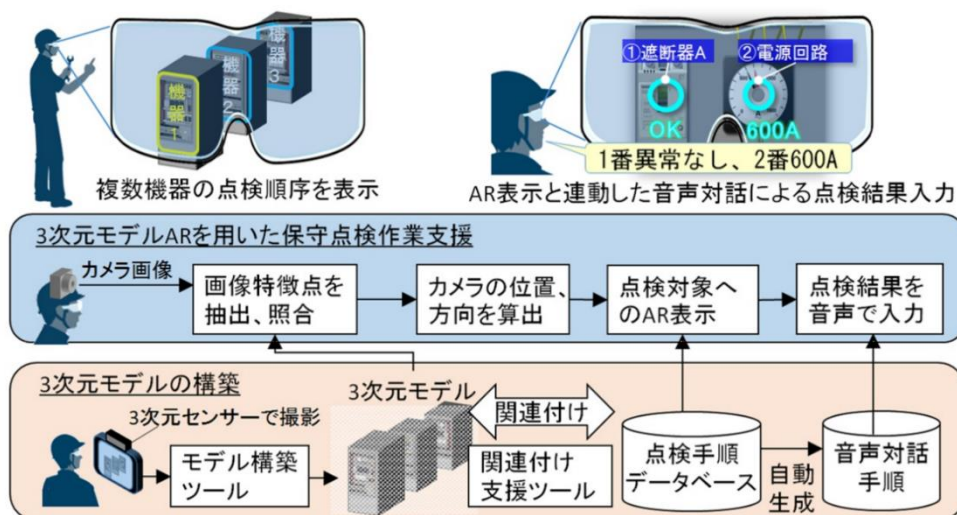


図 2-10 3次元モデルARを用いた保守点検作業支援技術[25]

以上の2つの事例が、ユーザが端末を通して映像を視認する形式で、情報を提供するARを活用している。一方でプロジェクタから実物体に映像投影を行う事で、物体の見た目そのものを変化させる Spatial Augmented Reality(空間型AR: 空間型拡張現実感)の利用も広まっている。この技術はプロジェクションマッピングとも呼ばれ、凹凸やスクリーンそのものが持つ情報を活用し、平面スクリーンに単純投影したものより立体感や空間感を生み出すことが可能となる。その活用事例として、Doshiらは自動車生産工場におけるスポット溶接作業の支援を目的とし、空間型ARを活用した指示システムの開発と検証を行った[26]。具体的には作業員がスポット溶接を行うポイントに向かって、図 2-11(左)に示すように作業場周辺に固定された複数のプロジェクタから目印を映し出し指示することで、作業の速度と品質を向上させるシステムである。行われた投影のデモンストレーションの様子を図 2-11(右)に示す。緑色に光る箇所が投影された目印である。Doshiらは実際の生産ラインにシステムを試験導入し、システムを用いるケースと用いないケースにおける点溶接の結果を比較する実験を行った。その結果、点溶接の精度と正確度が改善することを確認し、システムの有用性を示した。



図 2-11 システムの構成（左）と作業指示のデモンストレーション（右） [26]

その他にも、Parkらのように製品の外観設計の評価に活用する事例[27]や、Krempienらの医療分野における小線源療法の手順への活用[28]など、分野を問わず様々な SAR の活用事例がある。また空間型 AR を活用することで、被験者が指示された課題を手順通りに実施する際に、反応に要する時間(Task Response Time)が減少し、認知負荷(Cognitive Cost)も減少するという研究が報告されている[29]。この研究では、ディスプレイモニタ、AR、VR、空間型 AR といった 4 通りの情報伝達手段が実験により比較されており、その中で最も空間型 AR が被験者のパフォーマンスを向上させ認知負荷を減少させた結論付けている。

2.5 本研究の位置づけ

表 2-1 にぎょう鉄の各プロセスと既存のアプローチ、そしてそれぞれの技術成熟度(TRLs: Technology Readiness Levels)[30]の対応を示す。技術成熟度とは、技術要素がどのような成熟段階にあるのかを定量的に評価する方法であり、図 2-12 のように 8 つのレベルで構成された開発フェーズと対応づけることが出来る。

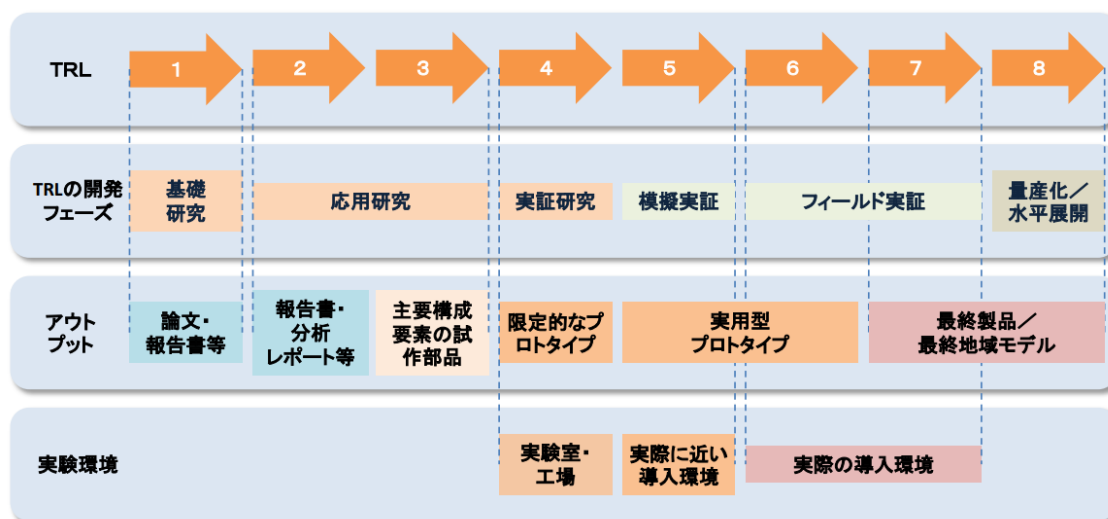


図 2-12 開発フェーズと TRLs の関連性のイメージ[31]

表 2-1 各プロセスに対する既存のアプローチと TRL による評価

プロセス	アプローチ	主な狙い	TRL	説明
形状評価	精度評価システム	精度評価の定量化	8	・実用化が達成されている
方案決定	バーチャル木型	工作指標の定量化と方案決定の支援	6	・現場環境での実証実験は完了 ・ユーザの属人性が課題
	FEM 解析	加熱方案決定	5	・現場環境での模擬実証は完了 ・適応可能種類や完成度に課題

2.3.1 で説明した精度評価システムは実運用が達成されているが、文字通り精度評価に焦点を当てた研究である。2.3.2 で述べた木型のバーチャル化は方案決定を支援するために工作指標を定量化しフィードバックすることを狙いとした研究であり、あくまで方案決定は作業員に委ねられている。2.3.3 の曲率線展開法は、効率的な加工方法を提案するものであり、加工途中の外板の形状のモニタリングは行わず、木型を用いて作業員が評価することを前提としている。2.3.4 で紹介した全自動化の研究は、機械化による完全代替を志向した研究である。また方案決定には、加熱量と鋼板の変形の間を蓄積したデータベースを用いた FEM 解析によるアプローチを採用しており、完成度や適用可能な種類に関して実用化への課題がある。

本研究は、作業員による加工を前提としたうえで、方案決定とその情報伝達に焦点を当てた研究である。具体的には、以下のエンジンから構成される加熱加工指示システムの開発を行い、外板加工工程の技術化への貢献を目指す。

① 加熱指示生成エンジン

加工途中の外板を完成形状に近づけるための方案決定を計算機が行うエンジン

② 指示投影エンジン

加熱指示線をプロジェクタから外板上に直接映し出すエンジン

加熱指示生成エンジンは、レーザスキャナにより計測した加工途中の曲がり外板の法曲率の誤差評価を行うことで、追加の線状加熱の指示を生成するエンジンである。これは温度分布の経時変化による変形現象を収納したデータベースの用意や計算量の大きい FEM 解析を必要とせず、シンプルに曲率の差異から加熱指示を提示する点で従来のシミュレーションを基盤とした手法とは異なる。また 2.4 節で紹介した空間型 AR を導入した指示投影エンジンを構築することで、手間がかかると推察される加熱指示の伝達効率の向上を目指す。具体的に詳細な位置の特定を要する作業指示を行う際は、実際に映像を物体上に重ね合わせて表示するという点で、一般的な HMD やタブレット型端末を用いた AR に比べて空間型 AR の方が効果が期待できる。

以上を踏まえ本研究の新規性を以下に述べる。

- レーザスキャナで計測した加工途中の外板の曲率誤差評価に基づく加熱方案を生成し、プロジェクタから外板上に指示映像を投影することで、作業員に加工指示を行うシステムを開発した。

第3章 要素技術

3.1 はじめに.....	22
3.2 曲面の基本理論.....	22
3.2.1 曲面と法曲率.....	22
3.2.2 NURBS による曲線・曲面の表現.....	23
3.2.3 NURBS 曲面への点の投影.....	23
3.2.4 任意方向の法曲率の導出.....	24
3.3 点群処理技術.....	25
3.3.1 レーザスキャナと点群データ.....	25
3.3.2 主成分分析による平面フィッティングと法線ベクトルの算出.....	27
3.3.3 領域成長法.....	28
3.3.4 ICP アルゴリズムを用いた点群と曲面の位置合わせ.....	29
3.3.5 本研究における位置合わせ処理.....	30
3.3.6 重み付き最小二乗法による曲線フィッティング.....	32
3.3.7 大規模点群処理プラットフォーム「Pupulpit」.....	34
3.4 空間型 AR.....	35
3.4.1 透視カメラ.....	36
3.4.2 プロジェクタのキャリブレーション.....	39
3.4.3 投影映像の生成.....	40
3.4.4 OpenCV.....	40

3.1 はじめに

本章では, 使用する要素技術ならびに関連する理論について述べる.

3.2 曲面の基本理論

本節では, 曲面に関する基本的な理論のうち, 本研究で扱うものについて説明する.

3.2.1 曲面と法曲率

曲面の任意の点で, 曲面に対して垂直である法線ベクトルを見つけることが出来る. 図 3-1 に一般的な曲面上における点 p と, その点における法線ベクトル \mathbf{N} を示す. 点 p を通りベクトル \mathbf{N} に平行な断面を法平面(normal plane)と呼び, 法平面と曲面の交線を法断面(normal section)と呼ぶ. 法断面は平面曲線である. 法断面上の点 p における曲率を法曲率(normal curvature)という. またベクトル \mathbf{t} は, 点 p における法断面の接ベクトルを表している[32].

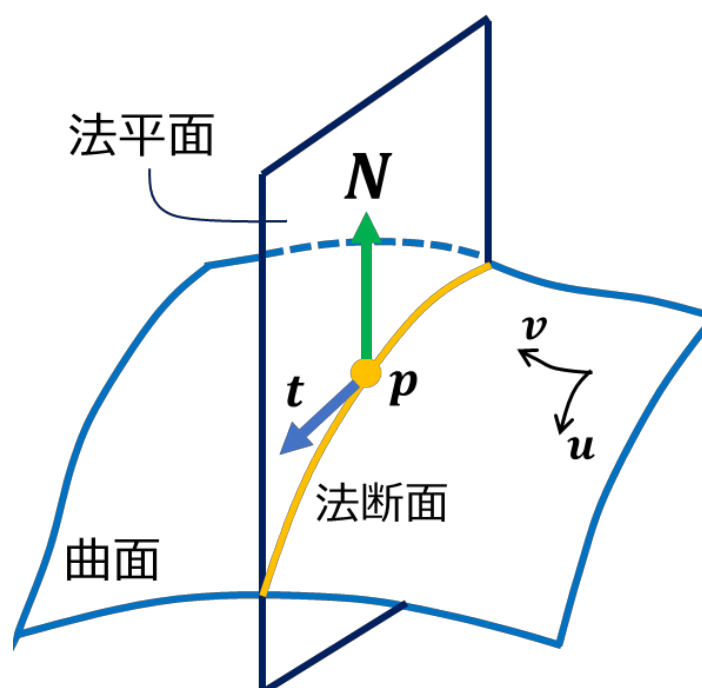


図 3-1 曲面上の点における法平面と法断面の例

3.2.2 NURBS による曲線・曲面の表現

NURBS とは Non-Uniform Rational B-Spline のことであり、「ノット列の間隔が一定ではない」B-Spline 基底関数を用いて表現される曲線および曲面を、同次座標系を用いた有理化により拡張した曲線・曲面の表現方法である [33]。NURBS 曲面 $\mathbf{S}(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$ は、以下の式(3.1)で表現される。なお \mathbf{P}_{ij} は制御点、 w_{ij} は重みである。そして基底関数は式(3.2)(3.3)であり、ノットベクトルは式(3.4)で表される。

$$\mathbf{S}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{ij} \mathbf{P}_{ij}}{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{ij}} \quad (3.1)$$

$$N_{i,0}(t) = f(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } t_i \leq t \leq t_{i+1} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$N_{i,k}(t) = \frac{(t - t_i) N_{i,k-1}(t)}{t_{i+k-1} - t_i} + \frac{(t_{i+k} - t) N_{i+1,k-1}(t)}{t_{i+k} - t_{i+1}} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{U} = \{u_0, \dots, u_{n+p}\} \quad \mathbf{V} = \{v_0, \dots, v_{m+q}\} \quad (3.4)$$

3.2.3 NURBS 曲面への点の投影

図 3-2 に示すような、3 次元空間中のある点 \mathbf{P} から NURBS 曲面 $\mathbf{S}(u, v)$ への投影点は、非線形最適化問題を解くことで求めることができる。ここで投影点とは、点 \mathbf{P} から曲面 \mathbf{S} に下した垂線の足を指す。この計算は 3.3.4 で述べる位置合わせ手法において使用する。

まず投影ベクトル $\mathbf{r}(u, v)$ を式(3.5)と定義する。そして $\mathbf{r}(u, v)$ が曲面と直交するようにニュートン法を用いて u と v を変化させ、逐次的に最適解に近づける。具体的には、 $\mathbf{r}(u, v)$ は式(3.6)(3.7)を満たす。 $\mathbf{S}_u(u, v)$ と $\mathbf{S}_v(u, v)$ は、それぞれ $\mathbf{S}(u, v)$ の u と v 方向の一階の偏微分である。

$$\mathbf{r}(u, v) = \mathbf{S}(u, v) - \mathbf{P} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{r}(u, v) \cdot \mathbf{S}_u(u, v) = 0 \quad (3.6)$$

$$\mathbf{r}(u, v) \cdot \mathbf{S}_v(u, v) = 0 \quad (3.7)$$

ニュートン法による最適化により求められた $\mathbf{r}(u, v)$ は、曲面に対して同じ側であれば同符号、違う側であれば異符号となるようなベクトルである。

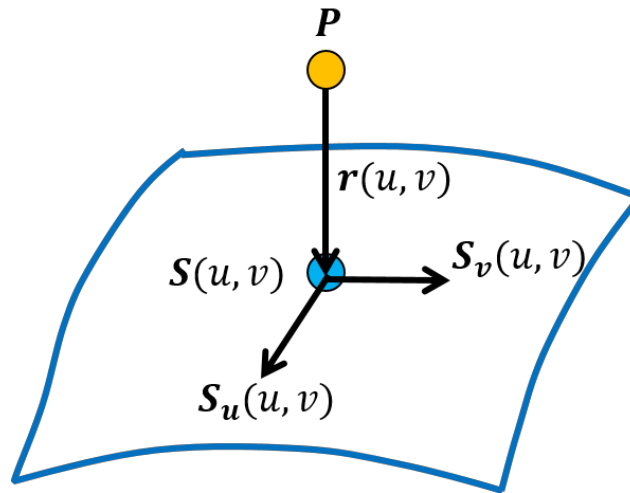


図 3-2 曲面への点の投影

3.2.4 任意方向の法曲率の導出

曲面 $\mathbf{S}(u, v)$ における単位法線ベクトル \mathbf{N} は式(3.8)で表現できる。また第一基本量 E, F, G は式(3.9)で、第二基本量 L, M, N は式(3.10)で表される。なお式中的変数は式(3.11)に従う。

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{S}_u \times \mathbf{S}_v}{|\mathbf{S}_u \times \mathbf{S}_v|} \quad (3.8)$$

$$E = \mathbf{S}_u \cdot \mathbf{S}_u \quad F = \mathbf{S}_u \cdot \mathbf{S}_v \quad G = \mathbf{S}_v \cdot \mathbf{S}_v \quad (3.9)$$

$$L = \mathbf{S}_{uu} \cdot \mathbf{N} \quad M = \mathbf{S}_{uv} \cdot \mathbf{N} \quad N = \mathbf{S}_{vv} \cdot \mathbf{N} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{S}_u = \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u}, \mathbf{S}_v = \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial v}, \mathbf{S}_{uu} = \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial u^2}, \mathbf{S}_{vv} = \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial v^2}, \mathbf{S}_{uv} = \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial u \partial v} \quad (3.11)$$

曲面上の任意点 (u, v) における, 任意方向 λ の法曲率 $\kappa(\lambda)$ は式(3.12)で定義される. ここで変数 λ は式(3.13)で表されるように, ある方向の法断面が u 方向ベクトルと為す角度を表すスカラー量である. 例えば u 方向ベクトルと45度の角度を為す方向の場合 h, λ の値は1となる.

$$\kappa(\lambda) = \frac{L + 2M\lambda + N\lambda^2}{E + 2F\lambda + G\lambda^2} \quad (3.12)$$

$$\lambda = \frac{dv}{du} \quad (3.13)$$

図 3-1 にて点 p における接ベクトル \mathbf{v} と, 曲面の u 方向ベクトルが為す角度が既知で, その値が Ψ であるとする. このとき, オイラーの定理より, 任意方向 λ の法曲率 $\kappa(\lambda)$ は式(3.14)で表される. E, G, L, N はそれぞれ式(3.9)(3.10)で表される基本量である.

$$\kappa(\lambda) = \frac{L}{E} \cos^2 \Psi + \frac{N}{G} \sin^2 \Psi \quad (3.14)$$

一方, 法平面の方程式が既知である場合も, 法曲率 $\kappa(\lambda)$ は導出が可能である. 法平面の方程式が $ax + by + cz + d = 0$ であるとき, その方向を表すスカラー量 λ は式(3.15)となる. ここで式中の $\mathbf{S}_{u,x}$ は \mathbf{S}_u の x 座標を意味する. 従って式(3.15)で求められた λ を式(3.12)に代入することで, 法曲率 $\kappa(\lambda)$ は導出される.

$$\lambda = -\frac{a\mathbf{S}_{u,x} + b\mathbf{S}_{u,y} + c\mathbf{S}_{u,z}}{a\mathbf{S}_{v,x} + b\mathbf{S}_{v,y} + c\mathbf{S}_{v,z}} \quad (3.15)$$

3.3 点群処理技術

3.3.1 レーザスキャナと点群データ

本研究で使用するレーザスキャナは計測対象物に向かってレーザを照射し, 反射光から

対象物の 3 次元位置を特定する計測機器である. 具体的には, 図 3-3 に示すように対象の点 p までの距離 d を計算し, レーザの照射方向角度 θ と ϕ から点 p の 3 次元位置を極座標系で取得する. 距離 d の計算方法は, レーザを照射し反射光が返ってくるまでの時間を測定することで計算を行う Time-of-Flight 方式と, 照射時と反射光の位相差からレーザの移動距離を計算する位相差方式の 2 種類がある.

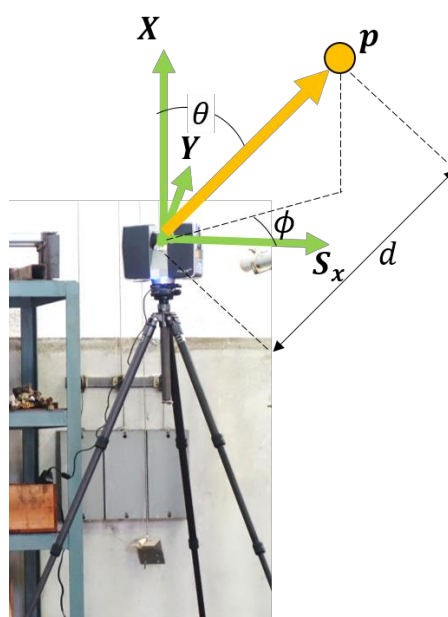


図 3-3 レーザスキャナの計測における座標系

またレーザスキャナにより得られる計測データは, 様々な形式で出力を行う事が出来るが, 本研究では点群データ (Point Cloud Data) と呼ばれる CSV 形式のテキストデータを用いる. そのデータ形式の例を図 3-4 に示す. これは得られた計測点の座標を直交座標系に修正したものと反射光強度を合わせてテキスト出力したもので, 各点のミリメートル単位の X, Y, Z 座標, 反射光強度, そして色情報として RGB 値が 1 行ずつ記載されている. 点群データに色情報を付与する際は, この RGB 値を変更することで行う. 本論文にて, 「点群データ」ないし「点群」と述べるときは, このデータ形式を指すものとする.

X座標	Y座標	Z座標	反射光強度	R	G	B
400,	800,	-83.839,	211	214	24	31
350,	800,	-86.5344,	223	256	33	25
300,	800,	-85.6521,	189	134	55	53

図 3-4 点群データの形式

3.3.2 主成分分析による平面フィッティングと法線ベクトルの算出

3次元空間におけるN個の点で構成される点群 \mathbf{P} に対して主成分分析[34]を用いることで、その点群の特徴量を計算することが出来る。平面フィッティングとは、その特徴量を利用し点群 \mathbf{P} に対して各点からの距離の二乗和が最小となる平面を求める処理である。具体的な処理を以下に述べる。

まず式(3.16)と式(3.17)で表される点群 \mathbf{P} の重心 \mathbf{G} と分散共分散行列 \mathbf{C} を計算する。ここで \mathbf{P}_i とは、i番目($i = 1, 2, \dots, N$)の点の位置ベクトルを指す。この行列 \mathbf{C} について固有値問題を解き、得られた3つの固有値の大きいものから順に対応する固有ベクトルが点群 \mathbf{P} の第一主成分、第二主成分、第三主成分となる。

重心 \mathbf{G} を通り第三主成分ベクトル \mathbf{n} を法線ベクトルとする平面 \mathbf{p} が点群 \mathbf{P} にフィッティングされた平面であり、その方程式は式(3.18)で表される。その様子を図 3-5 に示す。

$$\mathbf{G} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{P}_i \quad (3.16)$$

$$\mathbf{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{P}_i - \mathbf{G})(\mathbf{P}_i - \mathbf{G})^T \quad (3.17)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{G}) = 0 \quad (3.18)$$

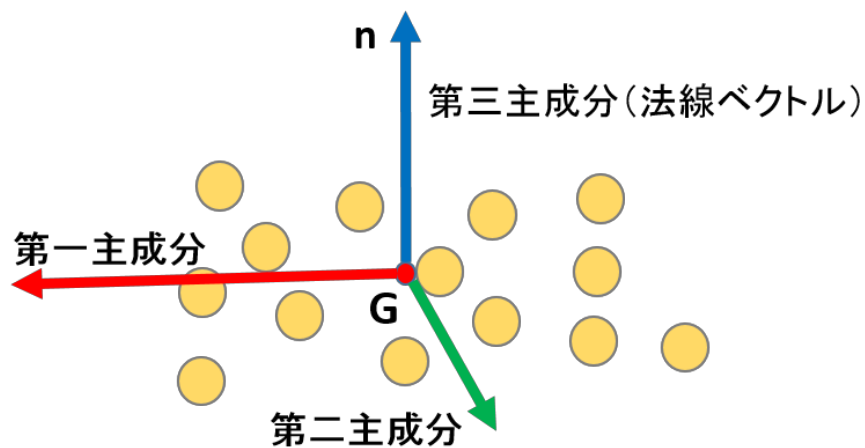


図 3-5 平面フィッティングと法線ベクトル

3.3.3 領域成長法

領域成長法とは、シード領域(手法を開始する領域)から始まり、一定の性質を満たす近傍の領域を逐次追加していくことで、シード領域と同じ領域を拡張していく手法である。本研究では計測した点群データに領域成長法を適用することで、図 3-6 のように対象となる外板の形状を表す点群データの抽出を行う。また稗方らの手法[6]にならい、判定基準となる性質として法線の内積を採用し、近傍点探索にはkd木[35]による近傍探索を発展させた Best Bin Fast(BBF)[36]を用いることで高速化を図る。具体的なアルゴリズムを以下に述べる。

- ① 抽出したい領域上の点をシード点として選択し、領域内の点とする。
- ② 領域とその近傍点の法線ベクトルを 3.3.2 の手法で計算し、2 つの法線ベクトルの内積が定めた閾値よりも大きい場合に近傍点を領域内に追加する。
- ③ 新しく領域内に追加された点をシード点とみなして、②の処理を繰り返す。点の追加が止まった時点で処理を終了する。

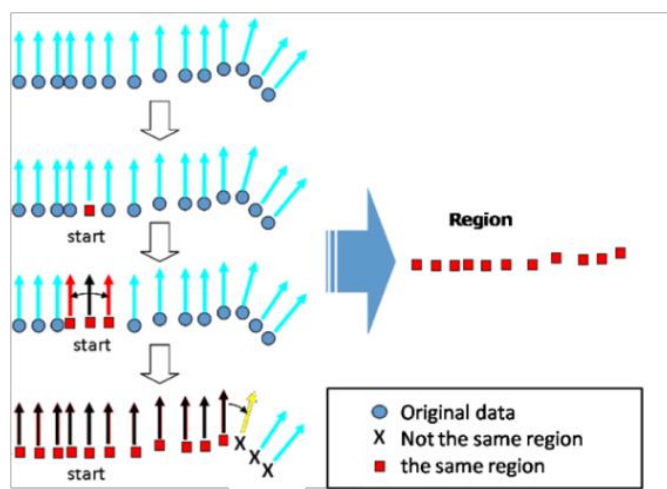


図 3-6 領域成長法による領域探索[6]

3.3.4 ICP アルゴリズムを用いた点群と曲面の位置合わせ

異なる位置にある 3 次元の形状どうしを重ね合わせる「位置合わせ」の手法として広く用いられる ICP アルゴリズムを用いて、点群データ $\mathbf{P} = \{\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N\}$ を曲面 $\mathbf{S}(u, v)$ を基準として位置合わせを行うことができる。本研究では、3.3.5 で述べる計測した外板の点群データと設計データを比較する処理に、以下に述べる手法を使用する。

- ① 点群 \mathbf{P} の全点から曲面 $\mathbf{S}(u, v)$ への投影点を 3.2.3 の方法で算出する。ここで点群 \mathbf{P} に含まれる、ある点 \mathbf{p}_i からの投影点を \mathbf{q}_i とする。
- ② 式(3.19)で表される誤差 E を最小にする回転行列 \mathbf{R} と移動ベクトル \mathbf{t} を、最小二乗法で求める。なお点 \mathbf{p}'_i は、式(3.20)で表される、ある点 \mathbf{p}_i を座標変換した後の点とする。
- ③ 求めた \mathbf{R} と \mathbf{t} を用いて、式(3.20)によって点群 \mathbf{P} の全点を座標変換する。
- ④ 誤差 E が閾値を下回る場合、または①～③が一定の回数繰り返された場合は計算を終了する。それ以外の場合は、①に戻る。

$$E = E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{q}_i - \mathbf{p}'_i\|^2 \quad (3.19)$$

$$\mathbf{p}'_i = \mathbf{R}\mathbf{p}_i + \mathbf{t} \quad (3.20)$$

3.3.5 本研究における位置合わせ処理

本研究で提案するシステムは、計測した外板の点群データと設計データを比較するために、2つのデータの位置合わせ処理(レジストレーション)を行う。本研究では、計算の安定性を保ちつつ計算時間を短くするために、Sunらが提案した階層的ICPアルゴリズム[37]を用いた位置合わせ手法[38]を基盤とした処理を行う。位置合わせ処理の流れを図3-7に示す。

以下では、位置合わせの基準となる設計曲面を $\mathbf{S}(u, v)$ 、設計曲面から対象となる外板の形状を切り出す際の曲線(トリムカーブ)上の点群を \mathbf{P}_d 、外板の点群 \mathbf{P}_m と定義する。

① 重心と慣性主軸の計算

\mathbf{P}_d と \mathbf{P}_m に対して3.3.2で述べた主成分分析を適用し、それぞれの重心 \mathbf{G}_d と \mathbf{G}_m と、分散共分散行列の固有ベクトルを並べた行列 \mathbf{R}_d と \mathbf{R}_m を算出する。ここで \mathbf{R}_d と \mathbf{R}_m は式(3.21)(3.22)で表され、それぞれがトリムカーブ上の点群および外板点群の慣性主軸となる。また、 \mathbf{R}_d と \mathbf{R}_m の各列ベクトルで張られる直交座標系が共に左手系であるかを確認し、右手系の場合は第1列の列ベクトルに -1 を乗ずることで左手系になるように修正を行う。

$$\mathbf{R}_d = [\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2 \quad \mathbf{e}_3] \quad \mathbf{e}_i: \text{対応する固有値が昇順となる固有ベクトル} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{R}_m = [\mathbf{f}_1 \quad \mathbf{f}_2 \quad \mathbf{f}_3] \quad \mathbf{f}_i: \text{対応する固有値が昇順となる固有ベクトル} \quad (3.22)$$

② 平行移動と回転による変換

算出した重心と慣性主軸を用いて、式(3.23)に従って \mathbf{P}_m の各点の座標変換を行う。ここでは、 \mathbf{p}_i を変換前の点、 \mathbf{p}'_i を変換後の点とし、全点に対して座標変換を行う。式(3.23)中の行列 \mathbf{R}_d は、式(3.24)に示す計4通りとし、それぞれの \mathbf{R}_d を用いて変換の計算を行う。

$$\mathbf{p}'_i = \mathbf{R}_d^T \mathbf{R}_m (\mathbf{p}_i - \mathbf{G}_m) + \mathbf{G}_d \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_d &= [a\mathbf{e}_1 \quad b\mathbf{e}_2 \quad c\mathbf{e}_3] \\ \{a, b, c\} &= \{1, 1, 1\}, \{1, -1, -1\}, \{-1, 1, -1\}, \{-1, -1, 1\} \end{aligned} \quad (3.24)$$

③ 任意の100点を用いたICPによる位置合わせ

②で計算した4通りの変換後の点群のなかから、それぞれ任意の100点を抽出する。そして3.3.4で述べたICPアルゴリズムを用いて、抽出した点を曲面 $S(u, v)$ を基準として位置合わせする。そして4通りの位置合わせの結果のうち、収束時の誤差 E が最小となる変換を、「初期の位置合わせ」の変換とする。その時の変換行列を用いて、 P_m の全点を座標変換し、変換後の点群を改めて P_m とする。

④ 全点を用いたICPによる位置合わせ

最後に、変換された P_m の全点をICPアルゴリズムを用いて、曲面 $S(u, v)$ を基準として位置合わせを行う。その結果を、「位置合わせされた外板点群」とする。

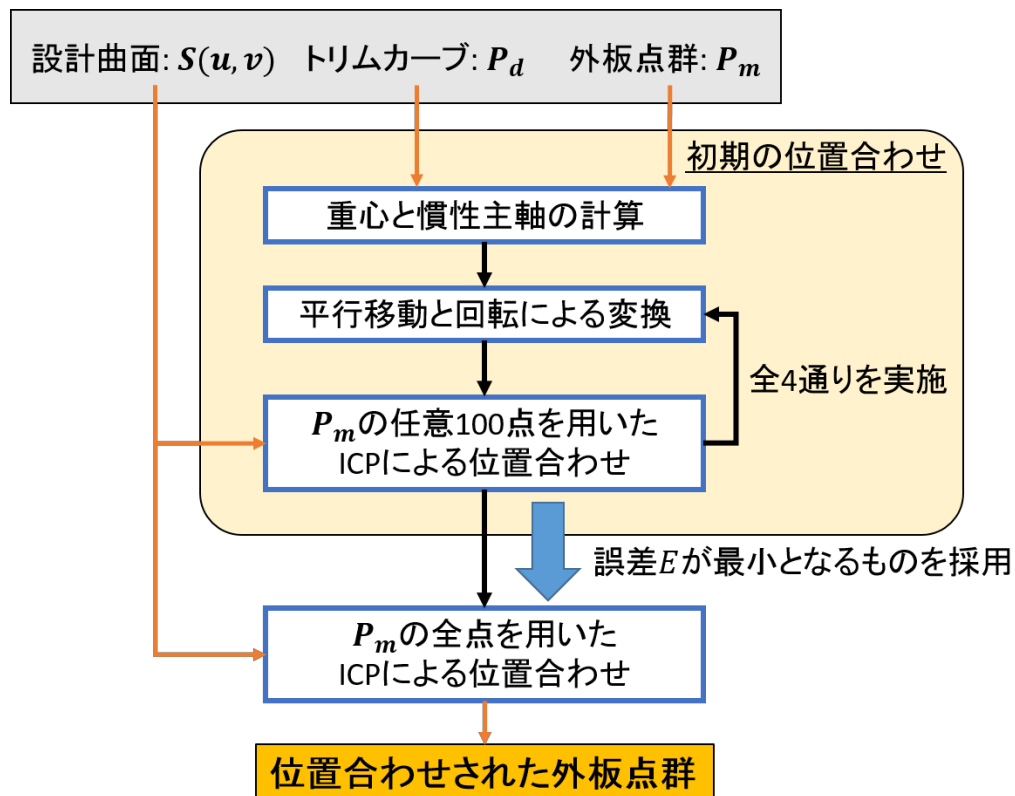


図 3-7 位置合わせの流れ

なお②と③で4通りの座標変換を行う理由は、算出される慣性主軸の3軸が重なってもデータによって軸の向きが変わってしまい、位置合わせの結果が図3-8のように反転する可能性があるからである。そこで慣性主軸の左手系の関係を保ちつつ、可能な全4通りの位置合わせを網羅的に行う事で、位置合わせにおける反転を防ぐアプローチとなっている。

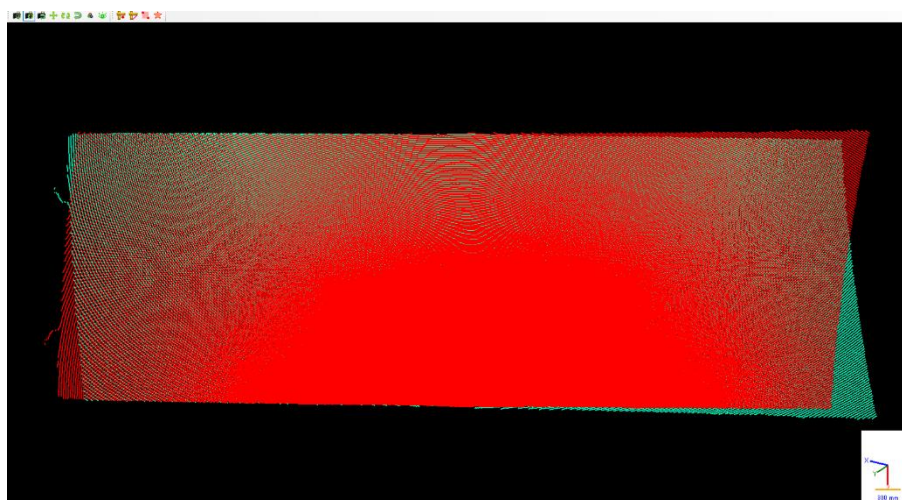


図 3-8 位置合わせの結果が本来の結果と反転するケース

3.3.6 重み付き最小二乗法による曲線フィッティング

本研究では3次元の点群データをある平面に射影した上で平面曲線をあてはめることで、着目する点における曲率を求める。その際、曲率を求めたい点からの距離に応じた重みを用いた、重み付き最小二乗法[35]により曲線フィッティングを行う。その概要図を図 3-9 に示す。ここでは xy 平面上に分布している N 点の点群データに関して、 $x = t$ における曲率 C_t を算出するものとし、当てはめる曲線の次数は2次である。

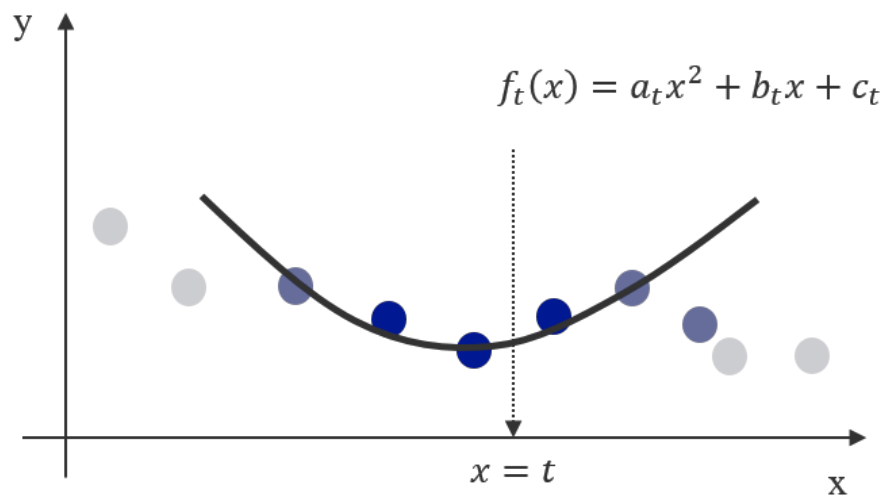


図 3-9 重み付き最小二乗法による曲線フィッティングの例

ここでフィッティングする 2 次曲線の式を $f_t(x)$ とすると、 $f_t(x)$ は式(3.25)で表される。そして各係数は、式(3.26)で表される誤差 E_t を最小化するものとする。 $w_t(x_i)$ は式(3.27)で示されるように、各点の x 座標 x_i と $x = t$ の距離に応じた重みであり、 h は重みの減衰を決定するパラメータである。最後に、フィッティングされた曲線を用いて、式(3.28)により $x = t$ における曲率を算出する。

$$f_t(x) = a_t x^2 + b_t x + c_t \quad (3.25)$$

$$E_t = \sum_i^N w_t(x_i) (y_i - f_t(x_i))^2 \quad (3.26)$$

$$w_t(x_i) = \exp\left(-\frac{d^2}{h^2}\right), \quad d = x_i - t \quad (3.27)$$

$$c_t = \frac{f_t''(t)}{(1 + f_t'(t)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.28)$$

3.3.7 大規模点群処理プラットフォーム「Pupulpit」

株式会社ユニクスが提供している、Windows OS を対象とした大規模点群処理プラットフォーム「Pupulpit[39]」について説明を行う。

Pupulpit のメインのユーザインタフェースを図 3-10 に示す。Pupulpit では点群データの読み込みを行い、3 次ビューワ上に表示することが出来る。そして描画されているデータの中から点を選択したり、座標の取得、切り取りや切り出しなどの編集、カメラの回転や移動によるビューワの視点の変更などの基本機能が備わっている。大きく分けて 4 つのビューがあり、それぞれが以下のような機能を持つ。



図 3-10 Pupulpit の基本的なユーザインタフェース

① ワークスペースビュー

読み込まれたデータが一覧で表示される。各データは CSV 形式を初めとしたテキストデータで出力することが可能である。また③の表示ビューに描画されているデータの表示・非表示を切り替えを行うことができる。

② プロパティビュー

ワークスペースに表示されているデータのうち、現在選択されているデータの詳細情

報を表示する。点群データの場合、点の数やファイル名を確認する事ができ、各点の描画サイズや表示色、表示・非表示を変更することもできる。

③ 表示ビュー

点群や曲線、曲面データといった読み込みデータ 3 次元的にグラフィカルに表示する。マウス操作を行う事で点の選択、視点変更やデータの編集を行う事が出来る。

④ 出力ビュー

読み込みデータや計算ログおよび結果などを、テキストで表示する。

以上が無償で提供されている Pulpit の主な機能とユーザインタフェースの説明である。

Pulpit では以上の機能に加えて、プラグインの開発を行うことで別途機能を追加する事が出来る。プラグインとは、アプリケーションの機能を拡張する際に追加インストールするソフトウェアである。追加したプラグインは図 3-11 のように Pulpit 上で実行することができる。

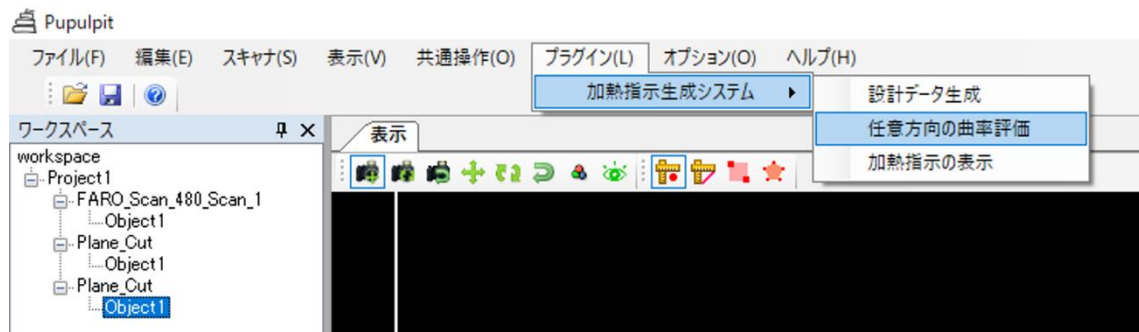


図 3-11 プラグインの実行

3.4 空間型 AR

本節は空間型 AR の具体的な理論や実現方法について説明を行う。まず初めにプロジェクタの光学的モデルである透視カメラモデルについて説明し、次にプロジェクタの校正(キャリブレーション)とその具体的な手法を説明する。最後に空間型 AR の出力である投影画像の生成について述べる。本節中の記載は、全て[40]から引用を行っている。

3.4.1 透視カメラ

視覚を扱うコンピュータビジョンの分野では 3 次元空間を 2 次元空間に投影する機能を持つものを総称してカメラと呼ぶ。デジタルカメラといったような実際のカメラの物理的投影は非常に複雑であるため、情報処理を行う場合はレンズ中心の 1 点(光学中心)に着目したピンホール・カメラを用いてモデル化される。そしてプロジェクタはカメラと光の向きが異なるものの、同一のモデルを用いた表現が可能である。以上を踏まえ、本項ではピンホール・カメラを用いた投影モデルのうち、実際のカメラを扱うための「透視カメラモデル」について説明を行う。

3.4.1.1 透視投影

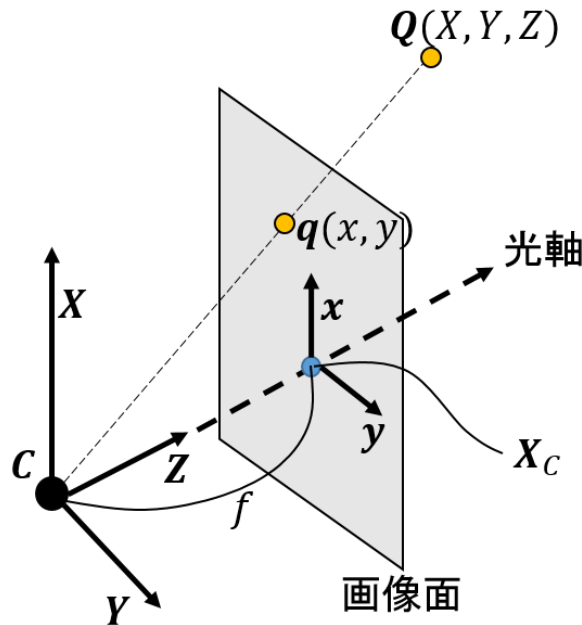


図 3-12 透視投影

透視カメラモデルの投影原理である、透視投影の様子を図 3-12 に示す。光学中心Cから画像面に垂直に引いた直線を光軸と呼び、光軸と画像面との交点を画像中心 X_c と呼ぶ。また光学中心と画像面との距離を焦点距離 f と呼ぶ。ここでカメラを中心とした 3 次元空間中の点 $Q = [X, Y, Z]^T$ が、2 次元画像上の点 $q = [x, y]^T$ に投影されるとする。式(3.29)に表すように、透視投影は Z に関して非線形な関係を持つ。また $f = 1$ としたとき、点 q の同次座標 $\tilde{q} = [x_1, x_2, x_3]^T$ および点 Q の同次座標 $\tilde{Q} = [X_1, X_2, X_3, X_4]^T$ を用いることで、式(3.29)は式(3.30)に示す行列演算の形で表す事が出来る。同次座標とは空間の次元を 1 つ上げ、その比に

よって空間を表現する座標の取り方を指す. 今回の場合, λ を 0 を除く任意の実数としたとき, 同次座標の各変数は式(3.31)を満たす.

$$x = \frac{fX}{Z}, y = \frac{fY}{Z} \quad (3.29)$$

$$\lambda \tilde{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{Q}} = \mathbf{P}_f \tilde{\mathbf{Q}}, \quad \mathbf{P}_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$x = \frac{x_1}{x_3}, y = \frac{x_2}{x_3}, X = \frac{X_1}{X_4}, Y = \frac{X_2}{X_4}, Z = \frac{X_3}{X_4} \quad (3.31)$$

3.4.1.2 透視カメラモデル

実際のカメラのモデル化には, さらに物理的座標から画像座標への変換と, カメラの回転および並進による変換を考える必要がある.

まず物理的な 2 次元画像上の座標 \mathbf{q} から画像座標 $\mathbf{m} = [u, v]^T$ への変換は, カメラの射影性質を表す内部パラメータ行列 \mathbf{A} と式(3.32)を満たす \mathbf{m} の同次座標 $\tilde{\mathbf{m}} = [m_1, m_2, m_3]^T$ を用いて式(3.33)で表される. ここで f は焦点距離, u_0 および v_0 は画像中心の座標, k_u および k_v は u および v 方向のスケール・ファクター, k_s はせん断係数であり, これらはカメラの内部パラメータ (intrinsic parameter) と呼ばれる.

$$u = \frac{m_1}{m_3}, v = \frac{m_2}{m_3} \quad (3.32)$$

$$\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{q}} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} fk_u & fk_s & u_0 \\ 0 & fk_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

続いてカメラの回転および並進による変換は, ワールド座標系における 3 次元空間中の点 \mathbf{Q}_w の, カメラを中心としたカメラ座標系の点 \mathbf{Q} への変換を指す. この変換は点 \mathbf{Q}_w の同次座標 $\tilde{\mathbf{Q}}_w$ とカメラの外部パラメータ行列 \mathbf{M} と用いて式(3.34)で表される. ここで 3 次元の回転行列 \mathbf{R} と並進行列 \mathbf{T} はカメラの外部パラメータと呼ばれ, 式(3.35)(3.36)のようにそれぞれ X 軸, Y 軸, Z 軸回りの回転 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$, および X 軸方向, Y 軸方向, Z 軸方向の並進 T_x, T_y, T_z からな

る.

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \mathbf{M}\tilde{\mathbf{Q}}_w, \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\mathbf{R} \quad (3.35)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_X & -\sin \theta_X \\ 0 & \sin \theta_X & \cos \theta_X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_Y & 0 & \sin \theta_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_Y & 0 & \cos \theta_Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_Z & -\sin \theta_Z & 0 \\ \sin \theta_Z & \cos \theta_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

式(3.30)(3.33)(3.34)より, ワールド座標系における3次元空間の点 \mathbf{Q} は2次元画像上の点 \mathbf{m} に式(3.37)に従って座標変換される. 式(3.37)で表されるカメラモデルを透視カメラモデルと呼ぶ. このとき λ は0を除く任意の実数で, \mathbf{P} は式(3.38)で表される3行4列の行列で, 透視カメラ行列と呼ばれる.

$$\lambda \tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{P}\tilde{\mathbf{Q}} \quad (3.37)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}\mathbf{P}_f\mathbf{M} \quad (3.38)$$

透視カメラ行列 \mathbf{P} は式(3.39)で示す3行4列の射影カメラ行列 \mathbf{P}_p を用いて一般化が可能である. この一般化されたモデルを射影カメラモデルと呼び, 式(3.40)で表される.

$$\mathbf{P}_p = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$\lambda \tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{P}_p\tilde{\mathbf{Q}} \quad (3.40)$$

3.4.2 プロジェクタのキャリブレーション

3.4.1 で述べたように、プロジェクタは透視カメラモデルを用いてモデル化することが可能である。従って以下ではプロジェクタの透視カメラモデル、射影カメラ行列、透視カメラ行列をそれぞれ「透視プロジェクタモデル」「射影プロジェクタ行列」「透視プロジェクタ行列」と呼ぶ。

プロジェクタの内部パラメータ行列**A**および外部パラメータ行列**M**を求めることを、プロジェクタのキャリブレーション(以下、キャリブレーション)と呼ぶ。キャリブレーションはプロジェクタの画像上の点と対応する3次元空間中の点の座標の組み合わせを6点以上与えることで、パラメータを求める最適化問題として定式化される。以下、N組($N \geq 6$)の対応点が既知であるとす。

まず式(3.39)で表される射影プロジェクタ行列**P_p**を6 Points Algorithm と非線形最適化を用いて求める。3次元空間中の点**Q_i** = $[X_i, Y_i, Z_i]^T$ とそれに対応するプロジェクタ画像上の点**m_i** = $[u_i, v_i]^T$ は既知であるので、式(3.40)から式(3.41)が得られる。

$$\begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i X_i & -u_i Y_i & -u_i Z_i & -u_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & Z_i & 1 & -v_i X_i & -v_i Y_i & -v_i Z_i & -v_i \end{bmatrix} \mathbf{p} = \mathbf{0} \quad (3.41)$$

$$\mathbf{p} = [p_{11} \ p_{12} \ p_{13} \ p_{14} \ p_{21} \ p_{22} \ p_{23} \ p_{24} \ p_{31} \ p_{32} \ p_{33} \ p_{34}]^T \quad (3.42)$$

同様に対応点は全部でN組であるので、式(3.43)に示す行列**B**を用いて連立方程式(3.44)が立てられる。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_1 & -u_1 Y_1 & -u_1 Z_1 & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -v_1 X_1 & -v_1 Y_1 & -v_1 Z_1 & -v_1 \\ & & & & & & & \vdots & & & & \\ X_N & Y_N & Z_N & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_N X_N & -u_N Y_N & -u_N Z_N & -u_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_N & Y_N & Z_N & 1 & -v_N X_N & -v_N Y_N & -v_N Z_N & -v_N \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$\mathbf{Bp} = \mathbf{0} \quad (3.44)$$

ただし**Q_i**や**m_i**は計測点であるため誤差が含まれ、厳密には式(3.44)は成立しない。従って $\|\mathbf{Bp}\|$ を最小にする **p** を求める問題に帰着する。ここで、式(3.40)では同次座標を用いている

ため、射影プロジェクタ行列 \mathbf{P}_p は定数倍しても同様のモデルを表す。従って $\|\mathbf{p}\| = 1$ とすることができ、式(3.45)が導かれる。ラグランジュの未定乗数法を用いると、求める \mathbf{p} は式(3.45)の行列 \mathbf{W} の最小固有値に対応する固有ベクトルとなる。

$$\min_{\mathbf{p}} \|\mathbf{B}\mathbf{p}\|^2 = \min_{\mathbf{p}} \mathbf{p}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B} \mathbf{p} = \min_{\mathbf{p}} \mathbf{p}^T \mathbf{W} \mathbf{p} \quad (3.45)$$

以上の線形最適化により射影プロジェクタ行列 \mathbf{P}_p および透視プロジェクタ行列 \mathbf{P} が推定される。さらに最小化の目的関数に幾何学的な意味を持たせるために、再投影誤差を表す式(3.46)を用いて、非線形最適化を行い透視プロジェクタ行列 \mathbf{P} を推定する。初期値には線形解を与え、非線形最適化には Levenberg-Marquardt 法を適用する。

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ([u_i \ v_i]^T - P[X_i \ Y_i \ Z_i]^T)^2 \quad (3.46)$$

最後に、求められた透視プロジェクタ行列 \mathbf{P} を内部パラメータ行列 \mathbf{A} と外部パラメータ行列 \mathbf{M} に分解する。ここで \mathbf{P} の 3 行 3 列の部分を考える。 \mathbf{A} は上三角行列、 \mathbf{M} を構成する式(3.35)の回転行列 \mathbf{R} が正規直交行列であることを利用すると、QR 分解により \mathbf{A} と \mathbf{R} が求まる。そして求まった \mathbf{R} および \mathbf{P} の 4 列目の要素を用いることで、式(3.36)の並進行列 \mathbf{T} も求まる。

3.4.3 投影映像の生成

最後に、空間型 AR を実現する投影映像の生成について説明を行う。投影映像を生成する際には、3.4.2 で推定した透視プロジェクタ行列 \mathbf{P} と、投影を行う対象の物体の 3 次元モデルを用いる。3 次元モデルを構成する 3 次元空間の点から 2 次元画像上の点への変換を 1 点ずつおこない各点の描画を行うことで、画像を生成することができる。これはすなわち、図 3-12 のような透視投影の変換を各 3 次元座標に対して行うものである。また各点の色情報を保持することで、色付きの映像を投影することができる。

3.4.4 OpenCV

OpenCV[41]とは画像処理および機械学習を対象とした、Windows や Linux, Mac OS など

様々な OS に対応している, オープンソースのソフトウェア・ライブラリである. OpenCV を用いることで, 3.4.2 のプロジェクタのキャリブレーションおよび 3.4.3 の投影映像の生成の実装が可能である. OpenCV は C/C++を基盤としたソフトウェアであるが, 様々な言語で扱えるように, ラッパー・ライブラリが用意されている. 本研究では, OpenCV を Windows の .NET Framework の言語から使用するためのラッパー・ライブラリである OpenCVSharp[42]を用いている.

第4章 提案する加熱加工指示システム

4.1 はじめに	43
4.2 システムのコンセプト	43
4.3 システムを構成するエンジン	44
4.3.1 加熱指示生成エンジン	44
4.3.2 指示投影エンジン	44
4.4 システムの実装	45
4.4.1 ハードウェア	45
4.4.2 ソフトウェア	48

4.1 はじめに

本章では、曲がり外板の加熱加工指示システム(以下、本システム)について説明する。

4.2 システムのコンセプト

本システムのコンセプトを図 4-1 に示す。本システムを構成するハードウェアは、加工途中の外板の 3 次元形状を取得するレーザスキャナ、各計算を行う計算機、そして外板に映像を投影するプロジェクタである。本システムは(1)加熱指示生成エンジンと(2)指示投影エンジンの 2 つのエンジンに分かれている。作業員は加工途中の外板を固定し、計算機を通じてレーザスキャナを遠隔操作することで、外板の 3 次元計測を行い計測データを得る。そして計算機が設計 CAD から得る設計データと計測データを用いて、加熱指示を生成する。生成された加熱指示は、該当箇所に映し出される映像に変換されたうえで、プロジェクタから外板に投影される。作業員は投影された映像を目視で認識し、その情報に従って次の作業を行う。

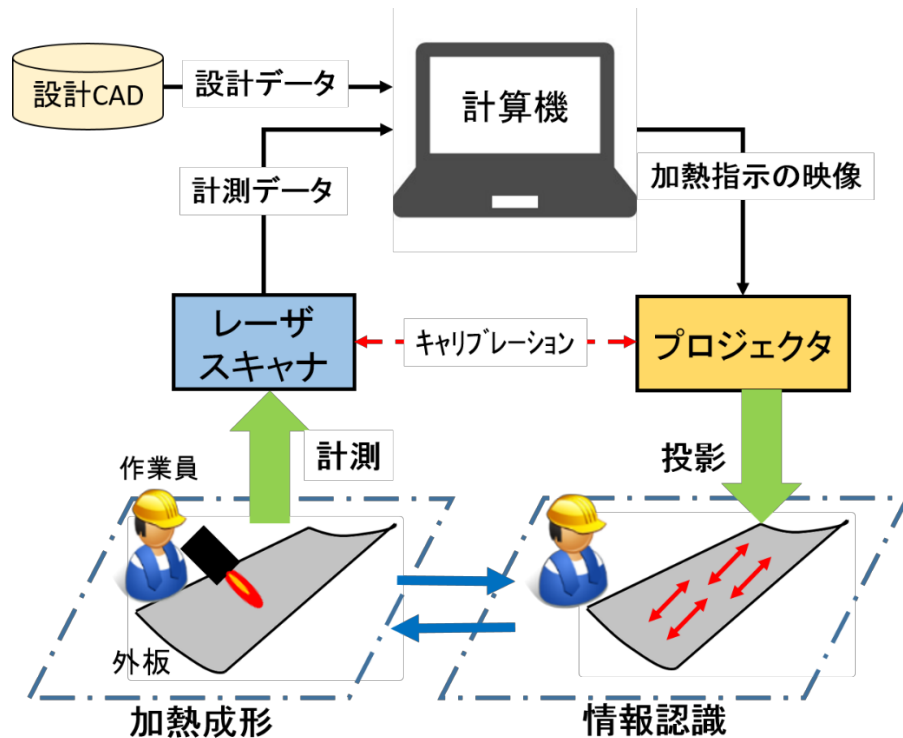


図 4-1 加熱加工指示システムのコンセプト

4.3 システムを構成するエンジン

4.2 で述べたように、本システムは表 4-1 に示すような 2 つのエンジンから構成される。本節では、それぞれについて、概要の説明を行う。

表 4-1 本システムを構成するエンジン

名称	加熱指示生成エンジン	指示投影エンジン
目的	加工途中の外板を完成形状に近づけるための方案決定を行う	加熱指示の情報を外板の該当箇所に投影し、作業員に伝達する
ハードウェア	レーザスキャナと計算機	プロジェクタと計算機
入力	設計データと計測データ	加熱指示線を表す点群
処理	<ul style="list-style-type: none"> ・複数方向の法曲率の算出 ・曲率誤差に基づく加熱指示の生成 	<ul style="list-style-type: none"> ・加熱指示線の投影画像を生成 ・プロジェクタから映像を投影
出力	加熱指示線を表す点群	加熱指示線の投影画像

4.3.1 加熱指示生成エンジン

加熱指示生成エンジンは、加工途中の外板を完成形状に近づけるための方案決定を行う機能を有する。本研究では、現在形状と設計形状の曲率の比較結果に基づき、線状加熱の指示線を生成するものとする。

具体的には、レーザスキャナを用いて取得した外板の計測データと設計データの曲率を比較し、加熱指示を算出する。最終的に生成された加熱指示は、色情報付きの点群形式で出力され、4.3.2 の指示投影エンジンに入力することができる。また作業員は計算機に接続されたモニタ画面上でも、解析の結果を確認する事が出来る。

加熱指示生成エンジンの開発内容の詳細は、第 5 章にて説明する。

4.3.2 指示投影エンジン

指示投影エンジンは、4.3.1 の加熱指示生成エンジンによる外板の計測データの解析により生成された加熱指示の情報を、プロジェクタから外板の該当箇所に投影する機能を有する。プロジェクタは加熱指示生成エンジンで用いるレーザスキャナを原点とした 3 次元の直交座標系において、3.4.2 で説明したキャリブレーションが行われているものを使用する。

具体的には、加熱指示生成エンジンが出力する加熱指示線の点群と、事前に行ったキャリブレーションの結果を用いて、投影画像を生成する。そしてプロジェクタに投影映像を入力し、外板に向けて投影を行う。作業員は投影された映像を視認することで、加熱指示線を特定できる。

指示投影エンジンの開発内容の詳細は、第 6 章にて説明する。

4.4 システムの実装

本節では、システムの具体的な実装について、ハードウェア部分とソフトウェア部分に分けて説明を行う。

4.4.1 ハードウェア

まず 4.4.1.1 では想定されるシステムの導入環境について述べ、それを踏まえたうえで 4.4.1.2 ではハードウェアの構成と運用方針について述べる。

4.4.1.1 システムが導入される環境について

本システムを導入する環境として、半屋内の建屋内にて工程が進められる一般的な造船所における、図 4-2 に示すような作業場を想定する。通常扱う外板の大きさは多種多様であるが、今回は縦方向長さが 4m、横方向長さが 3m 程度の中規模サイズの外板を対象とすると仮定した。一般的にその程度のサイズの外板は、1 人の作業員で工程が進められる。作業場の床には、図 4-3(左)のような蜂の巣定盤が敷き詰められており、外板はその定盤の上に設置され、図 4-3(右)のように枕木や治具などを用いて動かないように固定される。また工程の都合で生じる外板の反転作業や運搬に使用されるクレーンが、作業場の上部に常設されており、作業員が自由に操作することが出来る。クレーンでの反転を行う際には、図 4-4 のような大掛かりな作業となるため、周辺に機材がある場合は、一度撤去する必要がある。

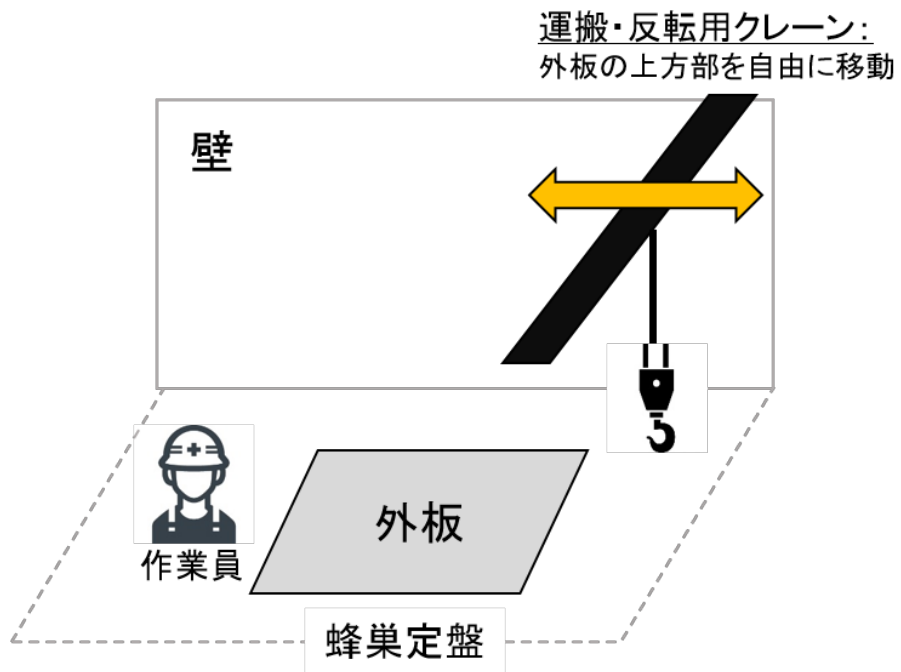


図 4-2 本システムが導入される作業場を表した見取り図

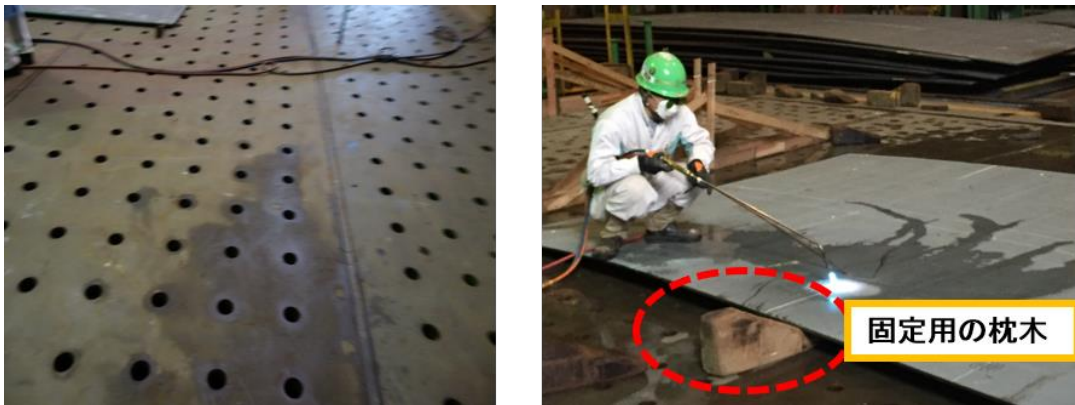


図 4-3 蜂の巣定盤（左）と固定用の枕木（右）のイメージ



図 4-4 クレーンによる外板の反転作業の様子

4.4.1.2 ハードウェアの構成

前述の通り本システムを構成するハードウェアは、レーザスキャナとプロジェクタおよび計算機である。その構成を図 4-5 に示す。

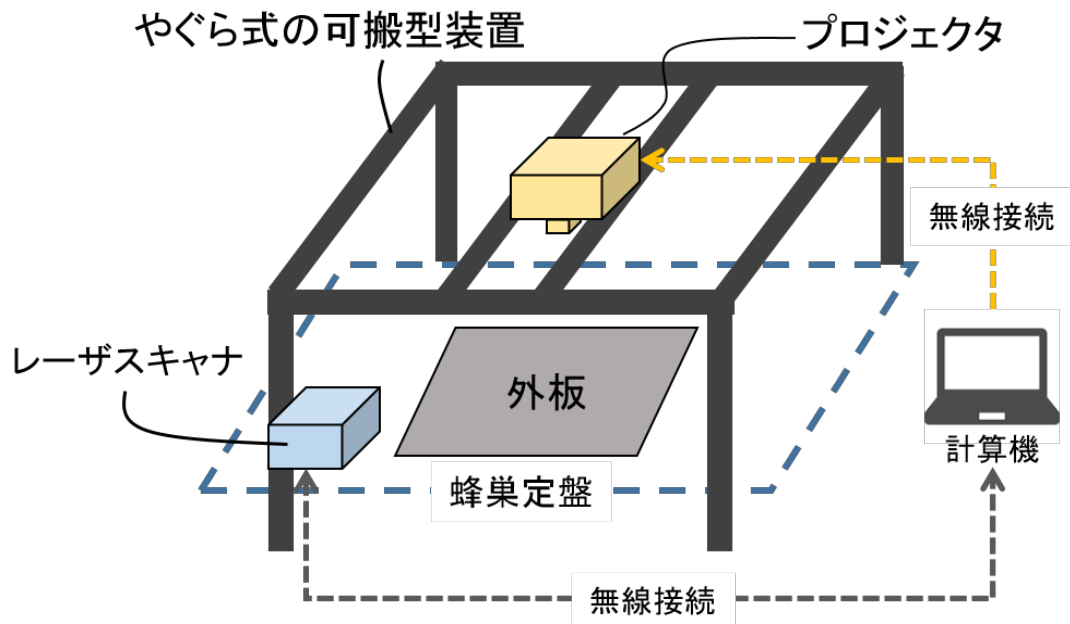


図 4-5 本システムのハードウェアの構成

やぐら式に組み上げられた装置にプロジェクタとレーザスキャナが固定されており、その相対位置関係は不変である。プロジェクタとレーザスキャナの相対位置関係が変わらない限り、キャリブレーションを再度行う必要は無い。計算機とレーザスキャナは無線接続されており、レーザスキャナが取得した点群データを、無線を経由して計算機に送信できる。同様に計算機とプロジェクタも無線接続されており、計算機からプロジェクタに投影映像を送信できる。また 4.4.1.1 で述べたようにクレーンによる作業が工程の途中で発生することを考慮し、やぐら式の装置は機械的な自動制御または手動によって水平方向に可動するものとする。可搬型の装置を構築することで、作業員は任意のタイミングで装置を設置し、システムを稼働させる事が出来る。

4.4.2 ソフトウェア

本システムのソフトウェアの構成を図 4-6 に示す。

加熱指示生成エンジンのソフトウェアの開発は、3.3.7でのべた Pulpit[39]のプラグイン開発により実現する。具体的には、加熱指示生成エンジンの機能を有する「加熱指示生成プラグイン」を実装し、Pulpit 上で図 3-11 のように実行する。

一方、指示投影エンジンのソフトウェアの開発には、Windows 向けのアプリケーション開発に用いられる Microsoft .NET Framework を活用し、独立したソフトウェアを実装する。

各ソフトウェアは図 4-6 に示す機能を有しており、ソフトウェアを連携させることで、本システム全体の機能を実現する。それぞれの開発内容については、5.5 と 6.2 で詳細に述べる。

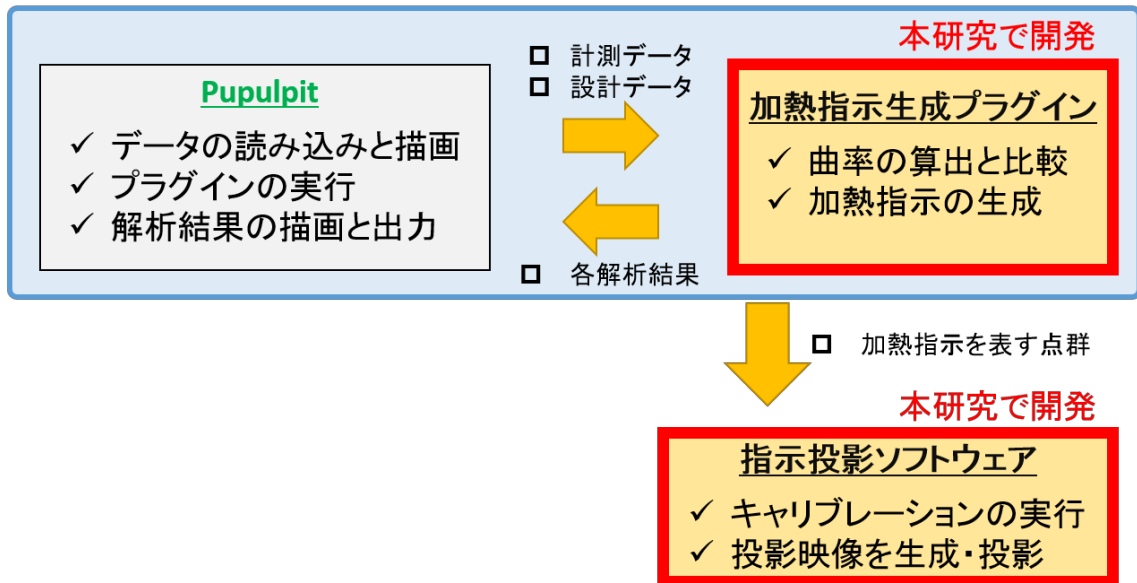


図 4-6 本システムのソフトウェアの構成

第5章 加熱指示生成エンジンの開発

5.1 はじめに.....	51
5.2 加熱指示生成のアプローチ.....	51
5.3 概要.....	51
5.4 加熱指示生成プロセス.....	52
5.4.1 外板点群の抽出と位置合わせ.....	54
5.4.2 複数方向の計測法曲率の算出.....	55
5.4.3 所要収縮量を指標とした加熱指示情報の生成.....	59
5.4.4 可視化と出力.....	61
5.5 開発したソフトウェア.....	63
5.5.1 フォルダ構成.....	63
5.5.2 データの読み込み.....	64
5.5.3 開発したプラグインによる解析と可視化.....	65

5.1 はじめに

本章では、加熱加工指示システムを構成するエンジンとして開発した、加熱指示生成エンジン(以下、本エンジンまたはエンジン)について説明する。

5.2 加熱指示生成のアプローチ

ぎょう鉄は鋼板を与えられた設計曲面の形状の外板に加工する工程である。外板は局所的な凹凸が少ない滑らかな曲率を持つ鋼板であることを考慮すると、ぎょう鉄は鋼板の曲率を設計曲面の曲率に徐々に近づけるプロセスであると言える。そこで本エンジンは計測した外板の曲率を算出し設計形状のものと比較することで、誤差が大きい箇所を修正する線状加熱の指示を行う。線状加熱は、加熱線の進行方向に対して直交する方向の曲がりを修正するプロセスであることを踏まえ、曲率誤差が最も大きい方向に直交する線状加熱の指示を提示するアプローチをとる。

5.3 概要

図 5-1 に本エンジンの概要図を示す。入力するデータは、レーザスキャナにより取得した計測点群と、外板の設計曲面データおよび評価対象の点群である。評価対象の点群とは、本エンジンにより曲率誤差の評価を行う点の集合である。

まず、評価対象の点に対応する外板の計測点(以下、対応点)を求め、対応点における複数方向の法曲率(以下、計測法曲率)を算出する。続いて設計データから解析的に得られる法曲率(以下、設計法曲率)と計測法曲率を比較することで曲率誤差を計算する。そして計算した曲率誤差に基づき、加熱箇所および加熱線の進行方向の情報を持つ「加熱指示情報」を生成する。最終的に加熱指示情報は点群の形式に変換されたのちに、3次元ビューワ上のカラー映像として可視化される。

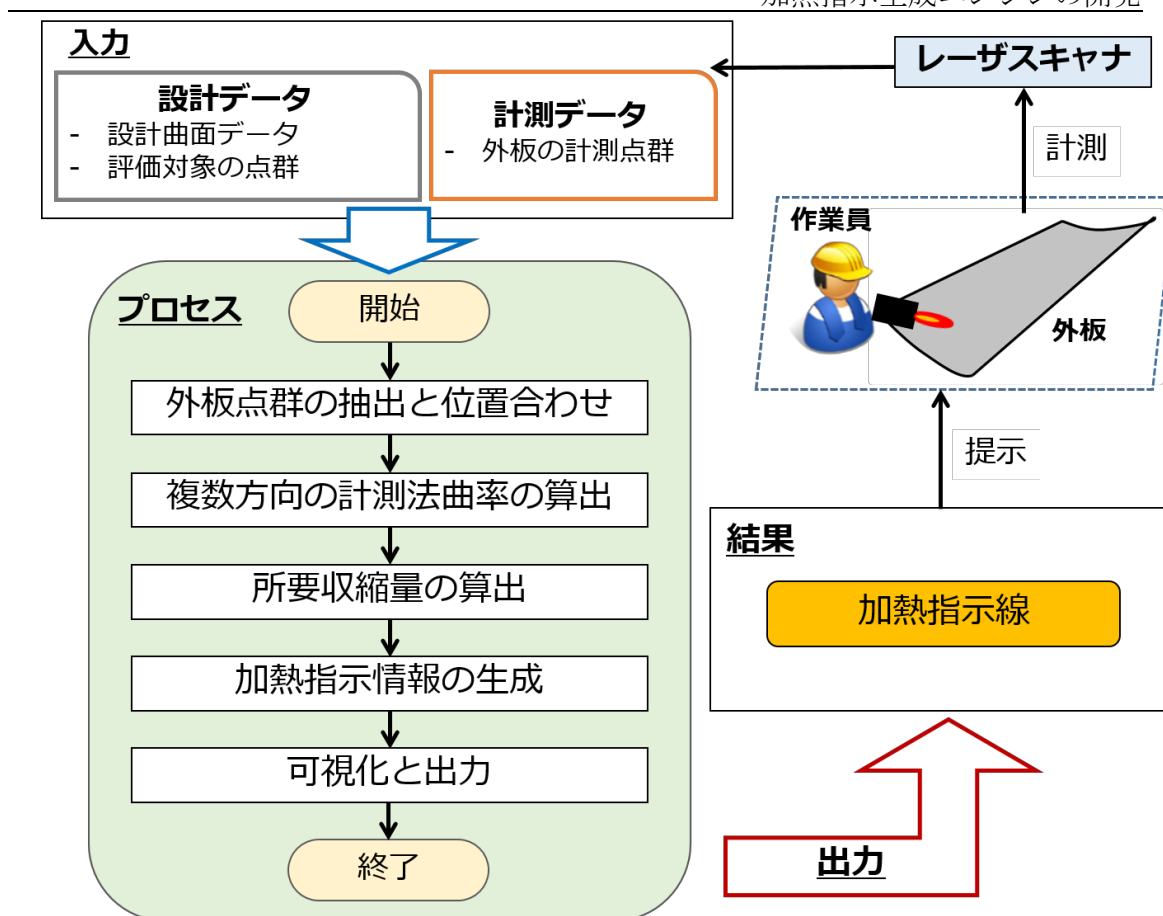


図 5-1 加熱指示生成エンジンの概要図

5.4 加熱指示生成プロセス

本節では、エンジンの中核を担う、加熱指示生成プロセスについて、図 5-1 に沿って説明を行う。なお入力となるデータは、以下の2つである。

① 計測データ

3.3.1 で説明したレーザスキャナにより取得される、外板の計測点群を使用する。

② 設計データ

(ア) 設計曲面データ

ACISと呼ばれるモデリングカーネルの標準ソースファイル形式である、SAT(Save As Text)ファイルを使用する。曲面および曲線は 3.2.2 で述べた NURBS で表現

されており、それらを読み込むことで解析に使用する。SAT ファイルには一般的に様々な情報が含まれているが、本エンジンで使用するのは(1)設計曲面の情報と(2)トリムカーブである。トリムカーブとは、設計曲面から対象となる外板の形状を切り出すための曲線情報である。トリムカーブは空間曲線であり、一定間隔の離散的な点群に変換が可能である。

(イ) 評価対象の点群

本エンジンで曲率の評価を行う点の集合であり、点群の形式で用意する。

これらの点は、CAD ソフトウェア上で設計曲面上の任意の点をユーザが選択することで生成することが出来る。

読み込みを行った、それぞれのデータの例を図 5-2 に示す。この例の場合、紫色のポリゴンが設計曲面、黄色の点がトリムカーブ、緑色の点が評価対象の点群である。

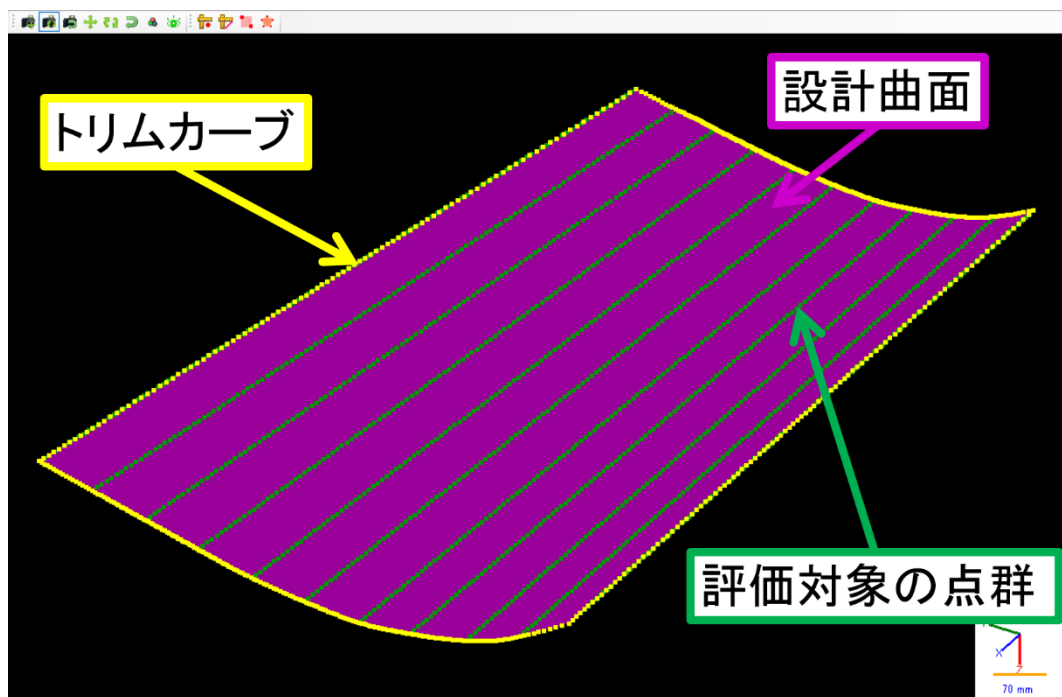


図 5-2 読み込みを行った設計データの例

5.4.1 外板点群の抽出と位置合わせ

図 5-3(上)に示すように、計測データには定盤や枕木といった外板以外のデータも含まれる。そこでまず 3.3.3 で述べた領域成長法を適用することで、図 5-3(下)に示すように外板を構成する点群(以下、外板点群)を抽出する。続いて、3.3.5 の手法を用いて外板点群を設計曲面データに重ね合わせる位置合わせを行う。その様子を図 5-4 に示す。このとき最終的な「計測データから設計曲面データ」への座標変換行列は、計算機内で保持しておく。

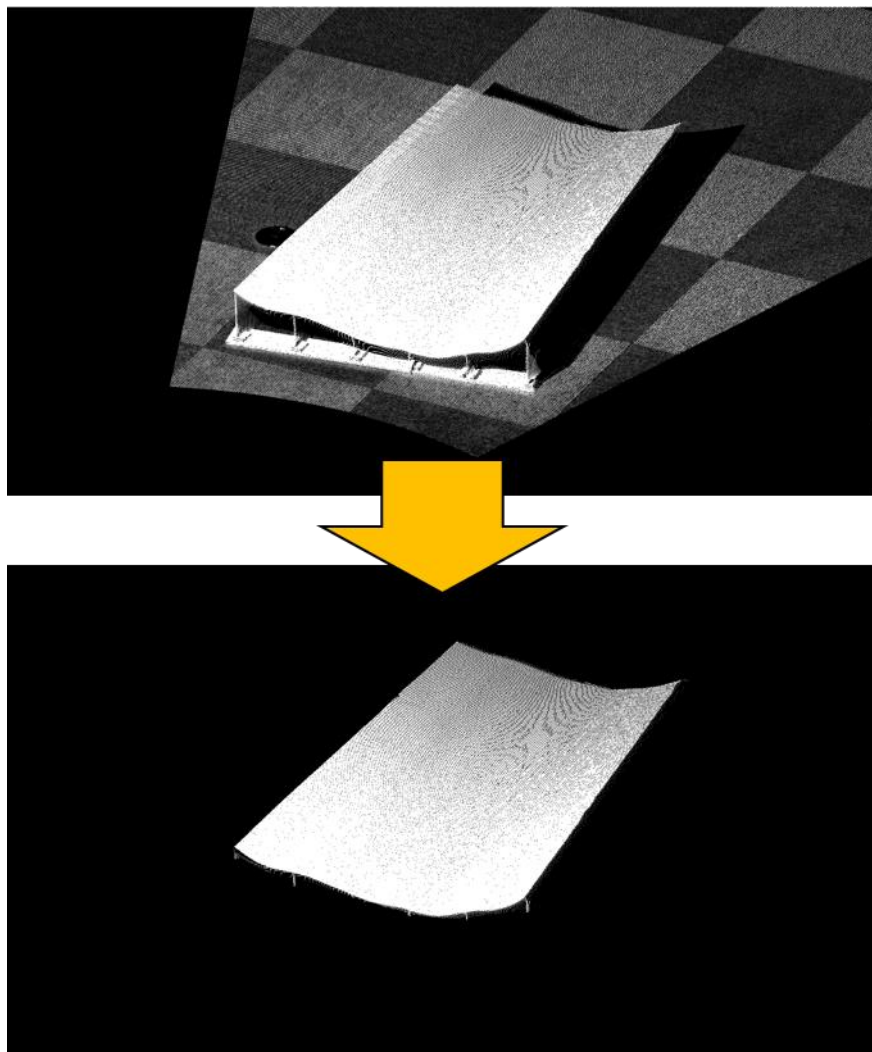


図 5-3 計測データ (上) と外板点群の抽出 (下)

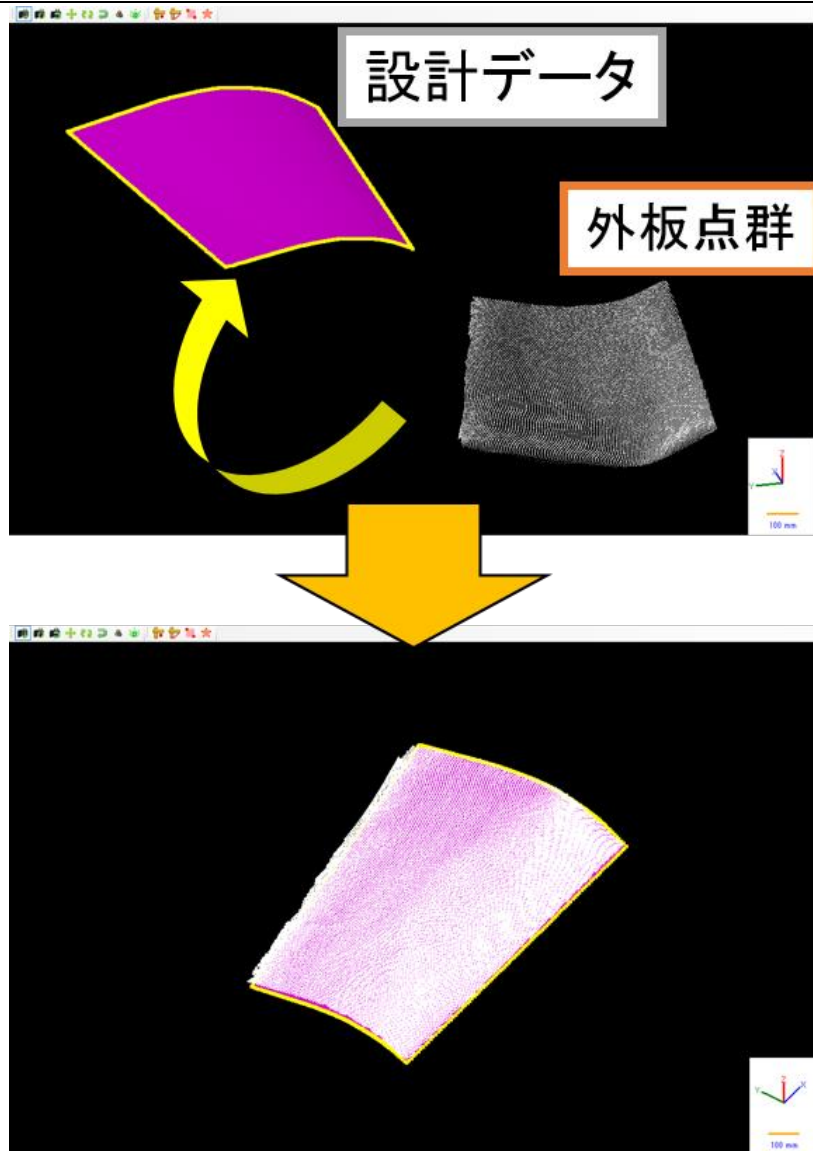


図 5-4 位置合わせの様子

5.4.2 複数方向の計測法曲率の算出

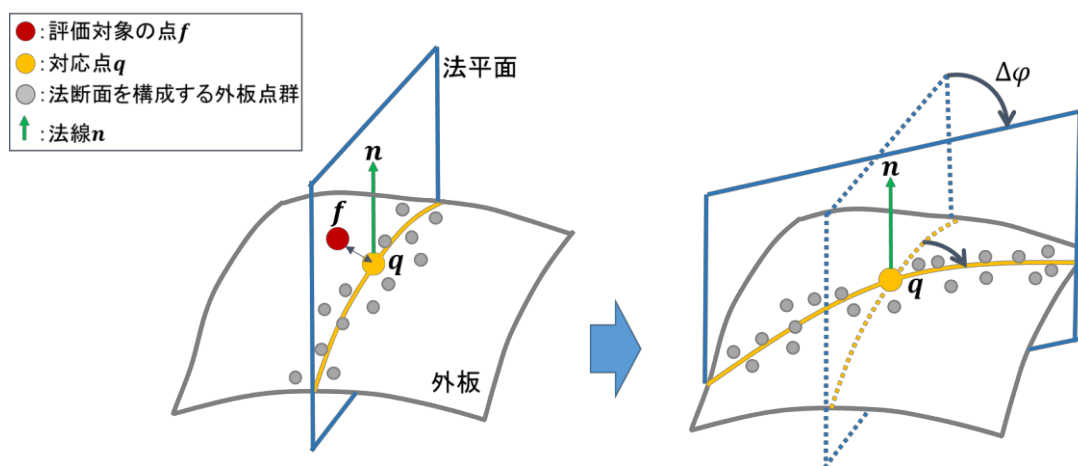


図 5-5 複数方向の計測法曲率の算出のコンセプト

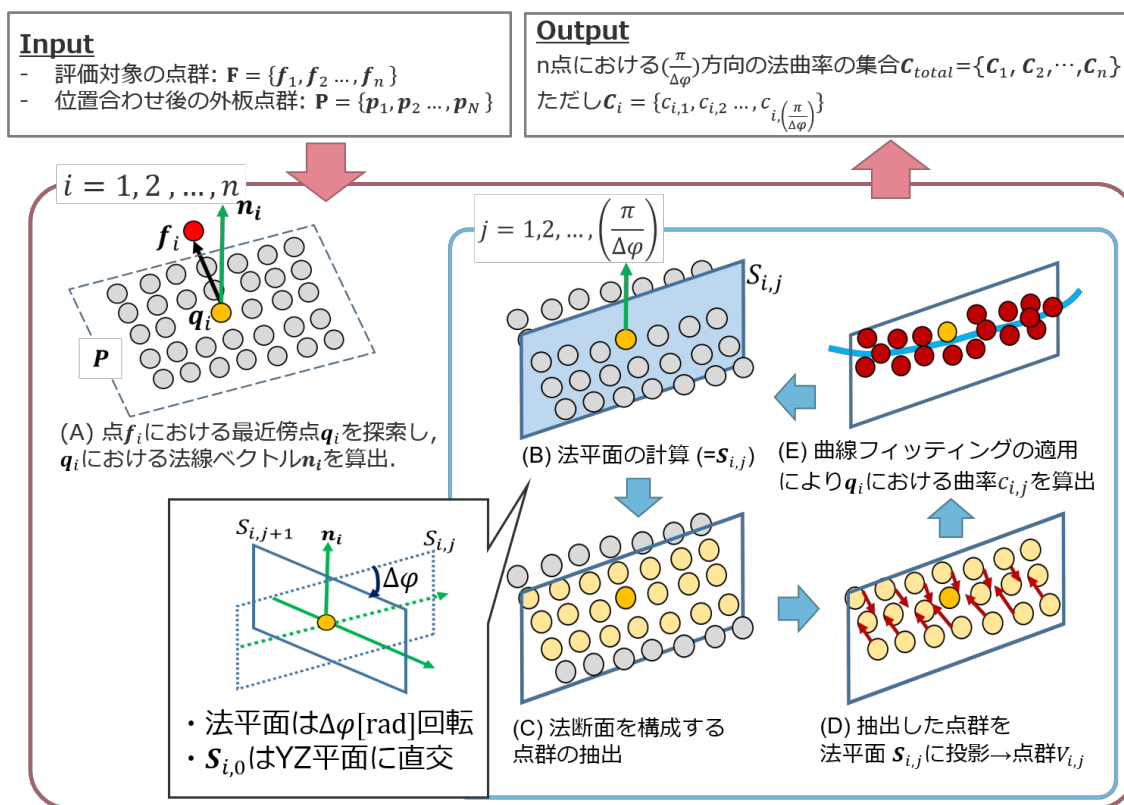


図 5-6 複数方向の計測法曲率の算出フロー

続いて対応点(評価対象の点に対応する外板の計測点)における複数方向の法曲率を算出する。その算出コンセプトを図 5-5 に、具体的なフローを図 5-6 に示す。入力の評価対象の点群 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ と位置合わせ後の外板点群 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ であり、最終的に n

点の対応点における複数方向の法曲率の集合 \mathbf{C}_{total} が出力される。

以下では、 n 個の評価対象の点群 $\mathbf{F} = \{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_n\}$ のうち、点 $\mathbf{f}_i (1 \leq i \leq n, i \in \mathbb{N})$ の対応点の法曲率算出フローを図 5-6 の(A)~(E)に従って説明する。なお点 \mathbf{f}_i は式(5.1)のようなベクトルで表現する。

$$\mathbf{f}_i = [f_{ix} \quad f_{iy} \quad f_{iz}]^T \quad (5.1)$$

A) 対応点と法線ベクトルの算出

3.3.2 で述べた手法を用いて、点群 \mathbf{P} の中から点 \mathbf{f}_i の最近傍点を探索し、その点を(5.2)に示す対応点 \mathbf{q}_i とする。そして点 \mathbf{q}_i の近傍点に対して 3.3.2 の手法で平面フィッティングを適用することで法線ベクトル \mathbf{n}_i を算出する。 \mathbf{n}_i は式(5.3)で示す単位ベクトルである。

$$\mathbf{q}_i = [q_{ix} \quad q_{iy} \quad q_{iz}]^T \quad (5.2)$$

$$\mathbf{n}_i = [n_{ix} \quad n_{iy} \quad n_{iz}]^T \quad (5.3)$$

B) 法平面の計算

曲率を評価する方向を決定する法平面を計算する。ここでは法平面を法線ベクトル \mathbf{n}_i を軸に回転させることで、複数方向の法平面を計算する。その回転角の間隔を $\Delta\varphi$ [rad](ただし、 $(\pi/\Delta\varphi) \in \mathbb{N}$ を満たす)とすると点 \mathbf{q}_i における全 $(\pi/\Delta\varphi)$ 方向の法平面は自然数 $j (1 \leq j \leq (\pi/\Delta\varphi), j \in \mathbb{N})$ を用いて式(5.4)で表される。ここでの $\mathbf{A}_{i,j}$ は点 \mathbf{q}_i の j 番目の法平面 $\mathbf{S}_{i,j}$ を表す方程式の係数行列であり、初期値が式(5.5)で与えられる漸化式(5.6)および(5.7)に従い、計算される。この初期値は、点 \mathbf{q}_i と法線ベクトル \mathbf{n}_i を含み、船体座標系のYZ平面に直交する平面を表す。

$$[a_{i,j} \quad b_{i,j} \quad c_{i,j} \quad d_{i,j}][x \quad y \quad z \quad 1]^T = \mathbf{A}_{i,j}[x \quad y \quad z \quad 1]^T = 0 \quad (5.4)$$

$$\begin{bmatrix} a_{i,1} \\ b_{i,1} \\ c_{i,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ n_{iz} \\ -n_{iy} \end{bmatrix}, \quad d_{i,1} = - \begin{bmatrix} a_{i,1} \\ b_{i,1} \\ c_{i,1} \end{bmatrix}^T \mathbf{q}_i \quad (5.5)$$

$$\begin{bmatrix} a_{i,j+1} \\ b_{i,j+1} \\ c_{i,j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (b_{i,j}n_{iz} - n_{iy}c_{i,j}) & a_{i,j} & n_{ix} \\ (c_{i,j}n_{ix} - n_{iz}a_{i,j}) & b_{i,j} & n_{iy} \\ (a_{i,j}n_{iy} - n_{ix}b_{i,j}) & c_{i,j} & n_{iz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\Delta\varphi) \\ \cos(\Delta\varphi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$d_{i,j+1} = -[a_{i,j+1} \quad b_{i,j+1} \quad c_{i,j+1}]q_i \quad (5.7)$$

C) 法断面を構成する点群の抽出

(B)で算出した法平面のうちの1つである $S_{i,j}$ に着目する。ここでは $S_{i,j}$ と外板曲面との交線である法断面を構成する点群を、外板点群 \mathbf{P} から抽出する。具体的には、 $\mathbf{p}_k \in \mathbf{P}$ である点 $\mathbf{p}_k = [x_k \quad y_k \quad z_k]^T$ と $S_{i,j}$ の距離 H_k を(5.8)に従って計算し、 H_k が閾値 ε 以下ならば、 \mathbf{p}_k を $S_{i,j}$ を構成する点とみなす。この処理を $k = 1, 2, \dots, N$ で繰り返す。

$$H_k = \frac{|A_{i,j}[x_k \quad y_k \quad z_k \quad 1]^T|}{\sqrt{A_{i,j}^T A_{i,j} - d_{i,j}^2}} \quad (5.8)$$

D) 点群の正射影

(C)で抽出された $S_{i,j}$ を構成する点群を $S_{i,j}$ に正射影する。このとき、正射影された点を点群 $\mathbf{V}_{i,j}$ と呼ぶ。

E) 曲線フィッティングと曲率算出

点群 $\mathbf{V}_{i,j}$ を、点 q_i が原点で $S_{i,j}$ の法線方向をZ軸方向とした3次元直交座標系に座標変換を行うと、点群 $\mathbf{V}_{i,j}$ の各点はXY平面上に存在する。その座標変換後の点群 $\mathbf{V}'_{i,j}$ に対して3.3.6で述べた2次の重み付き曲線フィッティングを適用する。この時、 $\mathbf{V}'_{i,j}$ の各点のZ座標は全て0である。そしてフィッティングされた2次曲線を用いて、原点における曲率 $c_{i,j}$ を式(3.28)に従い算出する。 $c_{i,j}$ は点 f_i の対応点 q_i におけるj番目の法曲率(計測法曲率)である。

そして(C)~(E)を、 $j = 1, 2, \dots, (\pi/\Delta\varphi)$ で繰り返すことで、点 f_i に関する複数方向の計測法曲率の集合 $\mathbf{C}_i = \{c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,(\pi/\Delta\varphi)}\}$ が算出される。

以上のフローを全ての評価対象の点群 \mathbf{F} に対して適用することで、計測法曲率の集合 $\mathbf{C}_{total} = \{\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_n\}$ が出力される。

5.4.3 所要収縮量を指標とした加熱指示情報の生成

5.4.3.1 所要収縮量の算出

算出した加工途中の外板の法曲率と、設計データから得られる法曲率を比較しその誤差を計算する。本研究では Sun ら[18]が使用した「所要収縮量」をベンチマークとして用いる。これは指定箇所の曲率誤差に起因する収縮量を定量化する指標であり、加熱による板曲げを行う際に単位長さ当たり要求される縮み長さの割合を表す。

本エンジンでは Sun らの手法に従い、評価対象の点群 $\mathbf{F} = \{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_n\}$ における複数方向の所要収縮量 $\mathbf{E}_{total} = \{\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_n\}$ を計算する。 \mathbf{E}_{total} の要素である $\mathbf{E}_i = \{e_{i,1}, e_{i,2}, \dots, e_{i,(\pi/\varphi)}\}$ ($1 \leq i \leq n, i \in \mathbb{N}$) は、点 \mathbf{f}_i における複数方向の所要収縮量の集合を表し、式(5.9)に従って計算される。 $e_{i,j}$ ($1 \leq j \leq (\pi/\varphi), j \in \mathbb{N}$) は点 \mathbf{f}_i における j 番目の所要収縮量を指す。また $c_{i,j}$ は 5.4.2 で算出した点 \mathbf{f}_i の対応点 \mathbf{q}_i における j 番目の計測法曲率、 $m_{i,j}$ は点 \mathbf{f}_i における j 番目の設計法曲率、 h は板厚を指す。

ここで $e_{i,j}$ が正の値となる場合は曲がり不足のため加熱曲げが必要で、負の値となる場合は曲がり過ぎのため裏焼きによる修正加熱が必要であると解釈される。

$$e_{i,j} = \frac{\left(\frac{1}{c_{i,j}} - \frac{1}{m_{i,j}}\right) \times \frac{h}{2}}{\frac{1}{c_{i,j}} \times \left(\frac{1}{m_{i,j}} + \frac{h}{2}\right)}, \quad j = 1, 2, \dots, \frac{\pi}{\varphi} \quad (5.9)$$

なお設計法曲率 $m_{i,j}$ に関しては、事前に曲面と法平面の交線から解析的に算出しておく。点 \mathbf{f}_i における曲面の法線ベクトルを \mathbf{n}'_i としたとき、 j 番目の法平面は方程式(5.10)を満たす。このとき係数行列 $\mathbf{A}'_{i,j}$ は初期値が(5.11)で与えられる漸化式(5.12)および(5.13)に従い計算される。そして $\mathbf{A}'_{i,j}$ と点 \mathbf{f}_i を用いて 3.2.4 で述べた方法を用いて、設計法曲率 $m_{i,j}$ を算出する。

$$[a'_{i,j} \quad b'_{i,j} \quad c'_{i,j} \quad d'_{i,j}][x \quad y \quad z \quad 1]^T = \mathbf{A}'_{i,j}[x \quad y \quad z \quad 1]^T = 0 \quad (5.10)$$

$$\begin{bmatrix} a'_{i,1} \\ b'_{i,1} \\ c'_{i,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n'_{i,z} \\ 0 \\ -n'_{i,x} \end{bmatrix}, \quad d'_{i,1} = - \begin{bmatrix} a'_{i,1} \\ b'_{i,1} \\ c'_{i,1} \end{bmatrix}^T \mathbf{f}_i \quad (5.11)$$

$$\begin{bmatrix} a'_{i,j+1} \\ b'_{i,j+1} \\ c'_{i,j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (b'_{i,j}n'_{i_z} - n'_{i_y}c'_{i,j}) & a'_{i,j} & n_{i_x} \\ (c'_{i,j}n'_{i_x} - n'_{i_z}a'_{i,j}) & b'_{i,j} & n_{i_y} \\ (a'_{i,j}n'_{i_y} - n'_{i_x}b'_{i,j}) & c'_{i,j} & n_{i_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\Delta\varphi) \\ \cos(\Delta\varphi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$$d'_{i,j+1} = -[a'_{i,j+1} \quad b'_{i,j+1} \quad c'_{i,j+1}] \mathbf{f}_i \quad (5.13)$$

5.4.3.2 加熱指示情報の生成

5.4.3.1 で算出した評価対象点における複数方向の所要収縮量を用いた、加熱指示情報の生成について説明を行う。そのフローを図 5-7 に示す。加熱指示情報とは、「加熱箇所」の 3 次元位置座標、「加熱線の進行方向を表す方向ベクトル」、「所要収縮量」、「加熱線の長さ」の情報を持つ加熱指示線の集合であると定義する。

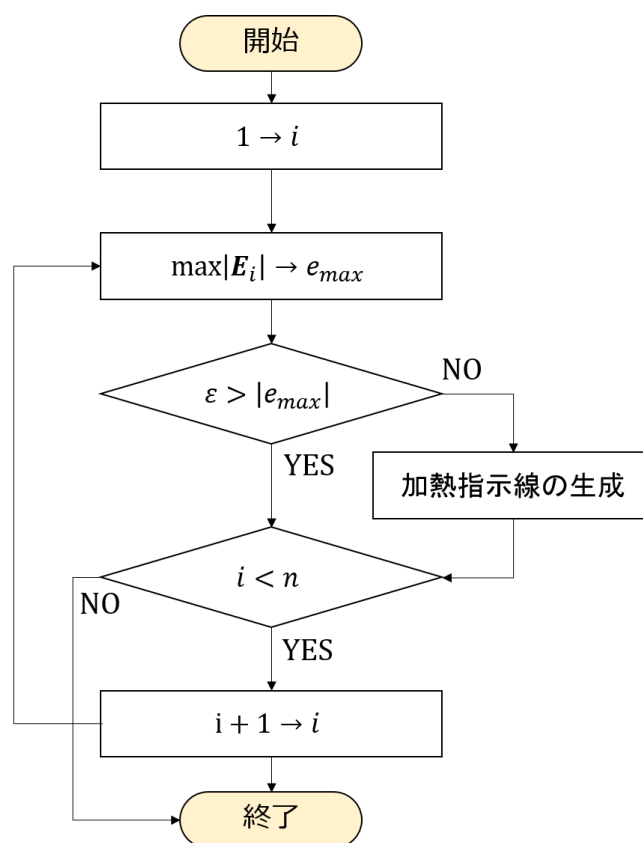


図 5-7 加熱指示情報の生成フロー

i 番目 ($i = 1, 2, \dots, n$) の評価対象の点 \mathbf{f}_i における、複数方向の所要収縮量の集合 \mathbf{E}_i の要素

のうち、絶対値が最大となる値を e_{max} とする。またその方向に対応する法平面を $S_{i,max}$ とする。このとき e_{max} の絶対値が閾値 ε 以上ならば、加熱による修正が必要であると判定し、加熱指示線を生成する。生成する加熱指示線は、法平面 $S_{i,max}$ の法線ベクトルを方向ベクトルに持ち、点 f_i の対応点 q_i を中心として両方向に伸びた長さ L の線分とする。 L の値は、ユーザ側が設定するものとする。加熱指示線生成の概略を図 5-8 に示す。以上のプロセスを全 n 個の評価対象の点に対して適用することで、加熱指示情報が生成される。

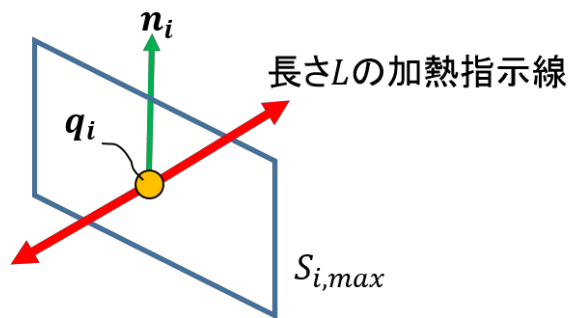


図 5-8 加熱指示情報の生成の概略図

5.4.4 可視化と出力

最後に、生成した加熱指示情報を可視化および出力する。前述の通り、生成された加熱指示は「加熱箇所の 3 次元位置座標」、「加熱線の進行方向を表す方向ベクトル」、「所要収縮量」、「加熱線の長さ」を情報として持つ。従って図 5-9 に示すように、線分上に一定間隔で点をプロットすることで、点群形式への変換が可能である。このとき隣り合う点どうしの距離を T とし、両端はデータに必ず含まれるものとする。また所要収縮量の値が正の場合は赤色、負の場合は青色の情報を点群に付与する。変換された点群を 3D ビューワで可視化した様子を図 5-10 に示す。これは、8 本の「追加の曲げの加熱線」が赤色で描画され、2 本の「曲げ過ぎの修正の加熱線」が青色で描画されている例である。

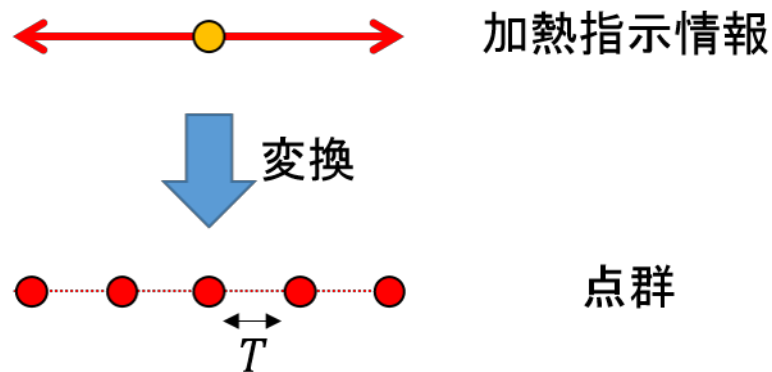


図 5-9 加熱指示情報の点群への変換

また本エンジンではレーザスキャナによる計測データを座標変換することで、設計データに位置合わせを行っている。すなわち出力される加熱指示の点群は、設計データの座標系をワールド座標座標系としている。一方で第 6 章で説明する指示投影エンジンは、レーザスキャナを原点とした座標系をワールド座標系としている。従って本エンジンで生成した加熱指示の点群を指示投影エンジンに入力する際には、「設計データから計測データ」への逆変換により、レーザスキャナを原点とした座標系に戻したデータを渡す必要がある。そこで 5.4.1 の位置合わせのプロセスで保持しておいた「計測データから設計曲面データ」への座標変換行列を用いて、出力された加熱指示線の点群の逆変換を行う。逆変換された点群はテキストファイルで保存され、指示投影エンジンの入力となる。

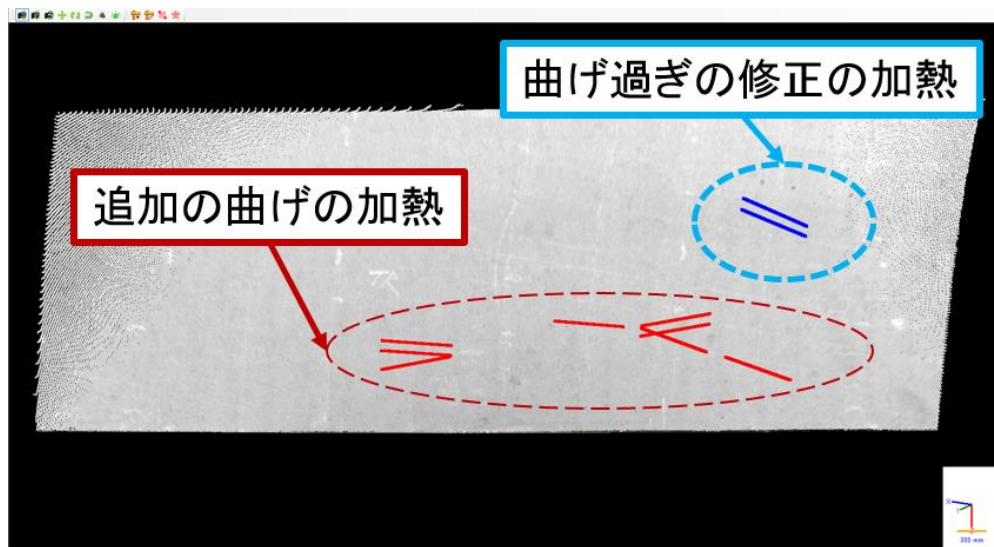


図 5-10 3次元ビューワ上での加熱指示線の可視化

5.5 開発したソフトウェア

4.4.2 で述べたように、本エンジンのソフトウェアは Pupulpit[39]のプラグインとして開発を行った。以下では開発したソフトウェアについて説明する。まず 5.5.1 ではデータを格納するフォルダ構成について述べる。5.5.2 で Pupulpit へのデータ入力について述べ、5.5.3 で開発したプラグインについて詳細に説明を行う。

5.5.1 フォルダ構成

開発したソフトウェアのフォルダ構成を図 5-11 に示す。入力データとなる3つのファイルのうち、設計曲面データと評価対象の点群は「設計データフォルダ」に、外板の計測点群は「計測データフォルダ」にそれぞれ格納する。

そして 5.5.3.1 で後述する操作により、評価対象の各点の、複数方向の設計法曲率のデータが算出され、CSV 形式のテキストファイルで「設計法曲率フォルダ」に格納される。また計測したデータを用いて一度解析を実行すると、実行開始時点の時刻をフォルダ名とする「解析結果フォルダ」が作成される。解析結果フォルダの中には、各点の計測曲率や所要収縮量を記録した解析結果と加熱指示情報、そして解析時のパラメータが CSV 形式で格納される。また加熱指示線の点群も、同じ「解析結果フォルダ」に CSV 形式で格納される。

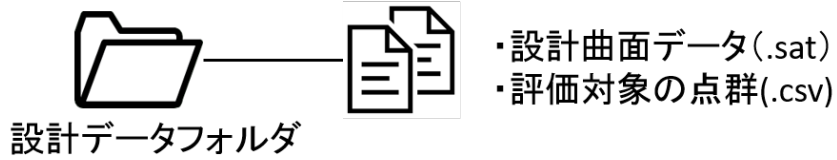
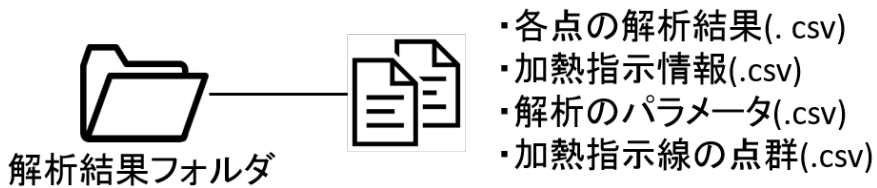
入力出力

図 5-11 加熱指示生成エンジン：ソフトウェアのフォルダ構成

5.5.2 データの読み込み

図 5-12 のようにファイルの選択画面を開き、入力するファイルを選択することで、エンジンに入力するデータを読み込む。ここで事前に読み込むデータは、(1)設計曲面データ及び(2)評価対象の点群、そして(3)外板の計測点群である。

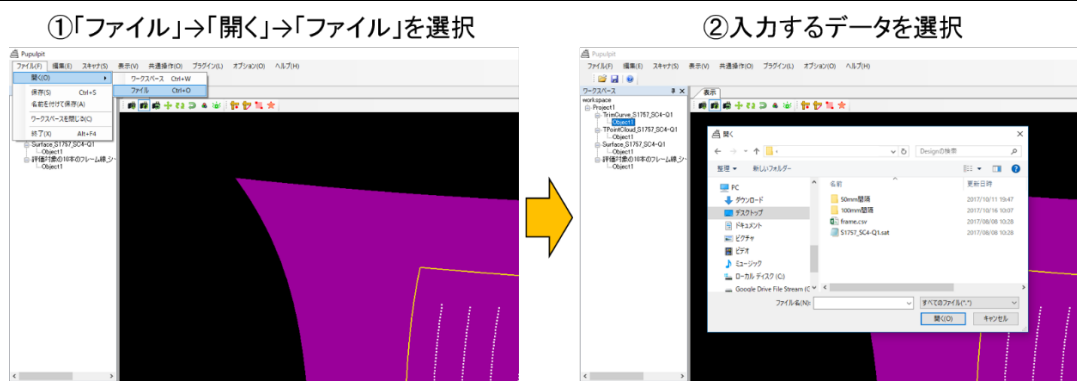


図 5-12 入力データの選択と読み込み

5.5.3 開発したプラグインによる解析と可視化

ここでは開発したプラグインについて説明する。なおプラグインを実行する際には、5.5.2 で述べたデータの読み込みが完了していることを前提とする。

5.5.3.1 設計法曲率の算出

「プラグイン→加熱指示生成エンジン→設計データ生成」の順で選択を行うと、図 5-13 の入力ウィンドウが立ち上がる。そして 5.5.2 で読み込んだ曲面データとトリムカーブ、および評価対象の点群を、プルダウン選択で選び、法平面の回転角度を入力して「計算開始」ボタンをクリックする。評価対象の点群の各点における、複数方向の設計法曲率を算出し、指定した「設計法曲率フォルダ」に CSV 形式のテキストファイルが点数分だけ出力される。なお各ファイル内に含まれるデータは、「その点の座標」、「各方向の法曲率」の 2 種類である。

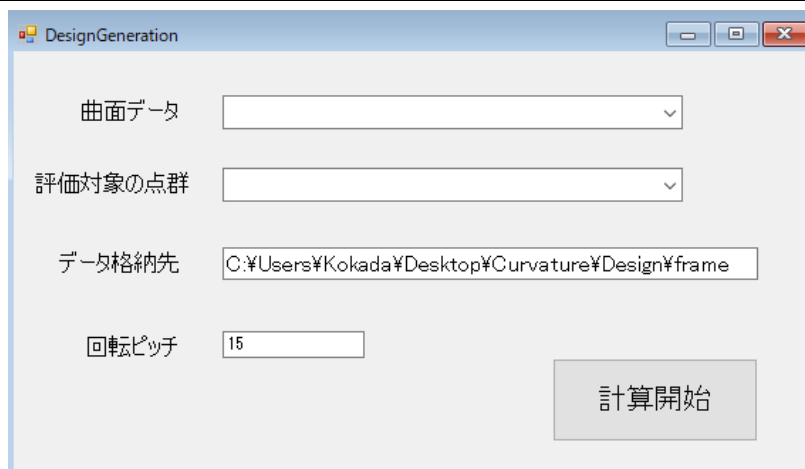


図 5-13 データの選択と設計法曲率の算出の実行

5.5.3.2 外板点群の抽出から曲率誤差の評価までの実行

まず図 5-14 のように、計測データのうち外板の中央付近の点を、シード点として選択しておく。「プラグイン→加熱指示生成エンジン→任意方向の曲率評価」の順で選択を行うと、図 5-15 の入力ウィンドウが立ち上がるので、プルダウン選択で各データを選択する。また解析に用いるパラメータは初期値が入力されているが、変更がある場合はその値をキーボード入力に変更する。そして「OK」ボタンを押すと、5.4.1, 5.4.2, 5.4.3 のプロセスが順に行われる。なお設計法曲率の値は、5.5.3.1 で出力したファイルを読み込み使用する。

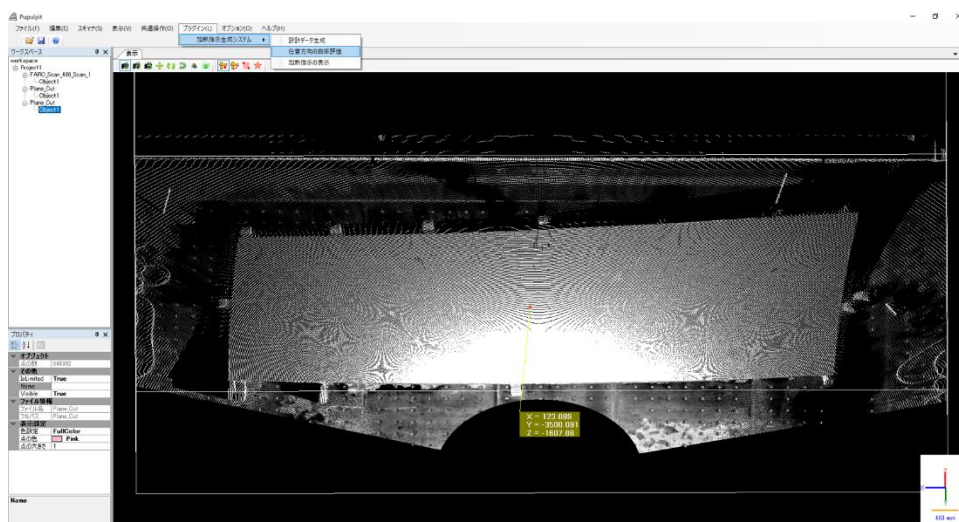


図 5-14 シード点の選択とプラグインの実行

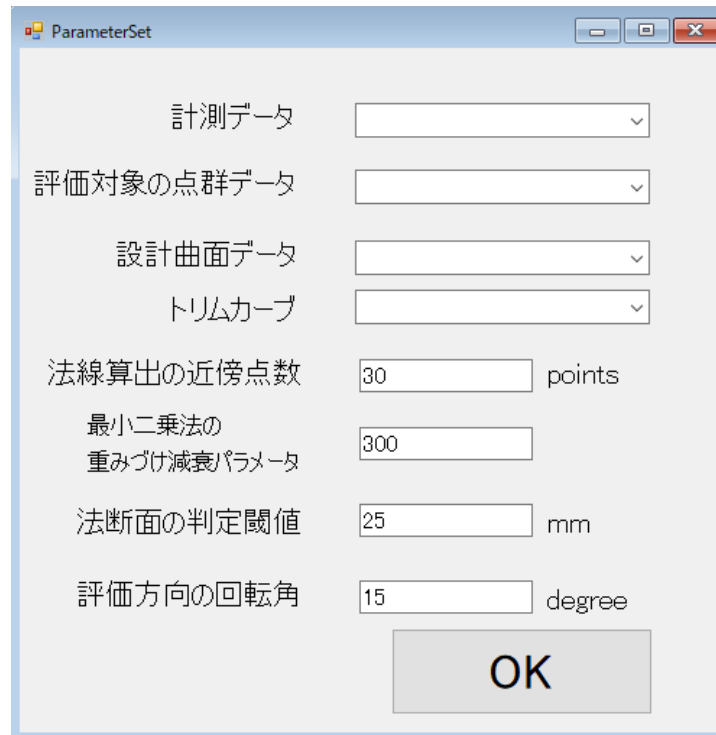


図 5-15 データ入力とパラメータ設定

計算の終了後、5.5.1 で説明したように「各点の解析結果」のファイルが点数分だけ出力され、「解析結果フォルダ」に格納される。そのファイル内のデータ構造を図 5-16 に示す。このように、「評価対象の点の 3 次元座標」、「対応点の 3 次元座標」が保存され、その下には各方向の「所要収缩量」、「計測法曲率」、「設計法曲率」、「法平面の係数」が列ごとに対応するように保存されている。この例の場合は、5 方向の曲率を評価したので、5 列のデータとなっている。

	A	B	C	D	E	
1	Points					対応点の3次元座標
2	-2244.84	11903.06	19653.3			
3	-2250	11909.68	19656.71			評価対象の点の3次元座標
4						
5	Curvature Error					所要収縮量
6	-1.39E-05	-1.95E-05	-2.06E-05	-4.31E-05	-6.27E-05	
7						
8	Scan Curvature					計測法曲率
9	7.62E-06	1.48E-05	3.14E-05	5.80E-05	8.40E-05	
10						
11	Design curvature					設計法曲率
12	4.84E-06	1.09E-05	2.72E-05	4.94E-05	7.14E-05	
13						
14	Plane coefficient					法平面の係数
15	0	-0.19512	-0.37694	-0.53307	-0.65288	
16	0.273013	0.157879	0.031986	-0.09609	-0.21761	
17	0.824223	0.831193	0.78152	0.678586	0.529409	
18	-19448.4	-18652.9	-16586.3	-13389.4	-9279.99	

図 5-16 解析結果のデータ構造

5.5.3.3 加熱指示情報の生成と可視化

5.5.3.2 の解析の終了後、「プラグイン→加熱指示の生成」をクリックすると、図 5-17 に示す加熱指示の生成ウィンドウが表示される。ここでは 5.4.3.2 で述べた加熱指示の生成を行う際の閾値と加熱指示線の長さを設定し、「解析結果フォルダ」のパスを入力する。「OK」をクリックすると加熱指示情報が生成され、「解析結果フォルダ」に図 5-18 に示す CSV 形式のテキストファイルで格納される。また生成された加熱指示情報は 5.4.4 に述べたように点群形式に変換されたのちに、Pupulpit の表示ビュー上に加熱指示線が描画される。

図 5-17 加熱指示の生成用ウィンドウ

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-3746.69	11542.21	21877.39	-0.20234	0.050832	0.85921	-0.000296	1000
2	-3755.12	11505.29	21674.12	-0.78177	-0.4061	0.07541	-0.000265	1000
	加熱箇所の3次元位置座標			方向ベクトル			所要収縮量	長さ

図 5-18 加熱指示情報の保存形式

5.5.3.4 指示投影エンジンの入力データへの変換

「プラグイン→加熱指示生成エンジン→SAR への出力」をクリックすると、図 5-19 に示すウィンドウが表示される。変換を行う加熱指示線をプルダウンで選択し「OK」ボタンをクリックすると変換と保存が実行される。具体的には、解析結果フォルダ以下に result.csv というファイル名で、レーザスキャナを原点とした座標系に逆変換された加熱指示線の点群が保存される。なお、保存先やファイル名は変更が可能である。第 6 章で述べる指示投影エンジンは、この点群を入力として使用する。

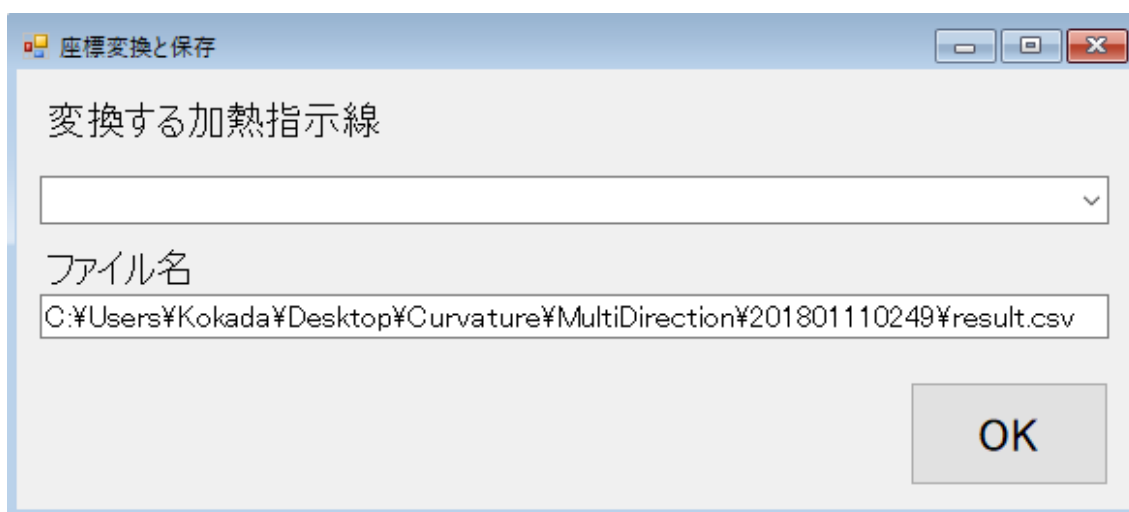


図 5-19 指示投影エンジンに入力するためのデータ変換を行うウィンドウ

第6章 指示投影エンジンの開発

6.1 はじめに.....	71
6.2 概要.....	71
6.3 エンジンの機能.....	72
6.3.1 プロジェクタのキャリブレーション.....	72
6.3.2 投影画像の生成と投影.....	72
6.4 開発したソフトウェア.....	73
6.4.1 フォルダ構成.....	73
6.4.2 各機能の実行.....	74

6.1 はじめに

本章では、加熱加工指示システムを構成するエンジンとして開発した、指示投影エンジン(以下、本エンジンまたはエンジン)について説明する。

6.2 概要

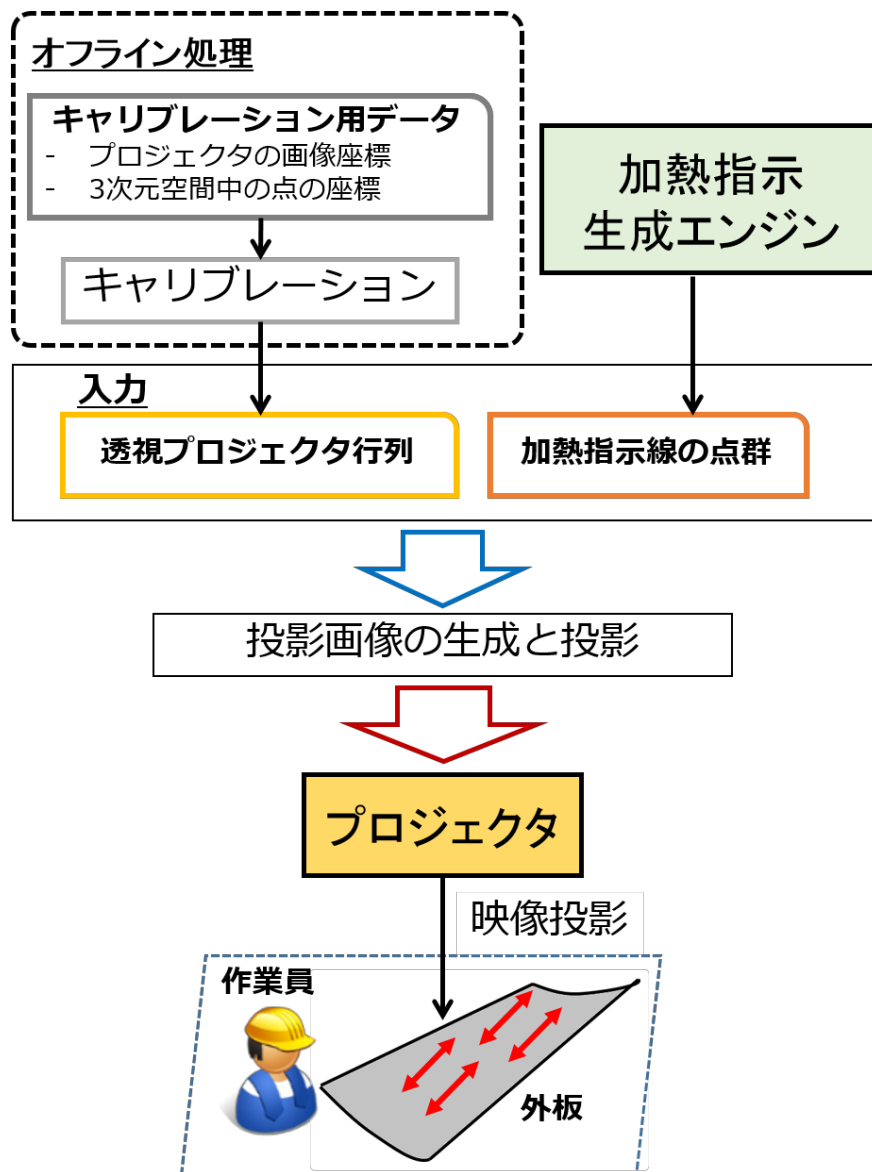


図 6-1 指示投影エンジンの概要図

図 6-1 に本エンジンの概要を示す。入力するデータは、使用するプロジェクタの透視プロジェクタ行列と加熱指示生成エンジンから出力された加熱指示線の点群である。透視プロジェクタ行列は、オフライン処理により事前にプロジェクタのキャリブレーションを行う事で用意する。本エンジンは上記の入力データを用いて加熱箇所を指示する投影画像を生成し、プロジェクタから外板の該当箇所に映像の投影を行う。

6.3 エンジンの機能

本エンジンが有する機能は以下の 2 つである。本節では、それぞれについて述べる。

6.3.1 プロジェクタのキャリブレーション

映像投影に使用する、プロジェクタのキャリブレーションを 3.4.2 で述べた手法で実行する。具体的には Raskar ら[47]の手法などによりプロジェクタの画像上の点と対応する 3 次元空間中の点の座標の組み合わせを 6 点以上用意し、3.4.2 で述べた最適化を適用する。そして透視プロジェクタ行列を出力し、テキストデータの形式で計算機内に保存する。キャリブレーションは、プロジェクタの位置座標と向きが変わらない限り、一度実行するだけで良い。

本研究で提案する加熱加工指示システムの場合、4.4.1.2 で述べたようにレーザスキャナとプロジェクタの相対位置関係は固定するため、キャリブレーションはオフライン処理にて実行する。何らかの理由でレーザスキャナとプロジェクタの位置関係が変化する場合に、再度キャリブレーションを実行する。

6.3.2 投影画像の生成と投影

6.3.1 で出力した透視プロジェクタ行列と加熱指示線の点群を用いて、プロジェクタから投影する為の投影画像を生成し、プロジェクタから投影する。具体的には、3.4.3 で述べた方法でプロジェクタと同じ解像度でビットマップ画像の形式で生成する。そしてプロジェクタの入力となるスクリーンに、スクリーンと同じサイズで枠の無いウィンドウを立ち上げ、そのウィンドウの全画面に画像を描画する。プロジェクタは外板に向かって映像を投影し、板上に指示映像を映し出す。

なお本エンジンを用いることで、色情報を持つ点群データならば、任意のデータを投影することができる。図 6-2 に指示生成エンジンを用いてカラーマップの投影を行ったデモンスト

レーションを示す。これは外板の模型に対して稗方らの精度評価システム[6]を適用し、出力した精度評価カラーマップを模型上に投影した例である。このように、加熱指示線に限らず、様々な指示映像の投影への拡張が可能である。

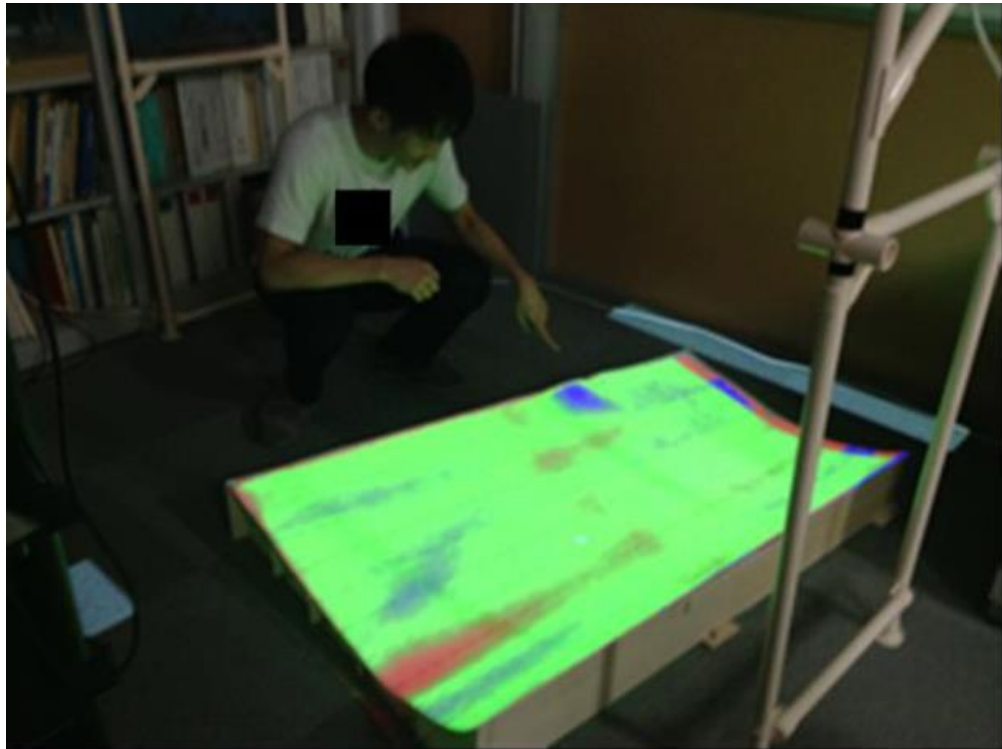


図 6-2 指示投影エンジンを用いた投影の例[43]

6.4 開発したソフトウェア

6.4.1 フォルダ構成

開発したソフトウェアのフォルダ構成を図 6-3 に示す。入力データとなる 2 つのファイルのうち加熱指示線の点群は、5.5.1 で述べたように加熱指示生成エンジンが生成した「解析結果フォルダ」に格納されているものを、透視プロジェクタ行列は「キャリブレーションフォルダ」内に格納したものを用いる。なお、オフライン処理でキャリブレーションを実行する際は、「プロジェクタフォルダ」内の「キャリブレーションフォルダ」に使用するデータを格納する。

6.4.2.2 で後述する操作により、生成するビットマップ形式の投影画像は、「生成画像フォル

ダ」に格納される。

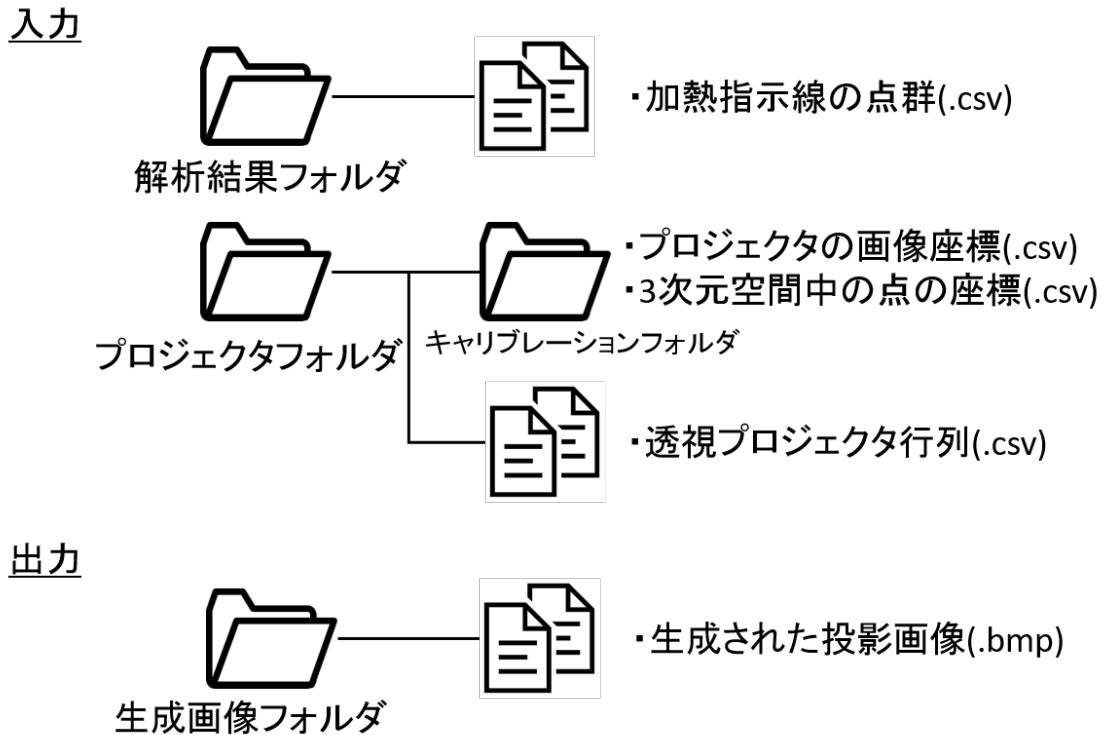


図 6-3 指示投影エンジン：ソフトウェアのフォルダ構成

6.4.2 各機能の実行

指示投影エンジンのソフトウェアの概要を図 6-4 に、実行時に起動するウィンドウを図 6-5 に示す。ソフトウェアは①プロジェクトのキャリブレーションの実行と②投影画像の生成と投影の 2 つの機能を実行することが出来る。以下、それらの実装を行ったソフトウェアについて述べる。なおソフトウェアの開発には、Windows アプリケーションの実装を行える Microsoft .NET Framework 4.5.2 をフレームワークとして用いる。

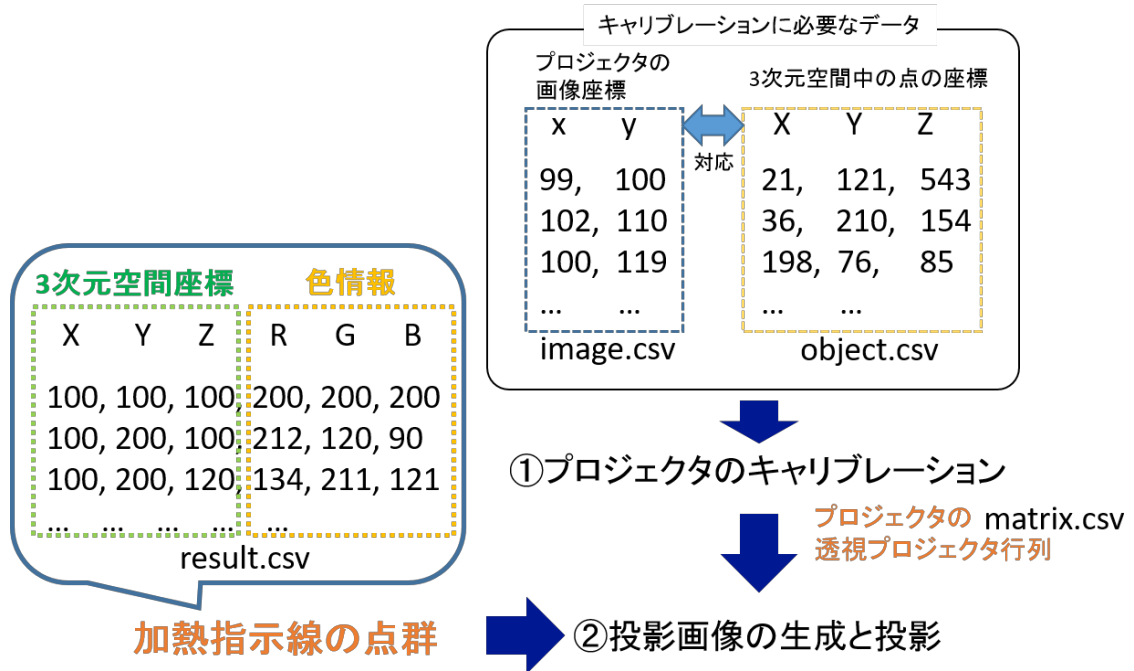


図 6-4 指示投影エンジンのソフトウェア概要

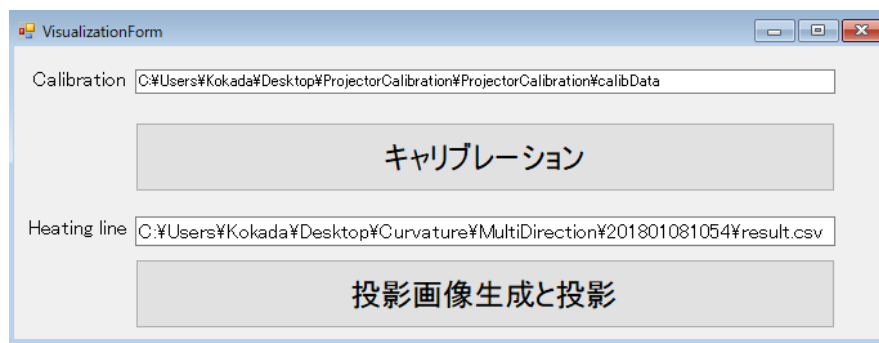


図 6-5 指示投影エンジンの実行用ウィンドウ

6.4.2.1 プロジェクタのキャリブレーション

「キャリブレーション」ボタンをクリックすると、プロジェクタのキャリブレーションを行うことができる。このとき「Calibration」とラベルが振られているテキストボックスには、「キャリブレーションフォルダ」のパスを入力する。「キャリブレーションフォルダ」内には、プロジェクタの画像座標を格納した CSV 形式のテキストファイル image.csv と、それに対応する 3 次元空間中の点の座標を格納した CSV 形式のテキストファイル object.csv を格納しておく。そしてそれぞれのデータを読み込み、3.4.2 で述べた手法によりキャリブレーションが実行される。算出された透

視プロジェクタ行列は CSV 形式のテキストファイル `matrix.csv` として、「プロジェクタフォルダ」以下に以下に保存される。

6.4.2.2 投影画像の生成と投影

「指示投影」ボタンをクリックすると、投影映像となるビットマップ形式の画像を生成する。そしてプロジェクタの入力となるスクリーンに、スクリーンと同じサイズで枠の無いウィンドウを新規に立ち上げ、そのウィンドウの全画面に画像を描画する。生成された投影画像は、生成された時刻をファイル名として、「生成画像フォルダ」に保存される。

このとき” Heating Line”とラベルが振られているテキストボックスには、投影を行うデータが格納されている「解析結果フォルダ」のパスを入力する。そして透視プロジェクタ行列は「プロジェクタフォルダ」以下の `matrix.csv` を読み取ることで取得する。

第7章 実験によるシステムの検証と評価

7.1 はじめに	78
7.2 テストデータを用いた法曲率算出の精度の検証	78
7.2.1 目的	78
7.2.2 レーザスキャナ・シミュレータ	78
7.2.3 検証方法	79
7.2.4 結果	82
7.3 実環境における法曲率算出の実用性の評価	84
7.3.1 目的	84
7.3.2 実験環境	85
7.3.3 実験方法	89
7.3.4 結果と評価	93
7.4 加熱指示生成エンジンの実現可能性の評価	95
7.4.1 目的	95
7.4.2 実験環境	96
7.4.3 実験方法	96
7.4.4 結果と評価	97
7.5 指示投影エンジンを用いた加熱指示実験	102
7.5.1 目的	102
7.5.2 プロトタイピング	102
7.5.2.1 作成したプロトタイプと使用する外板の模型	102
7.5.2.2 プロジェクタのキャリブレーションの実行	105
7.5.2.3 デモンストレーション：カラーマップの投影	106
7.5.3 実験方法	107
7.5.3.1 実験準備	108
7.5.3.2 実験手順	110
7.5.4 結果	112
7.6 まとめ	113

7.1 はじめに

本章では開発した外板の加熱加工指示システムの評価を目的とし、各エンジンごとにごとに行った実験について述べる。

7.2 テストデータを用いた法曲率算出の精度の検証

7.2.1 目的

レーザスキャナによる計測の誤差が、加熱指示生成エンジンを用いた法曲率算出の精度に与える影響を検証する。具体的には、レーザ照射方向の計測誤差を持つテストデータの法曲率を加熱指示生成エンジンを用いることで算出し、真の法曲率を比較することで感度解析を行う。

7.2.2 レーザスキャナ・シミュレータ

レーザスキャナは、計測ターゲットとの位置関係によって取得される点群の形状や密度が異なり、さらに計測精度も照射方向に一定のばらつきが生じる。そこで計測ターゲットの形状と仮想的なレーザスキャナのパラメータを入力することで、疑似的な計測データを出力するシミュレータを構築する。

シミュレータはスキャナを想定したモデル(以下、スキャナモデル)の位置座標、計測精度、照射角間隔を属性として持ち、計測ターゲットをその表面の関数および定義域を入力することで表現する。図 7-1 に示すようにスキャナモデルを中心とした座標系は点 S_o を原点とし、ベクトル S_x , S_y , S_z を基底に持つ 3 次元直交座標系で表される。シミュレータを稼働させると、スキャナモデルは偏角 ϕ および仰角 θ の方向に等角度間隔で、疑似的にレーザ光の方向を変化させながら照射し、光線と計測ターゲットの交点を求めて点群形式の計測データを生成する。このときスキャナの特性に従い、奥行き方向に乱数を用いて標準正規分布 $N(0, \sigma)$ に従う計測誤差 δ を発生させることで、交点のベクトル \mathbf{p} を式(7.1)で表現する。ここで d はスキャナモデルと交点間の距離、 \mathbf{a} は式(7.2)を満たす照射方向の単位方向ベクトルである。

$$\mathbf{p} = S_o + (d + \delta)\mathbf{a} \quad (7.1)$$

$$\mathbf{a} = \sin \theta \cos \varphi \mathbf{S}_x + \sin \theta \sin \varphi \mathbf{S}_y + \cos \theta \mathbf{S}_z \quad (7.2)$$

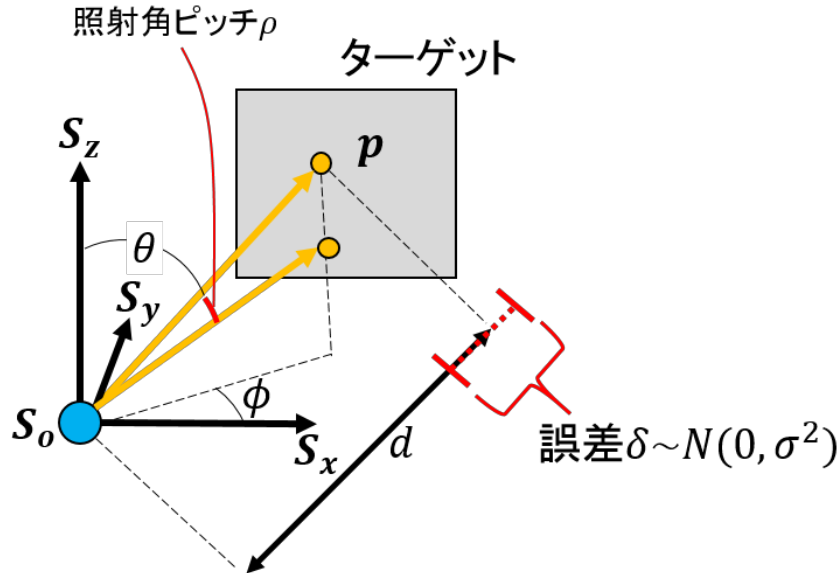


図 7-1 レーザスキャナ・シミュレータ

7.2.3 検証方法

まず 7.2.2 で述べたシミュレータを実装し、均一な曲率を持つ円筒モデルをターゲットとして疑似的な計測データを生成した。次に生成した計測データに対して加熱指示生成エンジンを適用し、評価対象点における複数方向の法曲率の算出を行った。以下にその詳細を述べる。

使用した円筒モデルとスキャナモデルの位置関係を図 7-2 に、円筒モデルの変数を表 7-1 に示す。モデルは X 軸および Y 軸に関して対称であり、原点 O にて XY 平面と接する。また X 軸方向に円筒が伸びており、Z 軸の正方向に凸である。なおスキャナモデルの位置座標 \mathbf{S}_o は $\mathbf{S}_o = (0, 3000, 2000)$ とし、 $\mathbf{S}_x \mathbf{S}_y$ 平面は XY 平面に平行になるように設定した。

評価対象の点群は、整数 $k = 0, 1, 2, \dots, 16$ としたときに、式(7.3)で表される計 17 つの平面と円筒モデルの各交線上に Y 座標の間隔が等間隔 200mm になるように設置した。ただし評価対象の点群のうち円筒モデルの 4 周上に存在する点に関しては、曲線フィッティングに用いる十分な点数が確保できないと考えられるため、評価対象の点群から除外した。従って評価対象の点群の個数は、合計 238 点である。評価対象の点群の様子を図 7-3 に示す。

表 7-1 円筒モデルの変数

X 軸方向長さ	3,000mm
Y 軸方向長さ	9,000mm
曲率半径	20,000mm

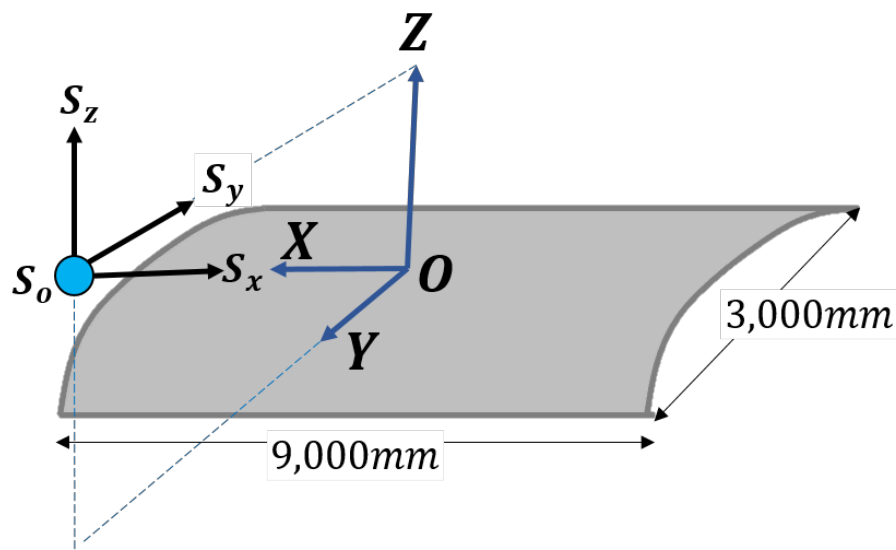


図 7-2 使用した円筒モデルとスキャナの関係

$$X = (500 * k) - 4000 \quad (7.3)$$

実験では、表 7-2 に従い計測誤差 δ の計算に用いる標準正規分布の標準偏差 σ と、照射角間隔 ρ を変動させることで計 9 通り計測データを生成する。ここで照射角間隔 ρ はスキャナの照射角の偏角 ϕ および仰角 θ を変化させる間隔であり、計測の解像度を調整することができる変数である。 ρ が小さいほど生成される点群の密度は高くなる。

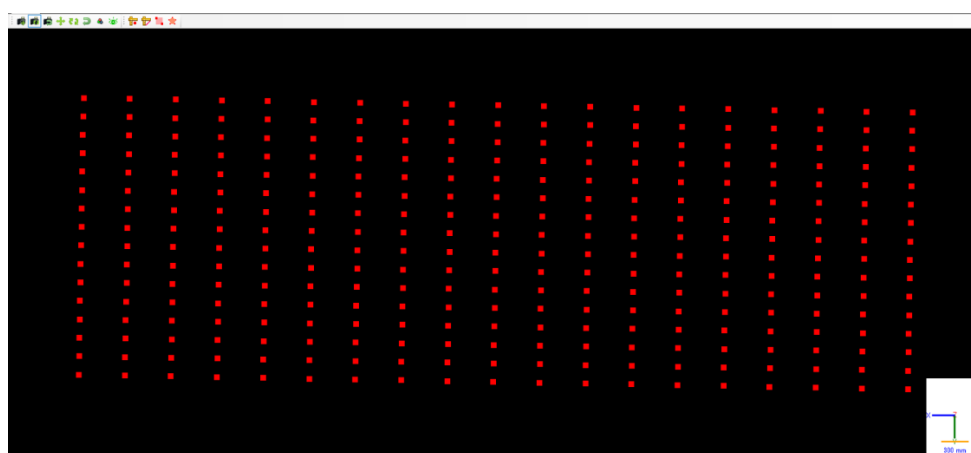


図 7-3 評価対象の点群

表 7-2 シミュレータの設計変数の組み合わせ

ρ [degree]	$\sigma = 2$ [mm]	$\sigma = 4$ [mm]	$\sigma = 6$ [mm]
0.20	(A)	(B)	(C)
0.15	(D)	(E)	(F)
0.10	(G)	(H)	(I)

以上の条件の下で、生成した全 9 通りの計測データに対して加熱指示生成エンジンを適用し、238 点の評価対象の点群における複数方向の法曲率の算出を行った。それぞれの条件を、(A)~(I)とおく。また本実験では、幾何学的に対称なモデルをターゲットとしているため、データの形式によって初期位置合わせの結果が Z 軸まわりに 180 度反転してしまう可能性がある。そこで計測データを生成する段階で初期の位置合わせは完了しているとみなし、位置合わせのプロセスでは重心と慣性主軸を用いた初期の位置合わせは行わずに全点を用いた ICP による位置合わせのみを実施した。算出時に設定する変数の値を表 7-3 に、使用した計算機の仕様を表 7-4 に示す。

表 7-3 曲率算出時に設定した変数の値

法線算出時の近傍点数	30 [points]
法平面を構成する点群の抽出時の閾値 ϵ	25 [mm]
法平面の回転角 $\Delta\phi$	$\pi/12$ [rad]
曲線フィッティングの重み h	200

表 7-4 実験に使用した計算機の仕様

機種名称	Microsoft Surface Pro 4[45]
OS	Windows 10 64bit
CPU	Intel® Core™ i5-6300U CPU @2.40GHz
メモリ	8 GB

7.2.4 結果

シミュレータにより生成された計測データの点数は、条件(A)(B)(C)のデータが約 6 万点、条件(D)(E)(F)のデータが約 25 万点、条件(G)(H)(I)のデータが約 60 万点であった。条件(D)のもとで生成された計測データを図 7-4 に示す。計測データは実物のレーザスキャナの計測データと同じく放射状に広がっており、点密度も均質ではないことが確認出来る。計算時間は、条件(A)(B)(C)のデータを用いた場合は約 40 秒、条件(D)(E)(F)の場合は 3 分、条件(G)(H)(I)の場合は約 9 分であった。

全ての計算の完了後、算出した法曲率の値から真の法曲率の値を引いた値を、算出の誤差として計算した。真の法曲率は、式(3.14)から計算することができる。

各条件における誤差の平均と標準偏差、そして誤差の絶対値が最大となる最大誤差値を表 7-5 に示す。また各条件ごとの誤差に関する箱ひげ図を図 7-5 に示す。縦軸は算出の誤差の値、横軸は各条件を表す。

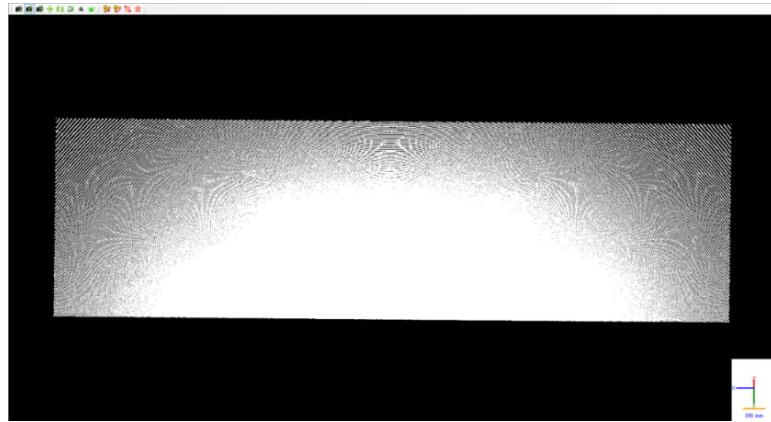


図 7-4 生成した計測データ(D)

表 7-5 計算された各条件の誤差の統計量

条件	平均 [1/mm]	標準偏差 [1/mm]	最大誤差値 [1/mm]
(A)	2.10. E-07	1.78. E-06	-8.32. E-06
(B)	4.74. E-07	3.38. E-06	1.70. E-05
(C)	6.66. E-07	6.64. E-06	-3.69. E-06
(D)	7.01. E-08	1.32. E-06	7.59. E-06
(E)	1.95. E-07	2.56. E-06	1.15. E-06
(F)	6.10. E-07	5.11. E-06	2.91. E-06
(G)	2.63. E-08	8.54. E-07	3.98. E-06
(H)	8.00. E-08	1.68. E-06	8.90. E-06
(I)	2.39. E-07	3.50. E-06	1.79. E-06

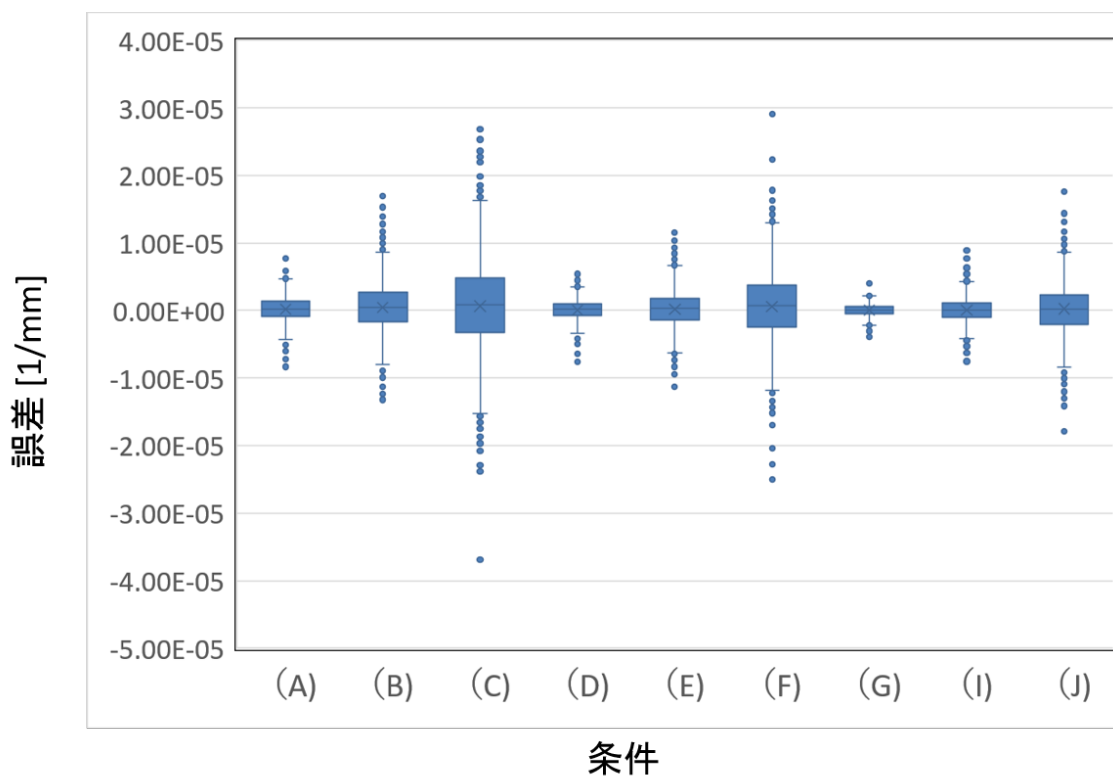


図 7-5 各条件の誤差の箱ひげ図

以上の結果より算出される法曲率の誤差は、概ね平均を 0 とし、レーザスキャナの計測条件に応じたばらつきを持つことが分かる。またそのばらつき方は、計測精度と点密度の両方に影響を受けることが推察される。具体的には、計測精度が高ければ高いほど、そして点の密度が大きければ大きいほど、誤差のばらつきは小さくなることが確認できた。

7.3 実環境における法曲率算出の実用性の評価

7.3.1 目的

加熱指示生成エンジンを用いた法曲率算出の実用性を評価する。具体的には、造船所で取得した外板の計測データの法曲率を加熱指示生成エンジンを用いて算出し、作業員による形状評価の結果と比較する。

7.3.2 実験環境

本実験は2017年7月に国内I造船所にて実施した。対象とした部材Tは板厚が約16mmで長さ9.0m×3.0m程度の鋼板であり、加工後は比較的曲がりの緩い椀型の曲がり外板となる。部材Tは実験用部材ではあるが、実際の製品に使用される鋼板と同様の工程で製造されたものである。部材Tは計10本のフレーム線を有し、各フレーム線にはIDが振られている。なおフレーム線とは、従来の方法[4]で木型を当てて評価するために外板上にマーキングされた線である。該当する箇所にはNCマーキングによりフレーム線とIDが罫書きされている。部材Tの様子を図7-6に、展開図を図7-7に示す。図7-7の上部に記載されている「4, 3, 2, 1, 0, A, B, C, D, E」の文字は、各フレーム線のIDを表している。本節では、特定のフレーム線や木型を言及する場合、「フレーム線A」や「木型A」といったようにIDを語尾に付けて説明する。なお本実験では、フレーム線1, 3, A, C, Eと両側の端部(以下、バットと呼ぶ)に対応する計7つの木型を用意した。

使用する設計曲面データを図7-8に示す。紫色のポリゴンが設計曲面、黄色の線がトリムカーブに該当する。同じく使用する評価対象の点群は、図7-9に示すように、全10本のフレーム線上の離散点とした。各フレーム線上の評価対象の点の数は24点、25点、26点のいずれかである。また同一フレーム線上の隣り合う点同士の間隔は約100mmとし、両端から30mm以内に含まれる点は除いた。

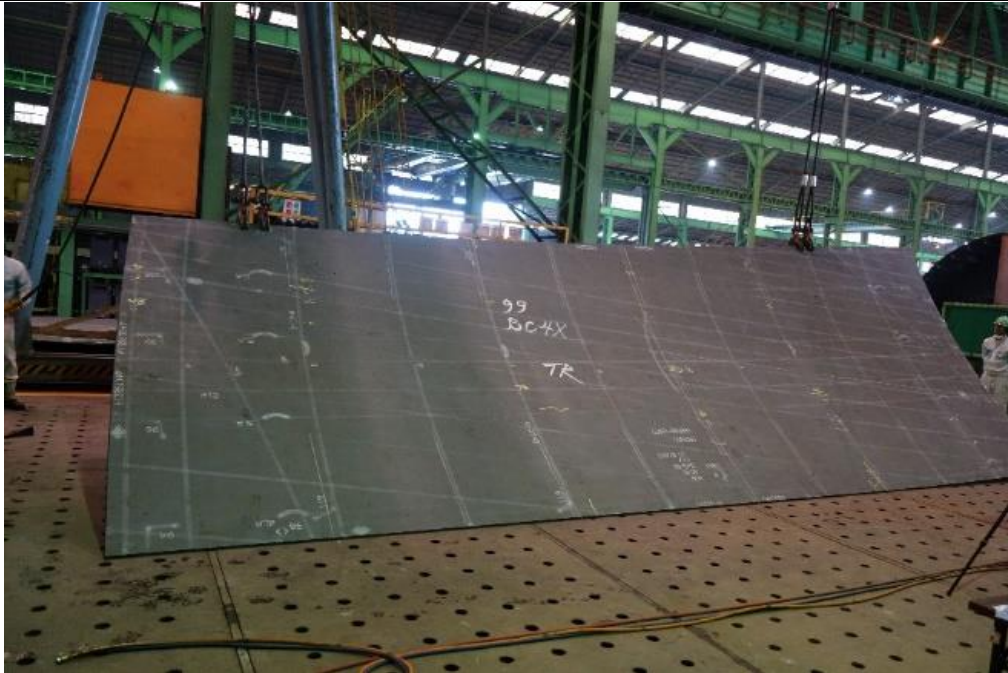


図 7-6 第1回の現場適用実験にて用いた部材 T

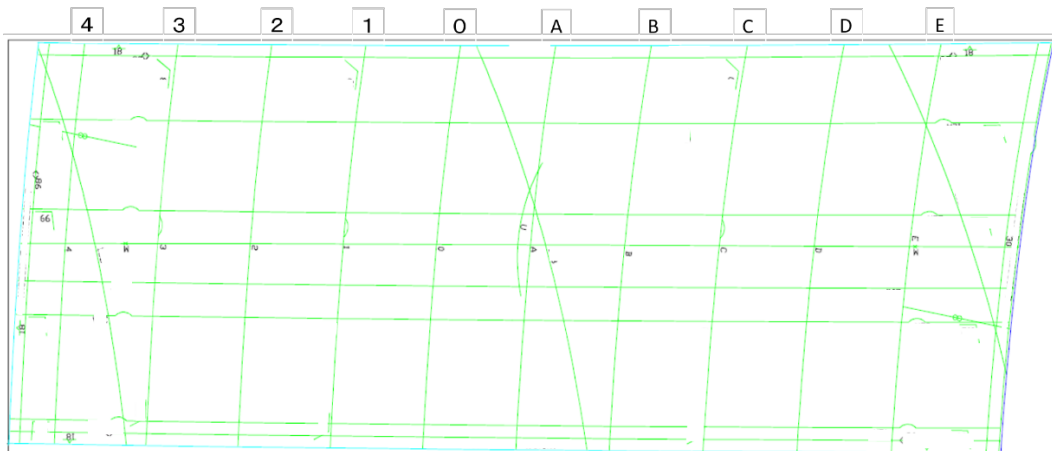


図 7-7 部材 T の展開図

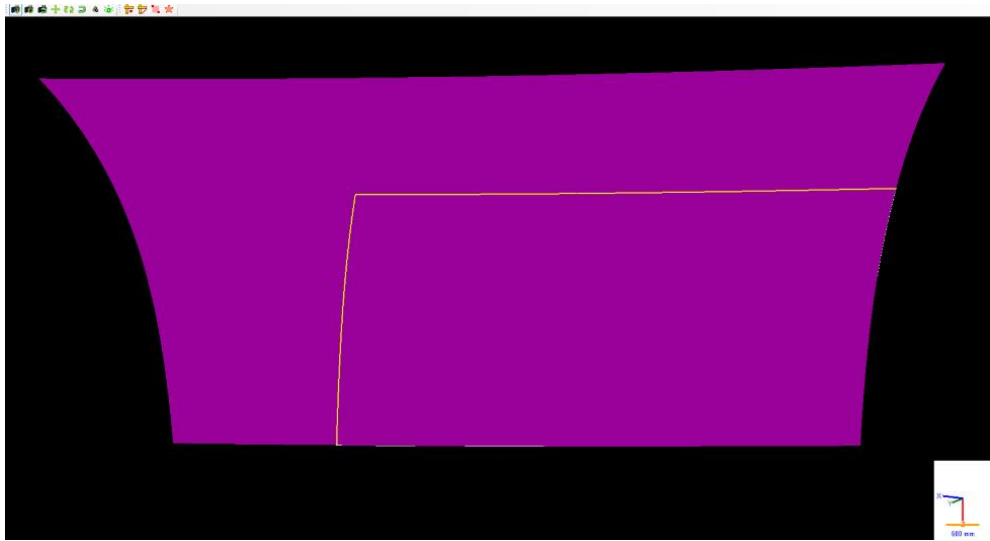


図 7-8 設計曲面データ

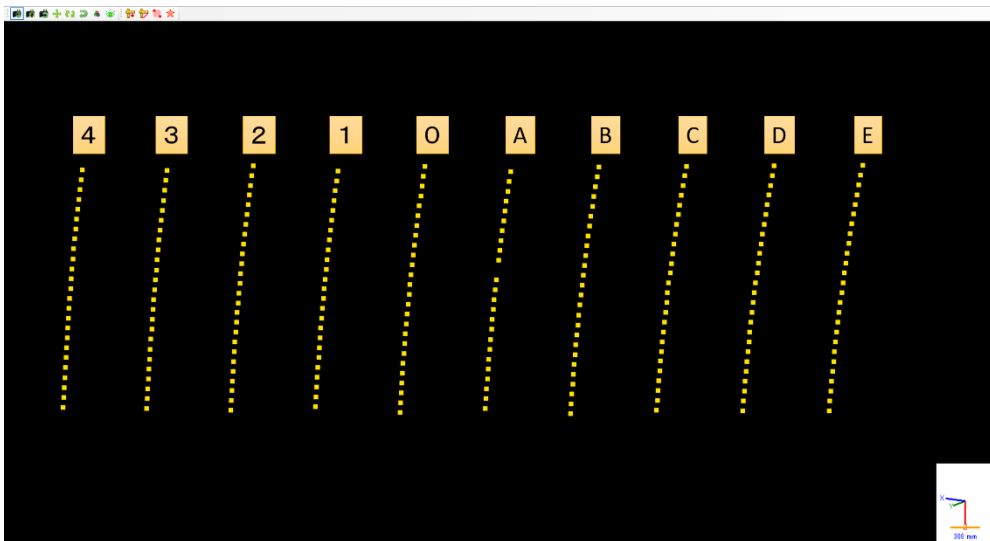


図 7-9 評価対象の点群

実験時の各機材の配置図を図 7-10 に示す. レーザスキャナと部材の位置関係は, 7.2.3 設定したシミュレーション時のものと極力同様になるように, レーザスキャナを専用三脚に固定した状態で, 部材の手前側の端部の概ね中央付近の点から約 1,500mm 離れた場所に設置した. スキャナの高さは, 約 1,700mm である. 計算機とモニターは机の上に設置し, HDMI ケーブルを用いて接続を行った. 計算機とレーザスキャナは無線接続されており, レーザスキャナが取得した点群データを計算機に無線を経由して送信出来る.

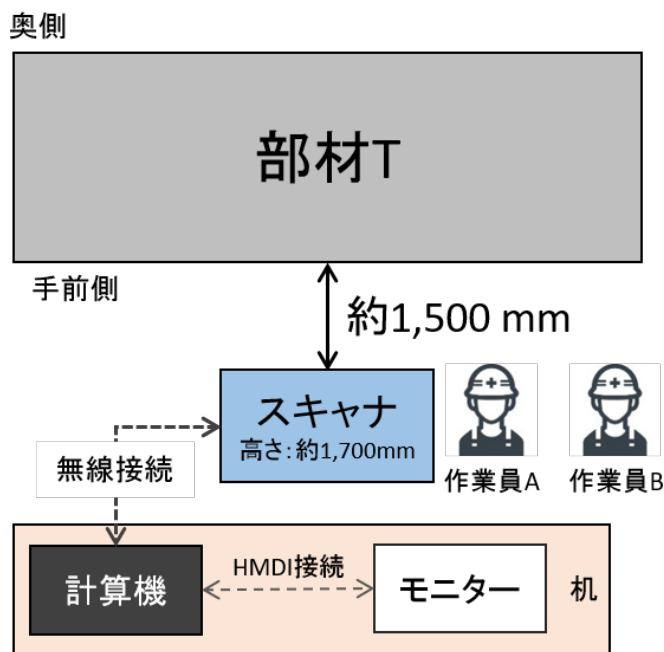


図 7-10 各機材の配置図

計測用のレーザスキャナは Faro 社の Focus 3D X130[44]を、計算機は Microsoft 社の Surface Pro 4[45]を使用した。それぞれの仕様を表 7-6 と表 7-4 に示す。レーザスキャナの計測精度および解像度はレーザスキャナのタッチパネルを操作することで変更できる。本実験では 7.2.4 の結果を踏まえ、表 7-7 の値を選択した。

表 7-6 使用したレーザスキャナの仕様

機種名称	Faro Focus 3D X130
計測方式	Phase shift
測定範囲	0.6m – 130m
範囲誤差	±2mm
重さ	5.2kg
サイズ	240×200×100mm

表 7-7 計測条件

計測精度	3.12121 mm at 25m
計測ピッチ間隔	12.272 mm at 10m
計測時間	120 秒

7.3.3 実験方法

実験では、部材 T の計測および加熱指示生成エンジンの適用は筆者が行い、それ以外のすべての加工作業は 2 人の作業員が担当した。実験のフローは図 7-11 の通りである。以下、詳細の説明を行う。

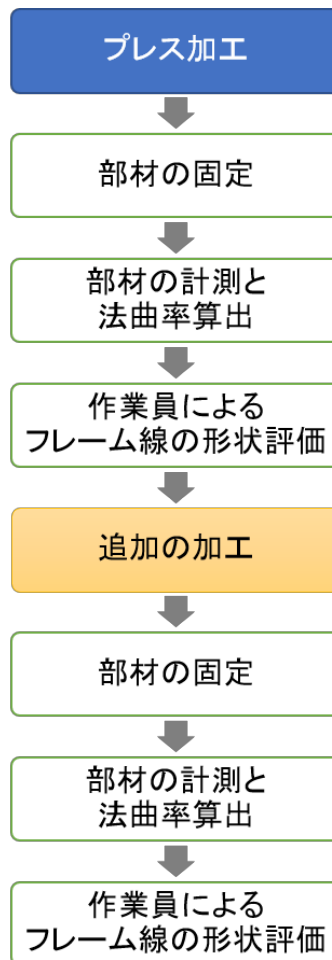


図 7-11 実験のフロー

- プレス加工

大まかな成形を行うため、まずプレス機を用いて部材 T のプレス加工を行った。プレス加工時には、松尾らの曲率線展開システム[19]に従ってマーキンされた第 2 主曲率線に沿ってプレスが行われた。そのプレス線を図 7-12 に示す。プレス加工は本研究が扱う範囲外であるため、プレスの強さや加工終了の判定は作業員が行った。
- 【加工前】部材の固定

プレス加工の終了後、部材 T をクレーンを用いて下に凸になるように定盤上に設置し、複数の枕木を用いて端部の持ち上げを行った状態で固定した。枕木を挿入する際には従来の評価方法[4]に従い、一度 7 つ全ての木型を並べた上で、部材 T のねじれ具合が極力設計形状に近づくように目視で確認をしながら枕木の高さを調整した。調整の様子を図 7-13 に示す。調整の完了後は、木型を全て撤去した。
- 【加工前】部材の計測と法曲率および誤差算出

レーザスキャナを用いて部材 T の計測を行い、開発した加熱指示生成エンジンのソフトウェアを用いて法曲率算出を実施した。計算時に設定したパラメータを表 7-8 に示す。ここで曲率算出を行った方向は 2 方向であり、対応する法平面はそれぞれ「評価対象の点における法線ベクトルとフレーム線の接線の方向ベクトルを含む法平面」と「その法平面を法線ベクトルを軸に 90 度回転させた法平面」に該当する。本実験では、前者を「フレーム線方向の法曲率」と呼び、後者を「長手方向の法曲率」と呼ぶ。
- 【加工前】作業員によるフレーム線の形状評価

木型 A を用いて作業員によるフレーム線 A の形状評価を行った。具体的には図 7-14 に示すように、木型を部材にマーキンされたフレーム線上にあてがうことで局所的な凹凸とフレーム線方向の曲がり具合を評価した。ここではフレーム線の形状のみに着目し、板のねじれと長手方向の評価は行っていない。そして修正が必要と判断された箇所にはチョークでマーキンを行い、片側の端部からの距離を巻き尺で計測した。
- 追加の加工

続いて作業員の判断に従い、追加の加工作業を行った。その際、加工方案の意思決定は全て作業員が行った。

- **【加工後】部材の固定**
加工完了後、前述と同様の方法で枕木を用いて部材の固定を行った。
- **【加工後】部材の計測と法曲率および誤差算出**
レーザスキャナを用いて部材 T の計測を行い、加工前と同様に法曲率算出を実施した。計算時に設定したパラメータは加工前と同様である。
- **【加工後】作業員によるフレーム線の形状評価**
前述と同様の方法で、木型を用いてフレーム線 A の形状評価を行い、加工による形状の変化を確認した。

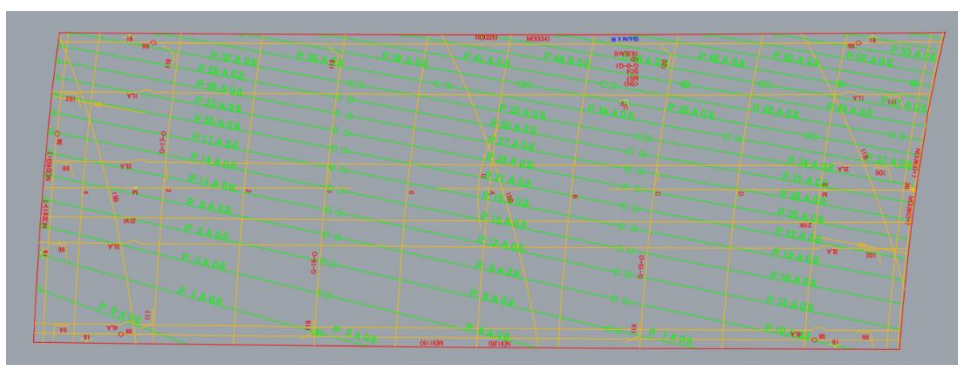


図 7-12 プレス加工時のプレス線（緑色）

表 7-8 設定した変数の値

法線算出時の近傍点数	30 [points]
法平面を構成する点群の抽出時の閾値 ϵ	25 [mm]
法平面の回転角 $\Delta\phi$	$\pi/2$ [rad]
曲線フィッティングの重み h	200



図 7-13 木型を並べた状態での枕木の調整



図 7-14 作業員によるフレーム線の形状評価の様子

7.3.4 結果と評価

➤ 作業員による評価結果と追加の加工内容

加工前に作業員が木型を用いて行ったフレーム線 A の形状評価の結果を図 7-15 に示す。青丸が「曲がり過ぎ」であると判定された箇所、赤丸が「曲げ不足」であると判定された箇所を表している。フレーム線 A 上の「曲げ過ぎ」の箇所を、点 a と呼ぶ。このとき点 a は、プレス加工時にプレス機の刃型が当てられた箇所であった。そのため、プレス加工時の荷重が強くなり過ぎた影響により過剰な塑性変形が生じたと判断された。一方で「曲げ不足」の箇所はプレス機の刃型が当たっていない箇所であり、木型と比較したときに曲がり不足と判断された。

以上の評価結果をふまえ、作業員は点 a の修正を目的とし、現状と逆向きの塑性変形を発生させるため裏側から点 a 周辺の線状加熱を行った。具体的には、まずクレーンを用いて部材 T を上に凸の状態になるように反転させた。続いて点 a の位置を、事前に記録した片側の端部からの距離をもとに特定した。そして図 7-16 に描いた青色両側矢印のように、点 a を中心として両方向に線状加熱を行った。加熱方向は図 7-12 に示したプレス線の方と同じで、加熱線の長さは両隣のフレーム線に到達するまでの長さであり、加熱時間は一定となるように極力等速で加熱を行った。

加工の完了後に再び部材を下に凸になるように部材 T を反転し固定した後、木型 A を用いてフレーム線の形状評価を行った。その結果として、追加の加工を行った点 a 周辺の曲りは緩やかになり、許容範囲内に修正されたと作業員は判断した。

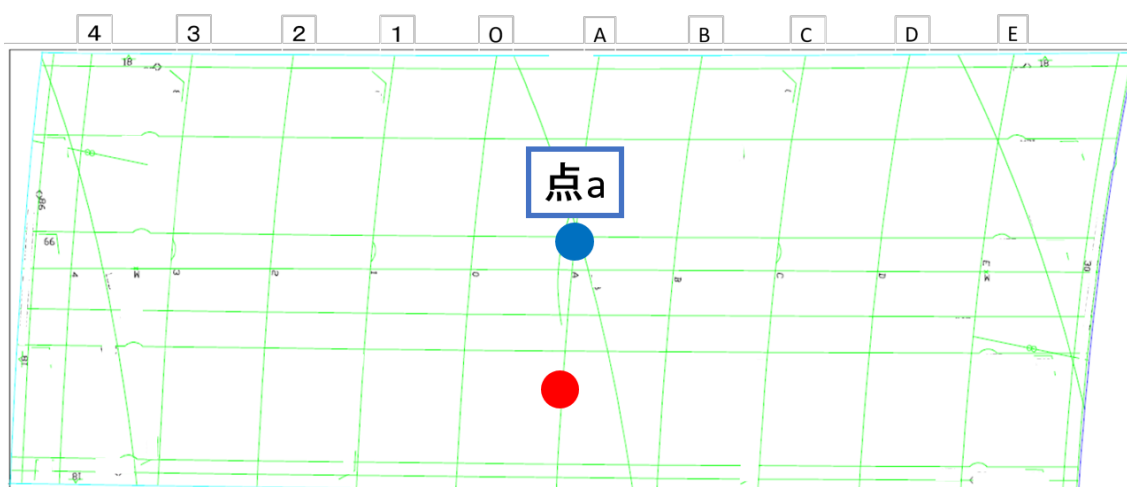


図 7-15 【加工前】作業員によるフレーム線の形状評価の結果

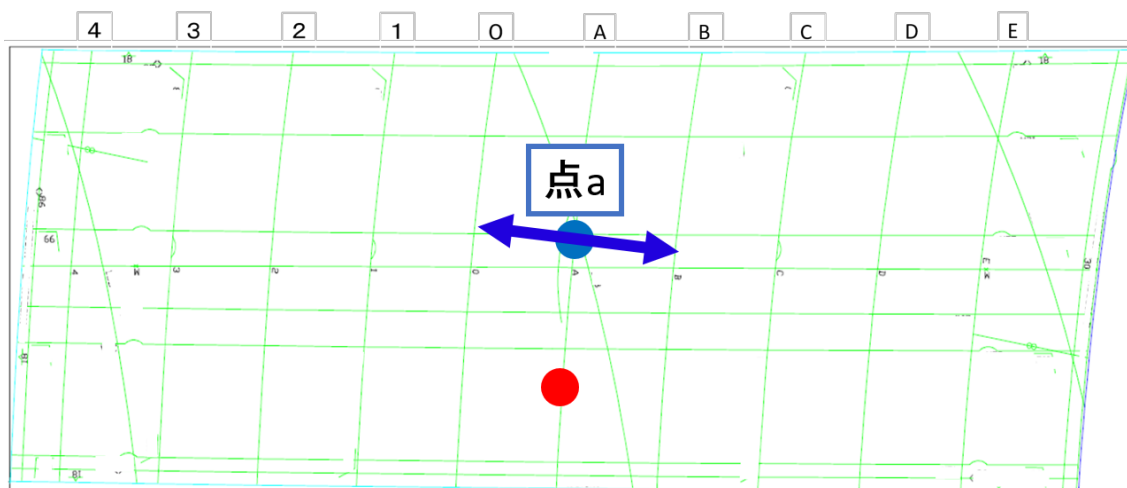


図 7-16 作業員による 1 本の線状加熱のログ

➤ 加工前後の法曲率および曲率誤差の算出結果

フレーム線 A 上の評価点における 2 方向の評価結果のうち、加熱前後の「フレーム線方向」の法曲率の算出結果を図 7-17 に示す。

図 7-17 は加熱前後の法曲率の変化を表す。横軸がフレーム線上の評価点のインデックス、縦軸が該当点における「フレーム線方向」の法曲率を表しており、プロットを線分で結んでいる。このとき評価点のインデックスは、部材の手前側から順に 1, 2...のように昇順で自然数を付与した。灰色の三角形は設計データから解析的に求められる真の法曲率のプロット、青色の三角形は加熱前に算出された法曲率のプロット、橙色の菱形は加熱後に算出された法曲率のプロットである。

出力結果からは、加熱前のフレーム線 A の形状は部材の手前側が「曲げ不足」であり、部材の中央付近が「曲げ過ぎ」であるということが読み取れる。評価点がフレーム線上に概ね一定間隔で並んでいることを考慮すると、その結果は図 7-15 に示した作業員の評価結果の傾向と整合している。

またインデックスの値が 15 周辺の評価点に着目する。この周辺は、作業員が加熱加工を行った箇所に該当しており、加工前後で法曲率が減少し設計データの真の法曲率に近づいていることが分かる。作業員は「曲げ過ぎ」を修正する加工を行ったため、法曲率は小さくなるはずである。従って、線状加熱による部材の塑性変形に起因する法曲率の変化を捉えることが出来たといえる。

加えて、加熱加工を行った箇所以外の法曲率が、ほとんど変化していないことも確認できる。すなわち実環境においても、法曲率算出の再現性が高いといえる。

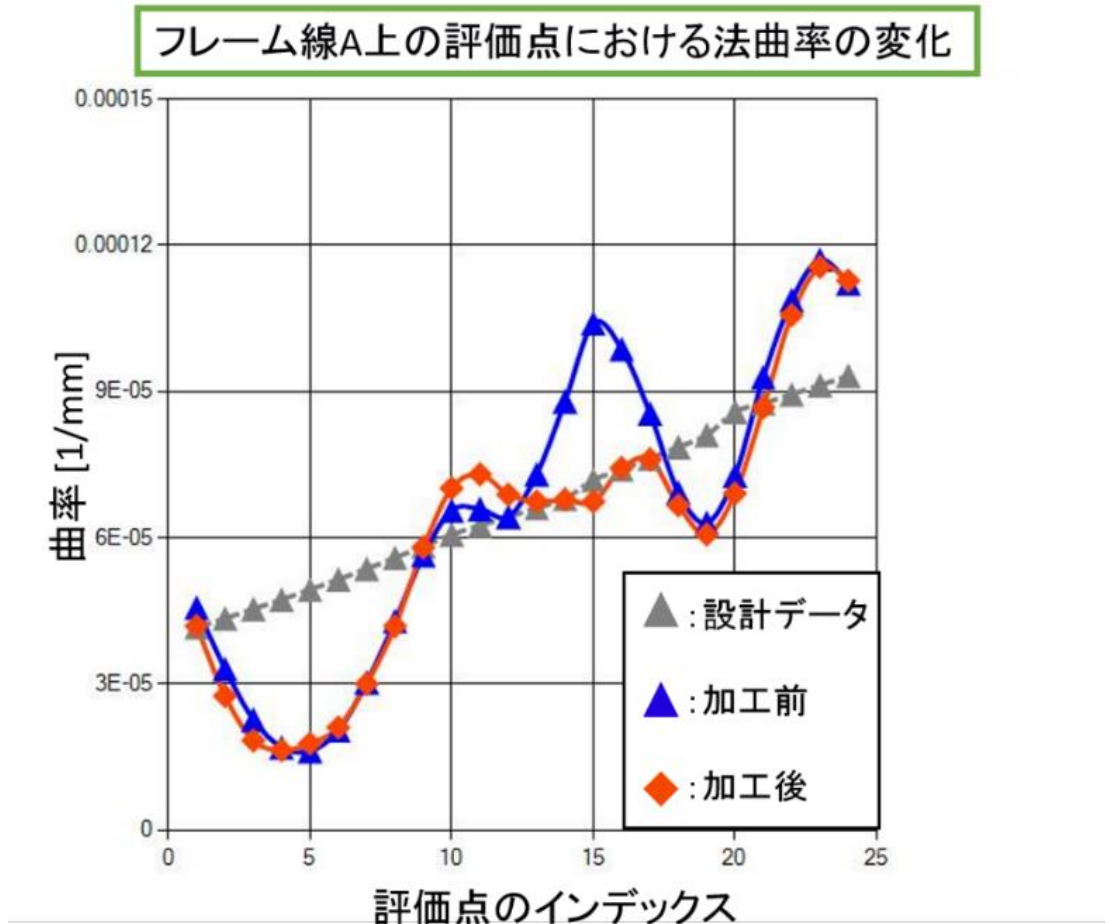


図 7-17 フレーム線 A 上の評価点における加工前後の法曲率の変化

7.4 加熱指示生成エンジンの実現可能性の評価

7.4.1 目的

実環境における加熱指示生成エンジンの実現可能性を評価する。具体的には、造船所にて加工途中の外板に対して加熱指示生成エンジンを適用し、出力した加熱指示に従って加

工を行う。そして加工により外板の法曲率が修正され、形状が完成形状に近づくかどうかを評価する。また作業員へのインタビューを実施し、加熱指示の妥当性について検討する。

7.4.2 実験環境

本実験は 2017 年 10 月に国内 I 造船所にて実施した。対象とした部材 K は、7.3.2 で用いたものと同様の仕様の部材を用意し、マーキングも事前に行われている。レーザスキャナの計測環境や設定値などの実験環境は、7.3.2 で説明した環境と全て同様となるように設定した。

7.4.3 実験方法

実験では加工途中の部材 K に対して加熱指示生成エンジンを適用し、加熱指示を生成する。そして筆者が作業員に伝達し、その指示に従って作業員が加熱加工を行った。このとき部材 K は事前に 7.3.3 と同様の方法でプレス加工が行われており、既に作業員によって 10 本程度の加熱加工が行われているが、未完成の状態である。また部材 K は下に凸となるように設置されている。本実験で設定した変数の値を表 7-9 に示す。

表 7-9 設定した変数の値

法線算出時の近傍点数	30 [points]
法平面を構成する点群の抽出時の閾値 ϵ	25 [mm]
法平面の回転角 $\Delta\phi$	$\pi/12$ [rad]
曲線フィッティングの重み h	200
加熱線の長さ	1000 [mm]

生成される加熱指示は「加熱箇所の 3 次元位置座標」、「加熱線の進行方向を表す方向ベクトル」、「加熱線の長さ」の情報を持つが、それらは船体座標系のものであるため作業員は加熱線を特定することが出来ない。そこで 7.3.2 で述べたように本実験の評価対象の点群は全 10 本のフレーム線上の離散点であることを考慮し、上記の加熱指示情報を「加熱箇所に対応するフレーム線の ID」、「片側の端部からの距離」、「フレーム線と為す角度」に変換して出力するようにソフトウェアの仕様を変更した。「加熱箇所に対応するフレーム線の ID」と「片側の端部からの距離」は加熱箇所の 3 次元位置座標から算出可能であり、「フレーム線と為す角度」は 5.4.3 の処理の中で法平面を回転させる角度 $\Delta\phi$ を保持することで出力できる。

筆者は口頭で上記の加熱指示情報を伝え、作業員が図 7-18 のように巻き尺と分度器を用いて加熱線を特定し、チョークでマーキングを行った。そして作業員はマーキングに沿って、極力一定の速度で加熱加工を行った。



図 7-18 巻き尺と分度器を用いた加熱線のマーキングの様子

また加熱加工による板の形状の変化を定量的に捉えて評価するために、加熱加工の前後にレーザスキャナで計測して得た部材 K の計測データをそれぞれ稗方らの精度評価システム[6]に入力し、精度評価カラーマップを出力した。稗方らのシステムは、設計データと計測データの「符号付き距離誤差」を計算し、その値に応じて色付けを行い精度評価カラーマップを出力する。本実験では、赤色が設計データと比べて 5mm 以上膨らんでいる箇所、青色が 5mm 以上凹んでいる箇所、緑色が許容誤差範囲内である誤差 5mm 以内の箇所を表すように設定した。

7.4.4 結果と評価

➤ 出力された加熱指示

本実験で得られた部材 K の計測データは約 32 万点であり、計算時間は約 6 分であった。所要収縮量の絶対値が 2.5×10^{-4} を超える加熱指示線を描画したところ、いずれも「曲

「曲げ過ぎ」の箇所の修正を意味する青色の加熱指示線が7本表示された。図 7-19 に可視化した加熱指示線を示す。ここでは加熱前の精度評価カラーマップに重ね合わせるように加熱指示線を表示している。

本実験では、最も所要収縮量の絶対値が大きいと判定した図 7-19 の右上の加熱線を、加熱指示として作業員に伝達した。その詳細を表 7-10 に記載する。また今回は「曲げ過ぎ」の修正の加熱であるため裏側からの加熱となったが、図 7-20 のように潜り込んで作業を行うことで、反転作業ならびに枕木の差し替えを必要としなかった。

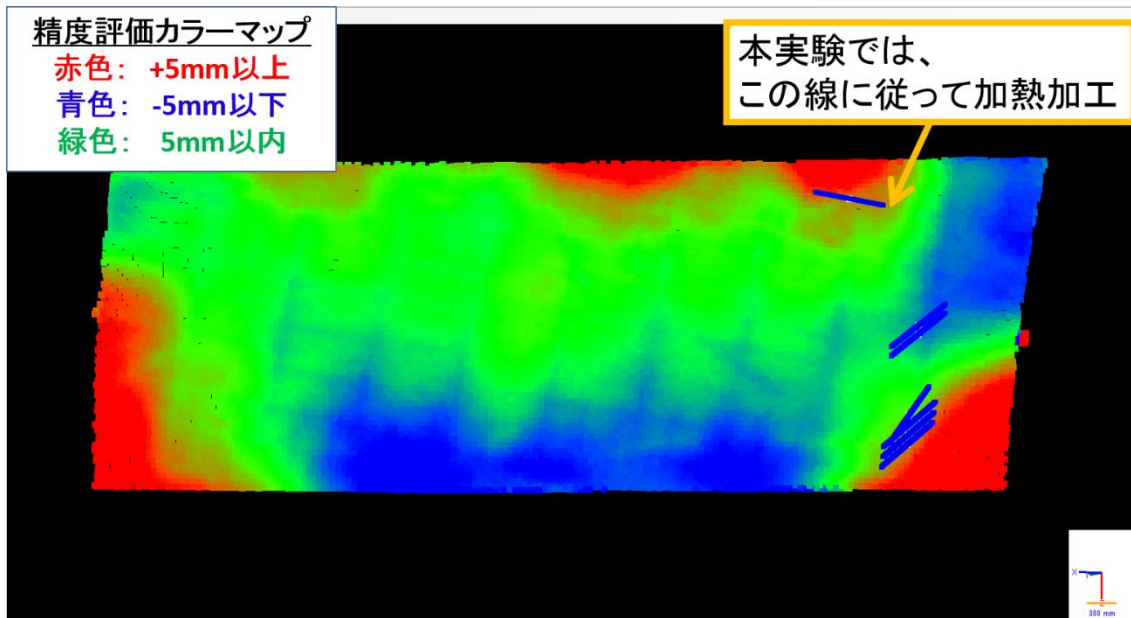


図 7-19 精度評価カラーマップ上に可視化された加熱指示線



図 7-20 裏側から加熱を行う様子

表 7-10 作業員に伝達した加熱指示の情報

加熱箇所に対応するフレーム線の ID	端部からの距離	フレーム線と為す角度
D	390 [mm]	90 [degree]

➤ 加熱箇所における所要収縮量の変化

図 7-21 に、加熱箇所における全 12 方向の所要収縮量を、加工前後で比較したグラフを示す。縦軸が各方向における所要収縮量の値を、横軸は曲率評価を行った方向のインデックスを表す。青色の棒が加工前の値、赤色の棒が加工後の値である。

本実験では、図 7-21 の黒色点線枠で囲まれた方向の所要収縮量の絶対値が、定めた閾値を超えるものの中で最大となったため、その方向に直交する線状加熱の指示が出力された。そして加工前後の所要収縮量を比較すると、修正対象となった方向を中心に、所要収縮量が明らかに 0 に近づいていることが確認できる。所要収縮量は曲率の誤差が小さければ小さいほど、その絶対値は 0 に近づく。従ってこの結果から、加熱指示生成エンジンが出力した加熱指示に従って行われた線状加熱により、部材の曲率誤差が減少したことが確認できる。

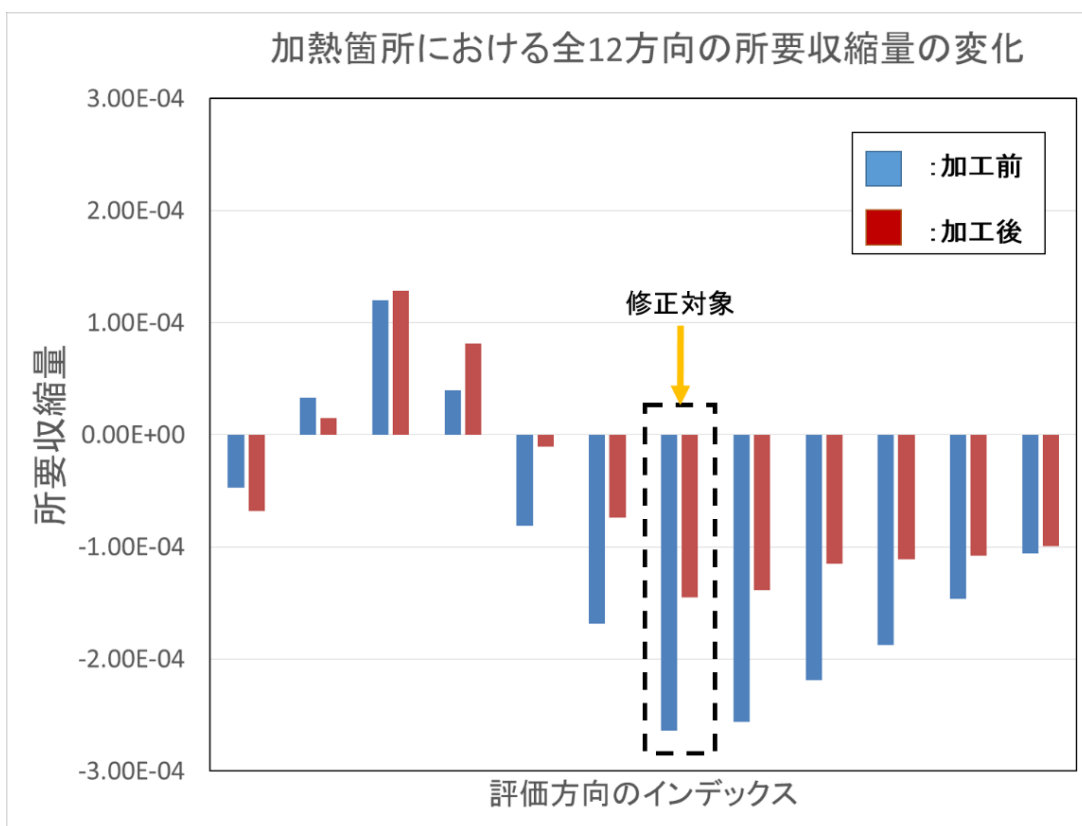


図 7-21 加熱箇所における全 12 方向の所要収縮量の変化

➤ 加熱前後の部材の形状の変化

作業員が加熱加工を行った後の精度評価カラーマップを、加熱前のものと並べたものを図 7-22 に示す。まず加熱前のカラーマップに関して、橙色の円で囲まれた箇所は設計データと比較して膨らんでいるため、大部分が赤色に着色されていることが分かる。そして加熱後のカラーマップでは、同じ箇所の赤色箇所が減少し、許容誤差範囲内を表す緑色箇所の割合が増えていることが確認出来る。この結果は、筆者が目視により部材の確認を行い、部材の膨らみが収まっていると判断した結果とも整合していた。すなわち、指示通りの加工を行うことで部材を完成形状に近づける事が出来たといえる。

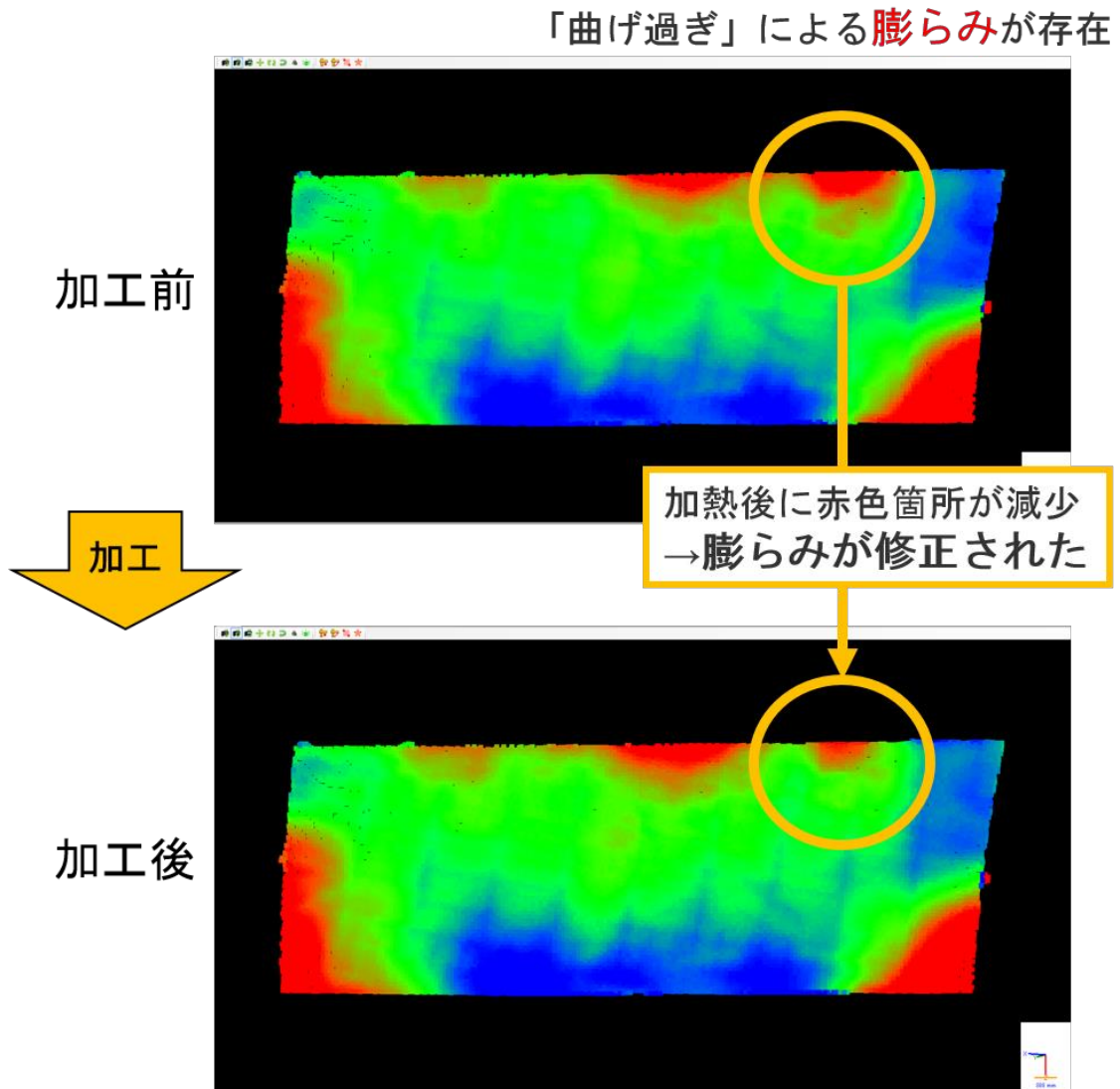


図 7-22 加熱前後の精度評価カラーマップの変化

また実験終了後に作業員にインタビューを行ったところ、以下のようなコメントを得た。

- 「端部周辺に膨らみが発生した要因は、実験前に行った加熱加工の残留応力の影響と、プレス加工時のプレスの力が強すぎたことによる影響の 2 つが考えられ、それらが複合的に作用したと推察される。その膨らみを修正するためには、三角焼きにより端部周辺の膨らみを直接修正するか、押し過ぎたプレス箇所を裏側から加熱し修正を行うかのいずれかである。提示された加熱指示線は後者に該当しており、部材の形状から考えると、経験的に妥当である。」

- 「目視や実際に手で触ることで部材の膨らみがあることは探知できるが、修正のための加工方案の意思決定は作業員によって分かれる。そのため加熱指示生成エンジンにより加熱指示を行うことは、工程の標準化の観点で有益である。」
- 「図 7-19 の右下に加熱指示線が数本提示されたが、手前側の枕木をやや無理に挿入したために、板が局所的に曲がったことが原因である可能性がある。」
- 「部材のサイズが大きくなればなるほど、加熱指示箇所の特定に要する作業の手間は、許容できなくなる。実際の運用を検討するにあたっては、エンジンからの情報伝達手段も改善するべきである。」

以上の実験結果より、加熱指示生成エンジンにより生成される加熱指示に従った加熱加工を行うことで、加工途中の部材の曲率を修正し、形状を完成形状に近づけることが出来たといえる。またインタビューの結果、生成される加熱指示は妥当であった、というフィードバックが得られた。そして本実験の主旨からは外れるが、加熱指示箇所の特定の際に作業員に要する手間は想定以上に大きく、特にサイズの大きな外板の場合は無視できないというフィードバックも得られた。なおインタビューの3点目の内容に関しては8.2.4で考察する。

7.5 指示投影エンジンを用いた加熱指示実験

7.5.1 目的

指示投影エンジンと必要設備を合わせたプロトタイピングを行い、外板の模型を用いて加熱指示プロセスを模擬した実験を実施し、情報投影による加熱指示の有用性を検証する。

7.5.2 プロトタイピング

7.5.2.1 作成したプロトタイプと使用する外板の模型

東京都三鷹市にある海上技術安全研究所(以下、海技研)8号館1階の屋内に、図 7-23

に示すプロトタイプを作成した。以下にその詳細を述べる。

プロトタイプは主にアルミ製パイプでやぐら状に組み上げられた骨組みとプロジェクタ、レーザスキャナと計算機から構成される。骨組みは蜂巢定盤の上に固定されており、その頂上には光軸が鉛直下向きになるようにプロジェクタが固定されている。骨組みの高さは 3.15m、横方向長さは 2.75m、奥行き長さは 3.75m である。また定盤からプロジェクタまでの距離は 3.30m である。計測および投影の対象となるターゲットは、プロジェクタの光が当たる箇所に設置されることになる。そして定盤上には、レーザスキャナを専用の三脚に固定した状態で、ターゲットから 1m 離れた場所に設置した。計算機は定盤から 1m ほど離れた位置にある机の上に設置し、プロジェクタと計算機は HDMI ケーブルを用いて接続した。今回使用したプロジェクタの仕様を表 7-11 に示す。プロジェクタは海技研が所有するものを使用した。使用した計算機およびレーザスキャナの仕様は、表 7-4 および表 7-6 に記載した通りである。

表 7-11 使用したプロジェクタの仕様

機種名称	Canon WUX6000[46]
解像度	1,920*1,200
明るさ	6,000 [lm]
重さ	8.5 [kg]
サイズ	W380×D430×H170 [mm]

今回ターゲットとして、海技研が所有する CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 製の S 字型をした模型を使用した。その様子を図 7-24 に示す。その大きさは、模型に沿って長手方向に 1600mm、板幅方向に 820mm である。



図 7-23 作成したプロトタイプ

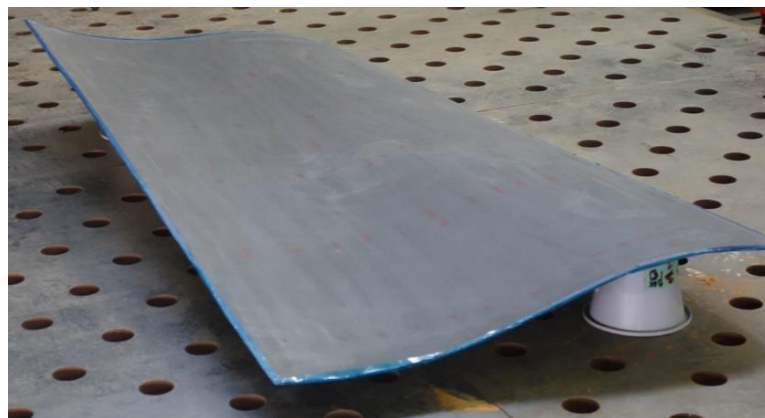


図 7-24 使用した CFRP 製の外板の模型

7.5.2.2 プロジェクタのキャリブレーションの実行

プロトタイプを構築した後、プロジェクタのキャリブレーションを行った。3.4.2 で述べたように、キャリブレーションにはプロジェクタの画像上の点と対応する 3 次元空間中の点の座標の組み合わせが 6 点以上必要である。今回のプロトタイプでは、Raskar らの手法[47]を適用することで、キャリブレーションを行う。Raskar らは特徴点の座標が既知である 3 次元模型を用いたが、今回は直径 20mm で厚さ 2mm のマグネット製の円形マーカー（以下、マーカー）を 20 個用いて、必要な座標の組み合わせを取得する。円形マーカーの中心には、薄く印をつけてある。なおキャリブレーション用のデータの抽出のために実装したソフトウェアに関しては、Appendix に記載してある。以下に具体的に行った作業の流れを説明する。

① 模型とマーカーの設置

図 7-25 に示すように、まずターゲットの外板の模型をプロジェクタの投影領域内に含まれるように設置し、その表面上に偏りが無いように 20 個のマーカーを設置した。

② マーカーの 3 次元計測と中心座標の抽出

レーザスキャナを用いてターゲット全体の計測を行う。そして計測により取得した点群データから、反射光強度の違いを利用することで、それぞれの 20 個のマーカーの重心の 3 次元座標を計算する。詳細の計算方法は、Appendix に記載した。

③ 対応する画像座標の取得

全 20 個のマーカーの重心座標の計算後、それぞれに対応するプロジェクタの画像座標を取得する。手法としては、Raskar らと同様に、ある画素を中心とした十字映像を図 7-26 のようにプロジェクタから投影し、計算機に接続した十字キーにより十字映像を動かすことで、マーカーの中央の印と十字の交差点が重なり合った時の画素座標を取得した。なおその操作および判断は、筆者が目視確認により行った。

④ 最適化計算の実施

取得したプロジェクタの画像上の点の画素座標と対応する 3 次元空間中の点の座標の全 20 通りの組み合わせを用いて、6.4.2.1 で説明したソフトウェアを用いて透視プロジェクタ行列を出力した。今回のプロトタイプでは、3.4.2 で述べた再投影誤差を計算したところ、0.552931 ピクセルであった。

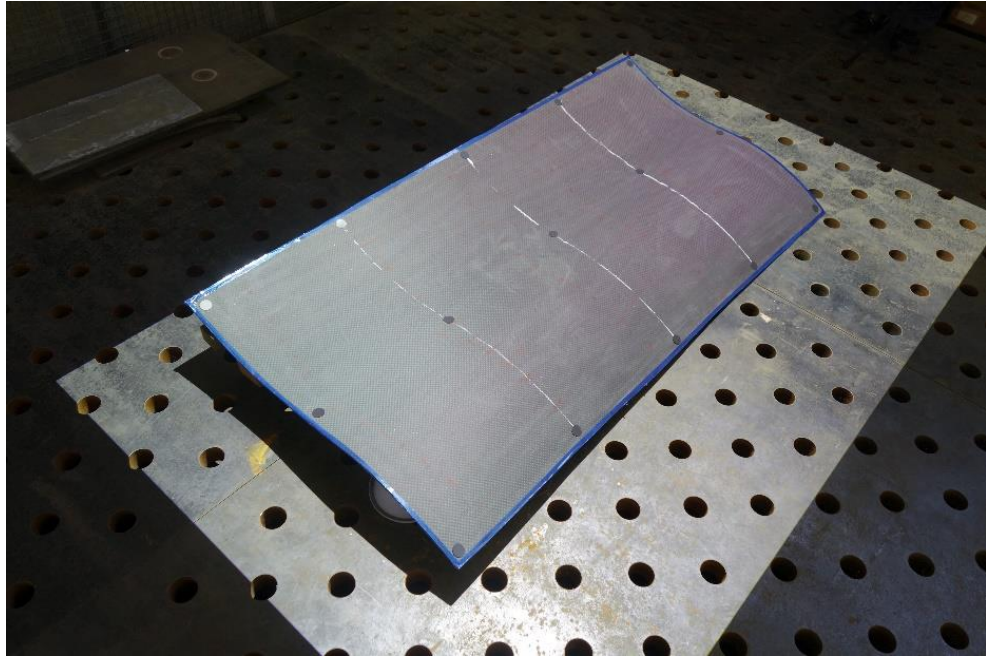


図 7-25 外板模型の上にマーカーが設置された様子

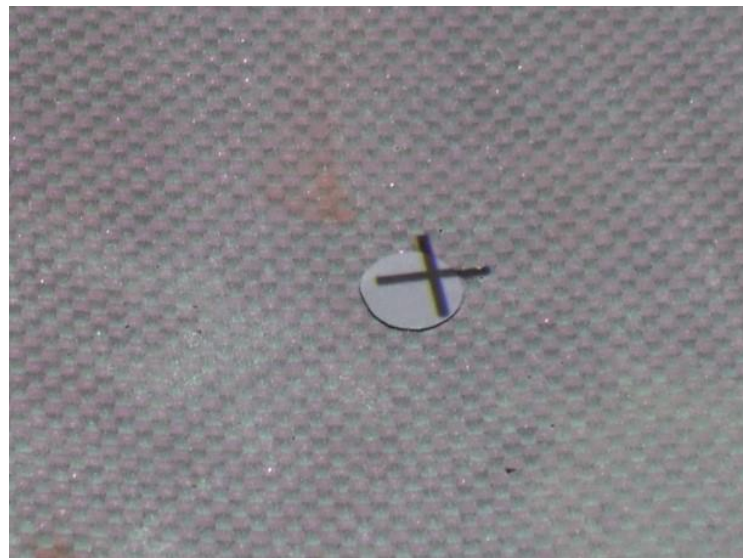


図 7-26 十字映像を投影しキャリブレーションを行う様子

7.5.2.3 デモンストレーション：カラーマップの投影

キャリブレーションの実施後、投影の挙動を確認するためにカラーマップを投影するデモンストレーションを行った。まずレーザスキャナでターゲットとその周辺を計測し、取得した点群

データからターゲットの計測データを抽出した。抽出した計測データに対して 3.3.2 の平面フィッティングを適用し、算出した最小二乗平面からの距離に応じて各点に色付けをした。色付けは、各点と近似平面の距離が 2.5cm 以内の点は青色、2.5cm から 5cm 以内の点は緑色、5cm 以上は赤色となるようにした。色付けを完了した点群データと 7.5.2.2 で算出した透視プロジェクタ行列を用いて投影画像を生成し、映像を投影した様子を図 7-27 に示す。2 枚の写真は異なる角度からターゲットを撮影したものである。ターゲットの端部では数ピクセルの投影誤差が確認できたが、映像はターゲットの形状に沿って重なるように投影されていた。視認性に関しても、目視により色情報の認識が十分可能であった。以上のデモンストレーションにより、計測した点群データを解析し色情報を付与した映像をターゲット上に投影するという、指示投影エンジンの一連のフローが妥当な挙動を示すことを確認できた。

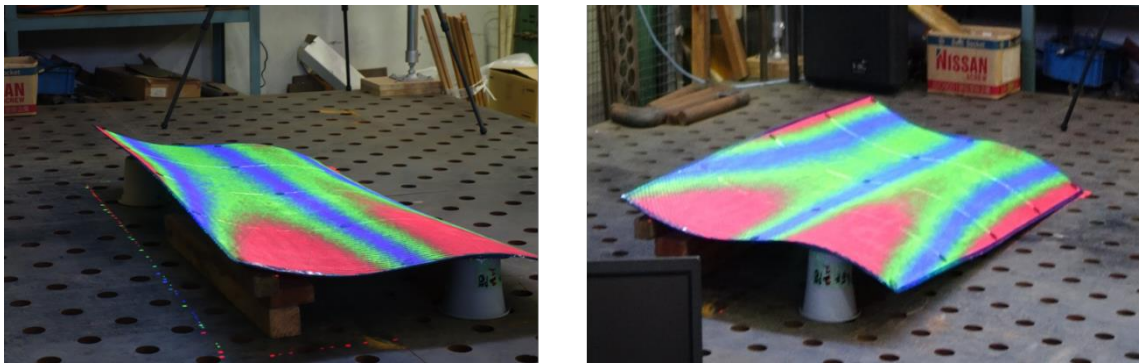


図 7-27 デモンストレーションにて投影を行ったカラーマップ

7.5.3 実験方法

本実験では、作成した図 7-23 のプロトタイプと図 7-24 の外板の模型を用いて、被験者 1 名に対して加熱指示プロセスを模擬した実験を実施する。今回与える加熱指示は、どの箇所中心にどの方向に加熱するか、という情報である。被験者はぎょう鉄に関する現場経験は一切持たない 60 代の一般男性である。

被験者は 1 本ずつ加熱指示の情報を与えられ、該当する加熱線を養生テープで模型上にマーキングをするというタスクを繰り返し行う。本実験では 10 本のマーキングを行うまでを 1 セットとし、合計で 2 セット実施する。このとき 1 セット目は口頭による指示を聞いて巻き尺と分度器を用いてマーキングを行う。2 セット目はプロジェクタから投影された加熱指示線の映像を視認して、その線に沿ってマーキングを行う。そして 1 本ずつマーキングを行うまでの時間

を毎回計測する。以下、その詳細を述べる。

7.5.3.1 実験準備

➤ データの用意

模型の曲面データを用意し、図 7-28 のように 40cm 間隔で板幅方向に伸びる平面曲線(フレーム線)を作成する。それぞれをフレーム線 A, フレーム線 B, フレーム線 C と呼ぶ。そして各フレーム線上にのる約 5cm 間隔の点を生成した。各フレーム線上には端部を除き 15 点が生成された。その様子を図 7-29 に示す。これらの点を、「加熱箇所の点群」と呼ぶことにする。

➤ 模型の計測と位置合わせ

実物の模型上にも、チョークを用いて図 7-28 と同様の箇所に直線で 3 本のフレーム線をマーキングを行っておく。そしてレーザスキャナを用いて模型の 3 次元計測を行い、得られた点群データから模型の点群データを抽出した。そして曲面データと模型の点群データの位置合わせをおこなった。

➤ 加熱指示の生成

次に、実験で使用する加熱指示を生成する。本実験で与える加熱指示は線状加熱の指示であり、「加熱するフレーム線の名称」「加熱箇所と端部の距離」「加熱線がフレーム線と為す角度」によって一意に定まるものとする。その例を図 7-30 に示す。この例は、フレーム線 B の端部から 30cm の距離にある加熱箇所の点を中心に両方向に伸びており、フレーム線と 60 度の角度を為す加熱線である。以上を踏まえ本実験では、上述の「加熱箇所の点群」を用いた以下のフローを 20 回繰り返すことで、20 通りの加熱指示を生成する。なおそれぞれの選択は乱数を用いてランダムに行う。

1. 模型の点群データに重ね合わせた 45 点の「加熱箇所の点群」から 1 点を選択する。選択した点がどのフレーム線上にあるかは筆者が読み取り、端部からの距離は端から何番目の点が選ばれたかどうかを確認して、点間隔の 5cm を乗ずることで計算した。
2. フレーム線と為す角度を 0, 30, 60, 90, 120, 150 度のなかから 1 つ選択する。

➤ 投影映像の生成

生成した 20 通りの加熱指示のうち, ランダムに 10 通りを選択し, 情報伝達のための加熱指示線を投影する映像を 1 枚ずつ計 10 枚生成する. 実際に生成した映像の例を残りの 10 通りは, 実験の第 1 セットで使用する. 加熱指示線の色は赤色とし, 線の長さは 5cm とした. 映像の背景色は黒色である.

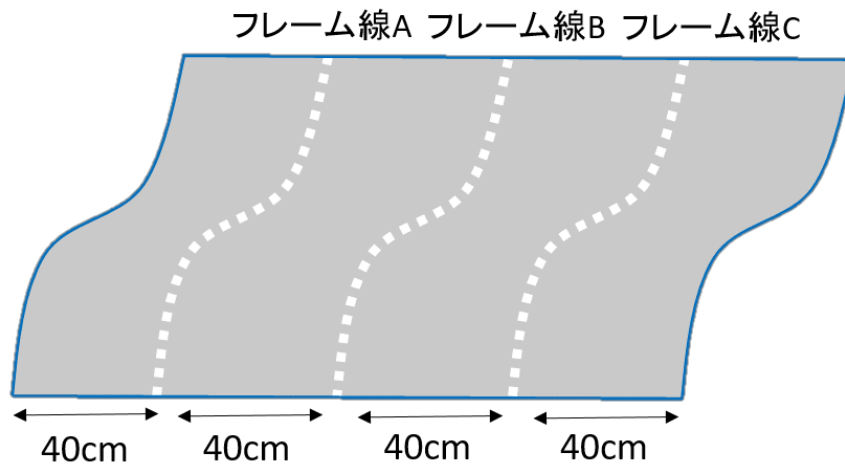


図 7-28 外板模型上に生成した 3 本のフレーム線と名称

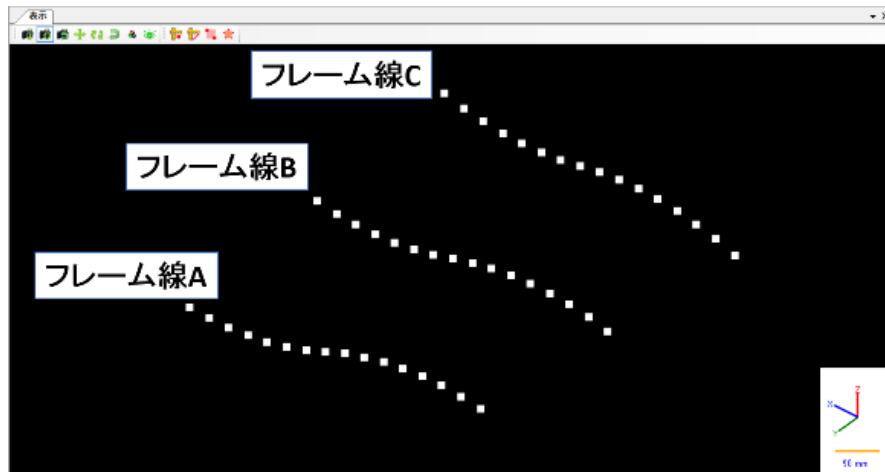


図 7-29 3 本のフレーム線上の「加熱箇所の点群」の読み込み

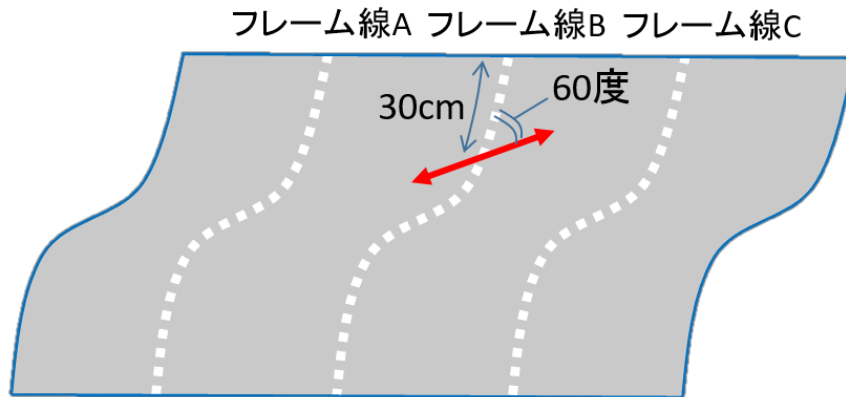


図 7-30 生成する加熱指示の例

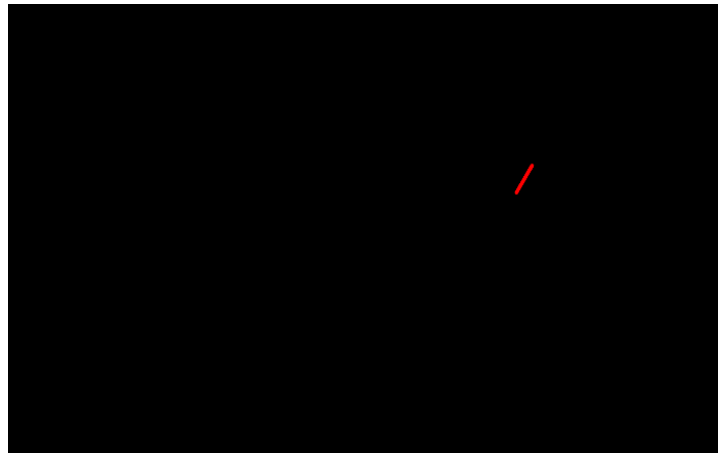


図 7-31 生成した加熱指示線の投影映像の例

7.5.3.2 実験手順

実験の手順を図 7-32 に示す. 実験は 2 セットに分けて行われる.

以下それぞれの説明を行う.

➤ 第 1 セット: 巻き尺と分度器を用いた手作業によるマーキング

被験者が巻き尺と分度器, および長さ 3cm 幅 1cm に切り取った養生テープ 10 本を手にし模型の前に立った状態で実験を開始する. まず最初に筆者が口頭で加熱指示の情報を被験者に伝達する. このとき, 口頭による伝達の際の文言は「フレーム線 B, 30cm, 60 度」といった形式に統一し, それ以外の情報は伝えない. 被験者は文言を聞き, 情報を把握する. そして該当するフレーム線に沿って巻き尺を当てて長さを

測ることで加熱箇所の点を特定し、同様に分度器をあてがいフレーム線と為す角度を測ることで加熱線の方向を決定する。そして加熱線に沿うように養生テープを貼り終えたら、「はい」と声を出し完了の合図を送る。筆者は口頭による伝達の文言を言い終えた瞬間から、被験者の完了の合図までの時間をストップウォッチで計測する。時間を記録し終えたら、再び口頭による加熱指示の伝達から開始する。そして 10 本のマーキングが完了した時点で第 1 セットは終了とする。

➤ 第 2 セット：空間型 AR を用いたマーキング

被験者は長さ 3cm 幅 1cm に切り取った養生テープ 10 本を手にし模型の前に立った状態で実験を開始する。まず事前に生成した加熱指示線の映像をプロジェクタから投影する。被験者は投影された映像を視認し、情報を把握する。そして投影された加熱指示線に沿うように養生テープを貼り終えたら、「はい」と声を出し完了の合図を送る。筆者は映像が投影された瞬間から、被験者の完了の合図までの時間をストップウォッチで計測する。時間を記録し終えたら、映像を切り替えて次の加熱指示の映像を投影する。そして 10 本のマーキングが完了した時点で第 2 セットは終了とする。

なお参考として、被験者が投影された映像を見てマーキングを行う様子と、実際にマーキングされた加熱線の様子を図 7-33 に示す。赤い線が投影された加熱指示線で、その上に重なるように養生テープでマーキングを行っている。

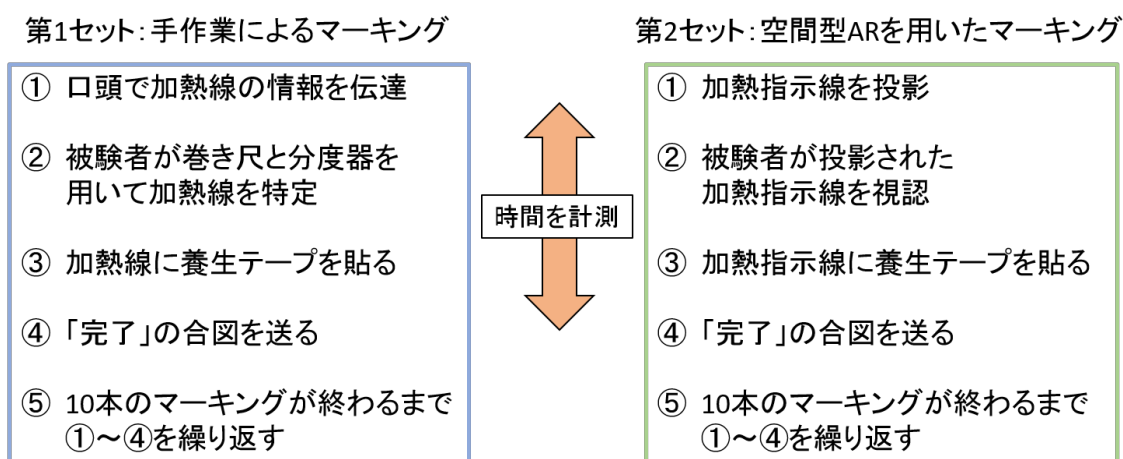


図 7-32 加熱指示実験のフロー

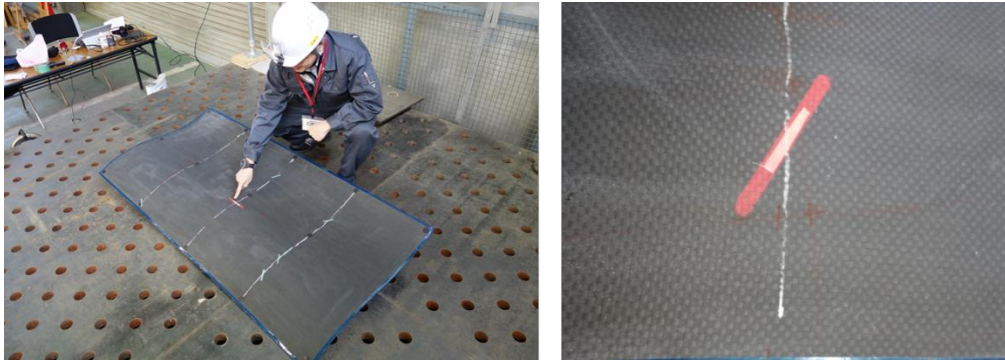


図 7-33 被験者が投影された映像を見てマーキングを行う様子とその結果

7.5.4 結果

各セットで 10 回ずつ計測したマーキング作業に要した時間を集計し、箱ひげ図にしたものを図 7-34 に示す。2 つのデータを見比べると、空間型 AR を用いたマーキング作業の方がマーキングに要する時間が少ないことが推察される。そこでより定量的な検討を行うために、得られたデータを用いて 2 標本検定を行う。具体的には手作業によるマーキング作業と空間型 AR を用いたマーキング作業で、被験者に要する時間が異なることを検定する。ここで帰無仮説 H_0 は「手作業によるマーキング作業の平均時間 t_x と空間型 AR を用いたマーキング作業の平均時間 t_y は等しい」とし、対立仮説は「 $t_x > t_y$ 」とする。ここでは分散が等しくないと仮定して Welch の検定を適用し、有意水準は 1%とする。検定の結果を表 7-12 に示す。この結果より P 値は 1%未満であるため、帰無仮説は棄却され対立仮説が採択される。

以上より、本実験環境では、手作業によるマーキング作業時間に比べて空間型 AR を用いたマーキング作業時間の方が短いと結論付けられる。

表 7-12 2 標本検定の結果

	手作業	空間型 AR
平均	11.66 [s]	6.09 [s]
分散	13.23	2.16
観測数	10	10
自由度	12	
t 値	4.48	
P 値($T \leq t$) 片側	0.00037	
t 境界値 片側	3.05	

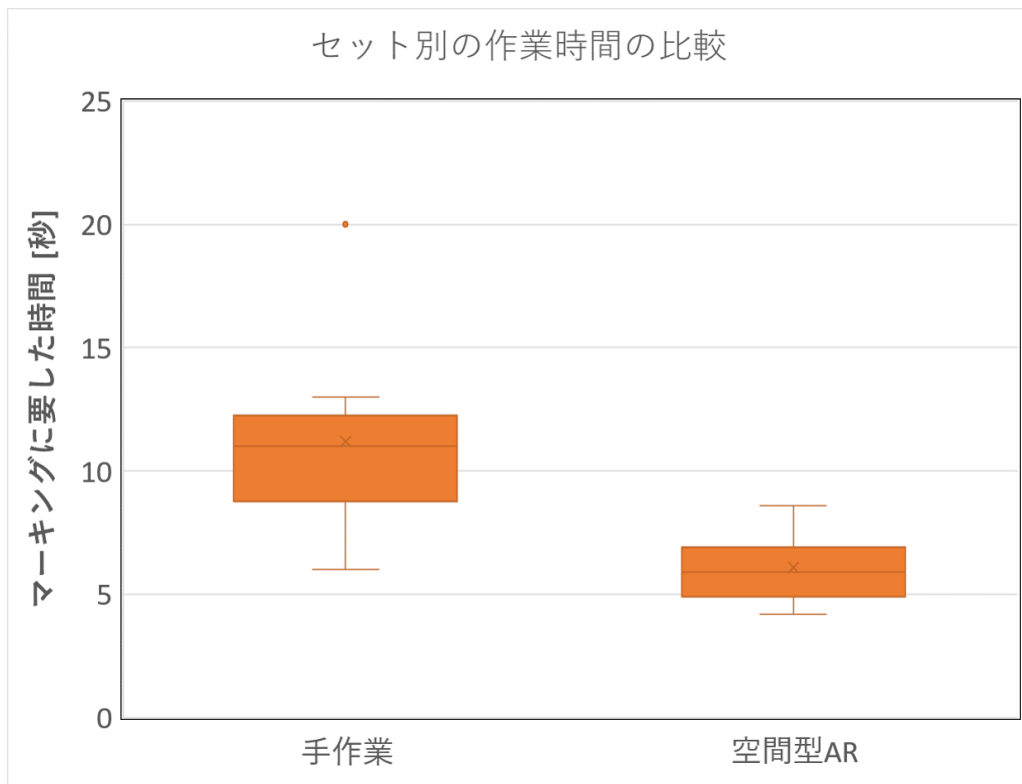


図 7-34 各セットでマーキング作業に要した時間の比較

7.6 まとめ

最後に、本章で説明した各実験の内容と得られた結果についてまとめる。

7.2 では、レーザスキャナによる計測の誤差が、加熱指示生成エンジンを用いた法曲率算出の精度に与える影響を検証した。具体的には、レーザスキャナ・シミュレータにより生成した、レーザ照射方向の計測誤差を持つテストデータの法曲率を加熱指示生成エンジンを用いることで算出し、真の法曲率を比較することで感度解析を行った。その結果、レーザスキャナによる計測の精度および点密度が与える精度のばらつきを確認できた。

7.3 では、加熱指示生成エンジンを用いた法曲率算出の実用性を評価した。具体的には、造船所で取得した外板の計測データの法曲率を加熱指示生成エンジンを用いて算出し、作業員による形状評価の結果と比較した。その結果、(1)算出結果と作業員の評価結果が整合すること、(2)作業員が加熱加工を行った箇所の曲率変化を捉えられること、(3)加工箇所以外の曲率が変化せず法曲率算出の再現性が高いこと、を確認できた。

7.4 では、実環境における加熱指示生成エンジンの実現可能性を評価した。具体的には、造船所にて加工途中の外板に対して加熱指示生成エンジンを適用し、出力した加熱指示に従って加工を行った。その結果、加工により外板の法曲率が修正され、形状が完成形状に近づくことを確認できた。また作業員へのインタビューにより、生成された加熱指示が妥当であるというフィードバックを得た。

7.5 では、開発した指示投影エンジンと必要な設備を合わせたプロトタイピングを行い、デモンストレーションにより妥当な挙動を示すことを確認した。次に外板の模型を用いて加熱指示プロセスを模擬した実験を実施した。実験では、「口頭により伝達された加熱指示の情報を巻き尺と分度器を用いてマーキングするまでに要する時間」と、「空間型 AR を用いて模型上に投影された加熱指示線を視認してマーキングするまでに要する時間」を比較した。そして空間型 AR を用いたマーキングの方が時間が短くなることを 2 標本検定により示し、情報投影による加熱指示の有用性を示した。

第8章 考察

8.1 はじめに.....	116
8.2 加熱指示生成エンジンに関する考察.....	116
8.2.1 7.3 で取得したデータへの加熱指示生成エンジンの適用	116
8.2.2 生成する加熱指示の課題.....	117
8.2.3 高度な加熱指示への拡張について	118
8.2.4 外部応力の影響の検討	119
8.2.5 レーザスキャナの変数の設定について	121
8.3 指示投影エンジンの精度と範囲に関する考察.....	123

8.1 はじめに

本章では第 7 章で行った実験の結果を踏まえ、提案したシステムについて考察を行う。

8.2 加熱指示生成エンジンに関する考察

本節では、第 5 章で開発を行い 7.2, 7.3, 7.4 にて実験を行った、加熱指示生成エンジン(以下、本エンジン)について考察を行う。

8.2.1 7.3 で取得したデータへの加熱指示生成エンジンの適用

7.3 で実施した実験では、加工途中の外板を用意し、作業員に加工方案の決定を委ねて加熱加工を行った。そして本エンジンを用いて、加熱前後の外板の法曲率の算出を行い、評価を行った。実験の目的に従い、7.3 では加熱指示の生成は行っていない。

そこで 7.3 で得られた加熱加工前の計測データに対して、改めて本エンジンを適用し加熱指示を生成した。このとき解析時の変数値は、7.4 の表 7-9 に従うように設定した。生成された加熱指示線を図 8-1(上)に、作業員による線状加熱のログを示す図 7-16 を再掲したものを図 8-1(下)に示す。なおこのとき、所要収縮量の絶対値が 1.6×10^{-4} を超える加熱指示線を描画するように、閾値を設定した。図 8-1(上)では、どの場所に加熱指示線が描画されたかを分かりやすくするために、評価対象の点群を橙色で描画し、7.3.2 と同様にフレーム線の ID を振っている。

フレーム線 A に着目すると、中央付近に「曲げ過ぎの修正の加熱線」である青線が 1 本、部材の手前すなわち図 8-1(上)の下側に「追加の曲げの加熱線」である赤色線が 1 本描画されていることが確認できる。この結果を図 8-1(下)と比較すると、描画された青線は作業員による線状加熱のログと概ね合致している。また手前側の赤線も、作業員が「曲げ不足」であると判断した箇所に、板幅方向の曲率を大きくする方向で描画されており、妥当なものであると考えられる。従って以上の結果は、本エンジンが生成する加熱指示線の実用性を裏付けるものであるといえる。また、他にも以下のようなことが推察される。

- 扱った部材の手前側は、全体的に「曲げ不足」な傾向にある。
- フレーム線 D 上に計 6 本の加熱線が生成されたが、このフレーム線に対応する木型が現場では用意されていなかった。現行のプロセスでは、木型が用意されていない箇

所の形状評価と方案決定は、目視や手で触れるなどの感覚的な方法に依存するため、極めて属人的になる。本エンジンならば、入力データをユーザの要望に合わせて変更するだけで、任意箇所と方向の評価と方案決定を行う事が出来る。

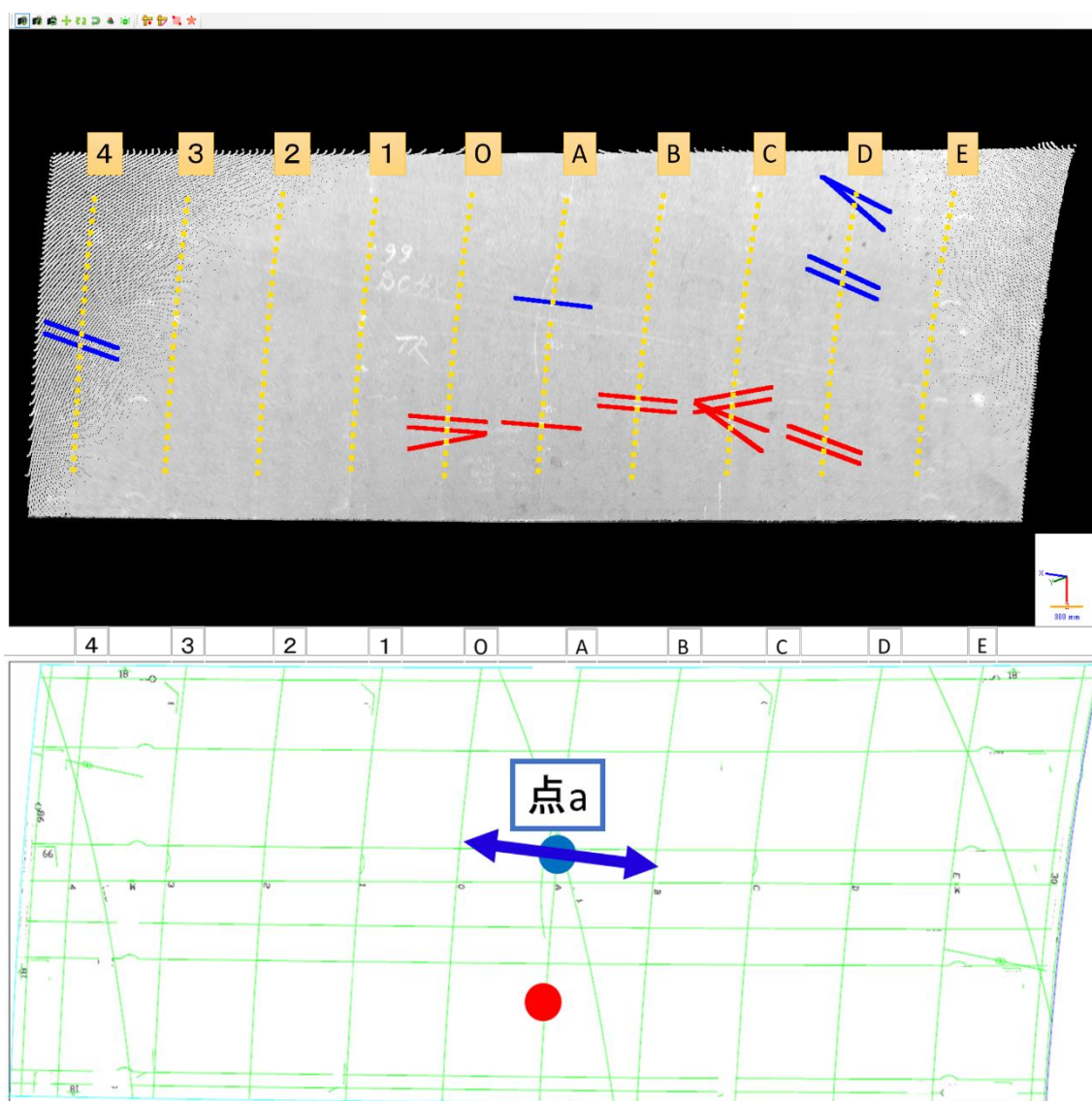


図 8-1 生成された加熱指示線の様子

8.2.2 生成する加熱指示の課題

本エンジンは、ユーザ側が入力した「評価対象の点群」における複数方向の法曲率を算出し、設計データと比較することで加熱指示を生成する機能を有する。本研究では、7.3 にて現

場環境における法曲率算出の妥当性を、7.4にて生成される加熱指示の有効性を示した。一方で、本研究ではある1点における曲率誤差が、外板全体の形状誤差にどれだけ寄与するかは考慮していない。その影響が顕著に現れうる例として、長手方向に大きく、比較的緩やかな曲がりを持つ部材を考える。その部材を本エンジンの適用対象とした場合、評価する各点の曲率誤差が許容範囲内であると本エンジンが判定したとしても、大域的にみれば大きな形状誤差を生む可能性がある。またその程度は、部材の大きさに依存することが推察される。従って今後は、対象とする外板の大きさも考慮し、形状誤差に対してより支配的な曲率誤差をもつ箇所を特定する取り組みを行う必要がある。

8.2.3 高度な加熱指示への拡張について

本研究では、最も一般的に広く用いられる加熱方法である、線状加熱の指示に焦点を当てた。しかし Appendix で紹介する三角焼きのように、角変形だけではなく面内変形により外板を収縮させて曲ることを目的とした加熱方法があり、作業員は目的形状に合わせてその使い分けを経験的に行っている。例えば 7.3 で対象とした部材のような腕型の外板は、板幅方向と長手方向ともに同じ向きにたわみを持っている非可展曲面である。腕型の外板の一般的な加工方法は、冷間加工でたわみの大きい板幅方向の曲げを与えたうえで、板幅の中心部からシームに向けて線状加熱を行い長手方向のたわみを作り出す。この際に長手方向の曲率が大きい場合は、収縮量が大きいため三角焼きを行う場合がある[4]。こういった加熱方法の選定やその際の入熱量にも属人性があるため、作業指示の観点では重要と言える。

従ってより高度な加熱指示を実現するためには、本エンジンを応用し、加熱線の提示だけではなく「加熱方法および入熱量」の情報を付与した指示を提供することが考えられる。例えば、本エンジンで算出した曲率誤差(所要収縮量)の程度により指示する入熱量(バーナーの炎の強さ・加熱時間)を変化させたり、目標形状の幾何学的特性と評価点の位置を考慮して加熱方法を変えるなどの工夫が挙げられる。また複数種類の指示を提示する際は、図 8-2 のように加熱線の色を変化させたり、文字の情報を併せることで、作業員が直感的で理解しやすくなると考えられる。

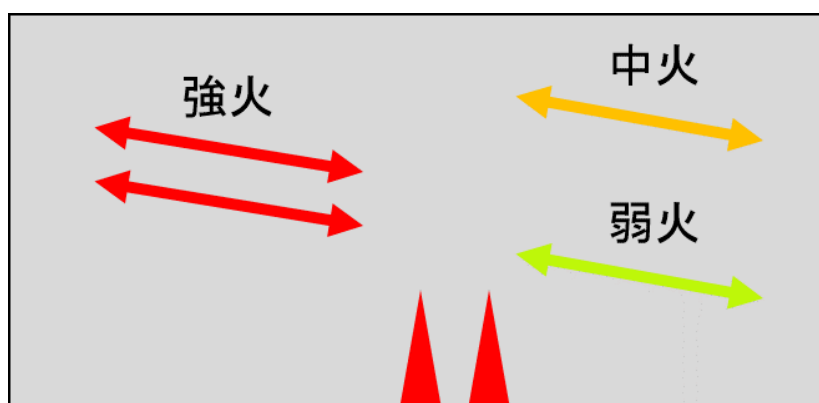


図 8-2 色や文字情報の付与による情報提示のイメージ

8.2.4 外部応力の影響の検討

7.4 では実際に本エンジンの指示に従い、加熱加工を行う実験を行った。具体的には本エンジンが出力した 7 本の加熱線のうち、最も所要収縮量の値が大きい 1 本の加熱線に従って作業員が加熱を行い、加熱前後の形状を比較した。このとき出力した加熱指示線を図 7-19 に示したが、改めて図 8-3 に再掲する。ここでは右下の橙色の円で囲んだ箇所について、検討を行う。この箇所には、同じ向きに「曲げ過ぎ」の箇所の修正を意味する青色の加熱指示線が 4 本の表示されている。また 4 本の加熱指示線に対して右下側の精度評価カラーマップは赤色になっており、設計データと比較して膨らんでいることがわかる。その要因を詳細に検討するために、図 8-4 に該当箇所の計測データを示す。これはレーザスキャナで計測した生のデータであるため、部材以外の情報が含まれている。

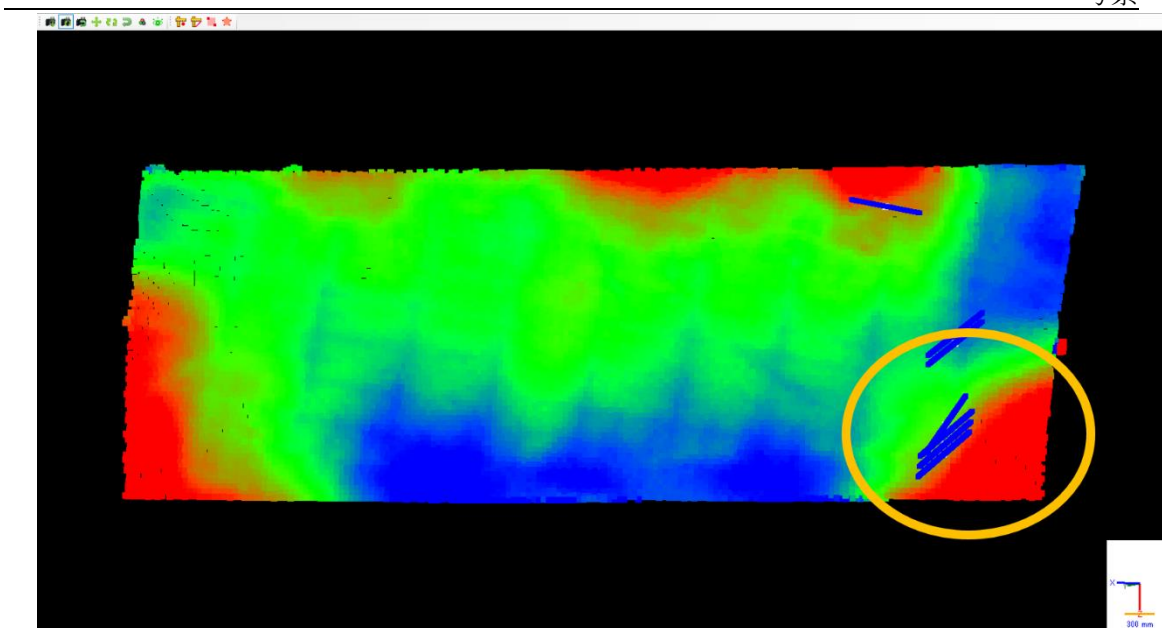


図 8-3 生成された加熱指示線と検討箇所

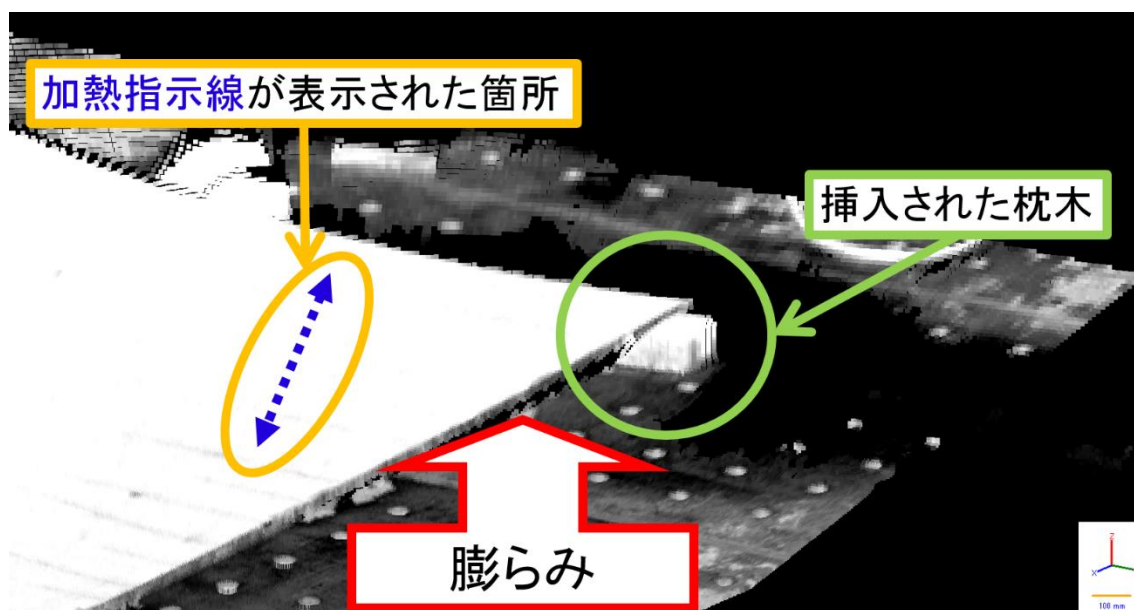


図 8-4 検討箇所周辺の計測データ

図 8-4 から分かるように、緑色の円で囲まれた箇所は作業員が差し込んだ枕木が、定盤と部材の間に挿入されている。なお橙色の円で囲まれた箇所は本エンジンが加熱指示線を提示した箇所であり、青色の点線矢印でその一例を示している。7.4.4 で述べたように、実験後におこなった作業員へのインタビューで、「該当する枕木は無理に押し込んでしまった可能

性がある」といった趣旨のコメントが得られている。このコメント内容は精度評価カラーマップから判断できる部材の形状(膨らみが発生している)と整合する為、信頼性が高いといえる。従ってこのケースは、図 8-5 に示すように、作業員が枕木を無理に挿入したため上向きに過剰な外部応力が生じ、それに伴う局所的な弾性歪が発生したと分析できる。そして弾性歪が発生した箇所を本エンジンが「曲げ過ぎ」箇所として検知し、それを修正する加熱指示線を提示したと考えられる。

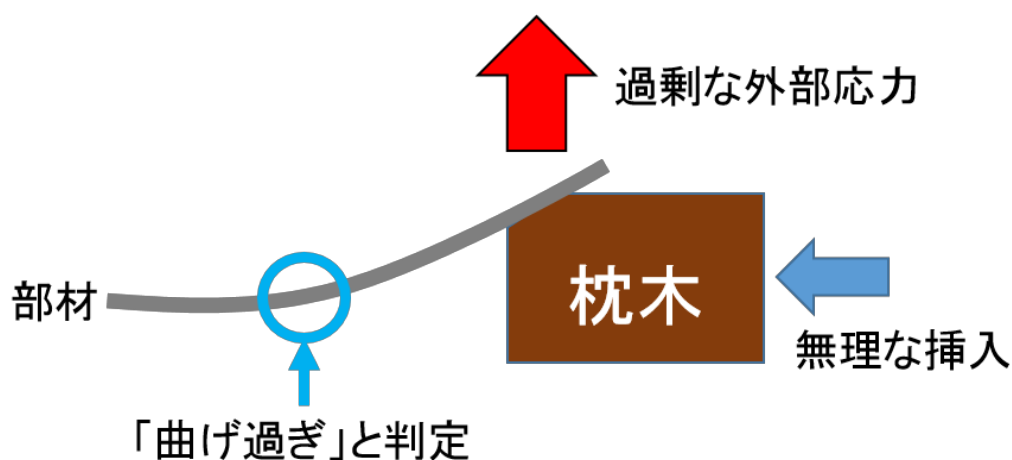


図 8-5 検討箇所の部材と枕木の関係

以上の検討結果より、このケースで本エンジンが提示した加熱線のうち、4本の加熱線は、枕木による外部応力の影響を受けているといえる。つまり「作業員による枕木挿入の程度」という不確実性の影響が強い場合は、部材の形状誤差が(1)枕木を初めとした外部応力の影響なのか、(2)部材の塑性変形の過不足による影響なのか、を本エンジンの出力結果だけでは判定できないことが分かる。その場合、本来加熱加工をするべきではない箇所に対して誤った指示をしてしまう可能性がある。この現象は剛性が低い部材であればあるほど、顕著に表れると推察される。従って本エンジンを効果的に活用するためには、「作業員による枕木挿入の程度」という不確実性をできるだけ排除する必要がある。具体的には、シミュレーションにより事前に枕木の高さを計算し、作業員はその結果に応じて枕木を挿入する仕組みを構築するなどが考えられる。

8.2.5 レーザスキャナの変数の設定について

実現場でのシステムの運用を考える際に、システムが出力する加熱指示情報の品質・信

頼性だけではなく、計測や解析による待ち時間も現場の要求として検討する必要がある。そこで以下では、レーザスキャナの計測の変数に着目し、その影響を考察する。

7.2.4で明らかにしたように、システムによる法曲率算出の精度はレーザスキャナによる計測の精度と点密度に大きく依存する。具体的には、計測精度が高ければ高いほど、そして点の密度が大きければ大きいほど、誤差のばらつきは小さくなる。一方で、計測精度と点の密度を向上させる場合、実際のレーザスキャナでは計測時間が長くなる。また点の密度を向上させる場合は、計算時間が長くなる。つまり「算出の精度」と「計測や算出に生じる時間」はトレードオフの関係にある。

また7.2ではレーザスキャナの計測の精度と点密度のみを変動させたが、実際には導入する現場の環境によってレーザスキャナと部材の位置関係も変動する。具体的には図8-6(左)のように部材とスキャナの距離が広がることでレーザ光が当たるピッチ間隔が広がり、点密度が小さくなる。また同様に図8-6(右)のような位置関係の場合は、同じ外板上でも取得される点密度の濃淡の差が広がる。本研究における現場実験では問題とはならなかったが、もし点密度の差がシステムの実出力結果に大きな影響を与える場合は、密度を均等にする間引き処理などにより対応を行う必要がある。

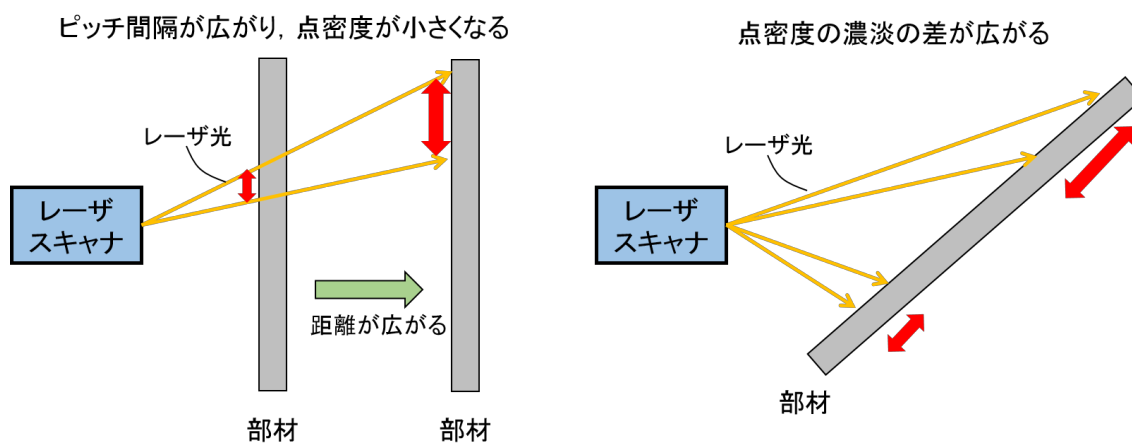


図 8-6 位置関係の変動による計測データの変化

従って実際に現場に本エンジンの導入を検討する際は、実証実験や本研究で使用したシミュレーションの活用などにより、現場の要求や制約条件を満たすレーザスキャナの変数を設定する必要がある。

8.3 指示投影エンジンの精度と範囲に関する考察

投影による加熱指示を行う上で投影の精度は重要である。そして投影の精度はプロジェクタのキャリブレーションの精度に依存し、キャリブレーションに使用するデータ、すなわち「プロジェクタの画像上の点と対応する 3 次元空間中の点の座標の組み合わせ」の精度に主に影響を受ける。本研究では、投影の精度に関しては詳細な検討を行っていないが、実際に現場で使用する際には現場で要求される投影の精度を明確にし、その精度を満たすキャリブレーションの手法を選定する必要がある。

また精度を担保したうえで投影範囲を広げるためには、キャリブレーションに使用するデータの範囲を広げる必要がある。例えば、本研究で行ったプロトタイプでは、外板の模型上に設置したマーカーを用いてキャリブレーションを行ったため、キャリブレーション実施後に模型を動かさなければ図 7-27 に示すように一定の精度で投影が出来る。しかし模型の位置を少しずらした後に 7.5.2.3 と同じデモンストレーションを行うと、図 8-7 に示すように投影に誤差が発生する。実際の外板の加工工程において、外板の形状は逐次変化し、また反転作業などにより外板の位置は変動する。また外板の大きさも多種多様である。従って、安定的な投影を実現するためには、対象となる外板の形状変化や多少の移動を十分にカバーした範囲でキャリブレーションを行っておく必要がある。また 1 台のプロジェクタで対応できない大きさ外板の場合は、複数のプロジェクタを使用するなどの対応が求められる。

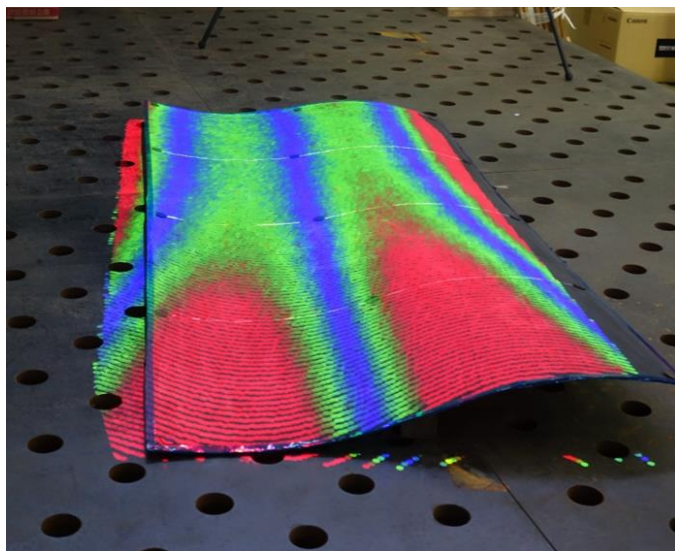


図 8-7 投影位置に誤差が発生するケース

第9章 結論

9.1 結論	125
9.2 今後の展望	126
9.2.1 加熱指示の高度化	126
9.2.2 造船所での実用を考慮したシステムの再設計	126

9.1 結論

本研究では、レーザスキャナと空間型 AR を用いた曲がり外板の加熱加工指示システムの開発を行った。具体的には、計測した加工途中の曲がり外板の 3 次元形状と設計データを用いて加熱指示を生成し、プロジェクタから外板上に指示映像を投影することで、作業員に加工指示を行うシステムである。

本研究ではシステム全体の構想を提案した上で、システムを(1)加熱指示生成エンジンと(2)指示投影エンジンに分けて開発した。また各エンジンを検証実験により評価した。具体的に行った取り組みと、得られた知見を以下に述べる。

加熱指示生成エンジンを開発し、その評価を行った。

レーザスキャナで計測した外板の任意点における複数方向の法曲率を算出し設計データと比較することで、曲率の誤差が大きい箇所を修正する加熱指示を生成するエンジンを開発した。また開発したエンジンを実装し、以下のように評価した。

➤ テストデータを用いた法曲率算出の精度の検証を行った

レーザスキャナによる計測の誤差が、加熱指示生成エンジンを用いた法曲率算出の精度に与える影響を検証した。具体的には、レーザスキャナ・シミュレータにより生成した、テストデータの法曲率を加熱指示生成エンジンを用いることで算出し、真の法曲率を比較することで感度解析を行った。その結果、レーザスキャナによる計測の精度および点密度が与える精度のばらつきを確認できた。

➤ 実環境における法曲率算出の実用性を評価した

加熱指示生成エンジンを用いた法曲率算出の実用性を評価した。具体的には、造船所で取得した外板の計測データの法曲率を加熱指示生成エンジンを用いて算出し、作業員による形状評価の結果と比較した。その結果、加熱指示生成エンジンを用いた外板の法曲率算出は実現場でも有効に機能することを示した。

➤ 加熱指示生成エンジンの実現可能性を評価した

造船所にて加工途中の外板に対して加熱指示生成エンジンを適用し、出力した加熱指示に従って加工を行った。その結果、加工により外板の法曲率が修正されて形状が完成形状に近づくことを確認し、加熱指示生成エンジンによる加工方案の決定が十分実現可能であることを示した。

指示投影エンジンを開発し、その評価を行った

空間型 AR の技術を用いて、プロジェクタから外板の特定箇所に加熱指示を映し出す指示投影エンジンを開発し、必要な設備と合わせてプロトタイピングを行った。そして外板の模型を用いて加熱指示プロセスを模擬した実験を実施し、空間型 AR の活用により加熱指示に要する時間が有意に短くなることを示すことで、情報投影による加熱指示の有用性を示した。

9.2 今後の展望

今後の展望を以下に述べる。

9.2.1 加熱指示の高度化

曲がり外板の加熱加工工程の技術化という観点で、本研究で取り組んだ追加の線状加熱指示線の提示に加えて、加熱量や加熱方法を付与した、より高度な加熱指示を提示する手法を検討することが求められる。

9.2.2 造船所での実用を考慮したシステムの再設計

本研究では、提案した加熱加工指示システムを構成するエンジンを独立に実装して、それぞれの検証を行った。これらエンジンを1つのシステムとして統合し、実際の造船所への導入を進めるためには、システムの品質・信頼性・安定性の向上はもとより、運用時に作業員に要する手間や計測や解析の待ち時間の削減、取得したデータの管理方法、自動化などを考慮したシステムの再設計が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々にご助力を頂きました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

指導教員である東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 准教授 稗方 和夫先生には、学部生時代から約3年間大変お世話になりました。研究活動に対する指導に加え、日常生活においても浅はかな考えを持ちがちな私を根気よく指導してくださり、一人の人間として大きく成長させてもらいました。また研究プロジェクトや国内外での発表など、多くの挑戦の機会を惜しみなくいただけた経験は、私にとってかけがえのない財産となりました。本当にありがとうございました。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 特任准教授 Bryan R Moser 先生には、研究に関する大変有益で献身的なアドバイスを数多くいただきました。また海外大学の学生との交流の場も数多く用意してくださり、国際的な感覚を学ぶことが出来ました。そしてボストンでの体験活動や産学連携プロジェクトの運営など、研究活動以外でも私に多くの学びと成長の機会をくださいました。本当にありがとうございました。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 助教 満行泰河先生には、研究の組み立てから実験実施に至るまで、未熟な私にいつも全力でご指導をしていただきました。先生のご支援なくして本論文を執筆することは恐らく出来なかったと言えます。そして日常生活においても、常に本気で勝利を求める姿勢を3年間目の当たりにし、私は先生から男としての生き様を学ぶことが出来ました。本当にありがとうございました。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 技術専門員 榎本昌一様には、技術者の立場から研究相談や実験準備を通して全面的にご支援をいただきました。また研究が行き詰ったときには、私の話を聞いて優しいお声掛けをいただき、私は幾度も救われました。深く感謝申し上げます。ありがとうございました。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 秘書 山本和子様には、研究室の事務手続きを初めとする環境整備を行っていただきました。また日々のランチやお茶の

時間を通して、私の他愛もない話を笑顔で聞いてくださり、日々山本様の優しさに包まれる思いでした。本当にありがとうございました。また一緒にお菓子を食べながら、コーヒーを飲みましょう。

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 理事長 大和裕幸様には、私が学部4年時には研究室の教授として、研究活動に加え日常生活での在り方など多くを学ばせていただきました。そして修士課程の2年間でも学会等でお会いする度にご指導と激励のお言葉を賜りました。ありがとうございました。

国立研究開発法人産業技術総合研究所 主任研究員 古川慈之様には修士課程の2年間を通して、幾度も研究方針や論文に関するご指導をしていただきました。技術者たるものの現象や意見に囚われず、本質を見極めた上で信念と誇りを持ち研究に臨むべしという古川様の教えは、研究活動において私の心の支えとなりました。深く御礼申し上げます。

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 松尾宏平様、竹澤正仁様には、実験場所の提供や技術的アドバイスなど、共同プロジェクトを進めさせていただく中でいつも全面的にご支援をいただきました。お二方との切磋琢磨を通して、私は研究を力強く進めることが出来ました。本当にありがとうございました。

今治造船株式会社 紙田健二様、佐藤重信様、今状伸司様、木村貴幸様、玉木健一様、宮前功様、仲野健太様、上田恭平様には共同プロジェクトを進めさせていただくにあたり、主に実験実施に際して、全面的に多大なるご支援をいただきました。現場目線での有益な意見を多くいただき、皆様のご協力あってこそ修士論文を執筆できたといっても過言ではありません。本当にありがとうございました。

一般財団法人日本海事協会 船津裕二様、松本俊之様、平田純一様、山田智章様には、共同プロジェクトの進行を通じて数多くの建設的な助言を賜りました。本当にありがとうございました。

株式会社ユニークス 杉山達彦様、鎌田幹夫様、矢野寿春様にはソフトウェアの開発やレーザスキャナの借用、そして実験実施において多大なるご支援をいただきました。厚く御礼

申し上げます。本当にありがとうございました。

愛媛大学 教授 土岐直二様には、ご自身の経験を踏まえた大変有益かつ本質を突くアドバイスを数多く賜りました。本当にありがとうございました。

稗方研究室の卒業生である中村覚様、後藤拓矢様、上野隆治様には、ご在籍時には研究室の先輩として研究活動だけではなく日常生活でも数多くのご指導を賜りました。皆様との研究室生活は本当に楽しく、充実な時間でもございました。またご卒業後も私のことを気にかけてください、大変有難くそして心強く感じておりました。ありがとうございました。

研究室の先輩である博士課程の岡田伊策様、笈田佳彰様、和中真之介様には日頃より研究活動における数多くのご指導をいただきました。岡田様と笈田様には、修士論文の提出直前の日本語や数式確認に進んで取り組んでいただきました。和中様は学部4年生の頃よりほぼ毎日、至らぬ私を辛抱強く指導してくださいました。研究活動に留まらず、仕事への取り組みや後輩育成の姿勢など、和中様から本当に多くを学びました。厚く御礼申し上げます。本当にありがとうございました。

研究室の同輩である水林義博様、伊藤航大様、Nat Hengsadeekul 様とは、同期として研究生生活を共にし、日々切磋琢磨することが出来ました。特に伊藤様とは学部4年生の頃からの同期として、3年の間、共に数多くの苦難を乗り越えてきました。時に意見が合わず、すれ違う事もありましたが、伊藤様から多くを学び、若干不器用でありつつも心優しい伊藤様に私はいつも支えられていました。本当にありがとうございました。

研究室の後輩である宇野健介様、王汝佳様、Qin Yuanyuan 様には主に研究室運営を担っていただき、修士論文に集中する環境を作ってくださいました。また日常生活でも多くの時間を共にし、充実した研究生生活を過ごさせてくださいました。ありがとうございました。

学部4年生の小沢健悟様、三浦笑峰様には学部生とは思えぬ意欲の高さに、私の方がいつも元気をもらっていました。本当にありがとうございました。

最後になりましたが、大学院生活を実りあるものにしてくれた数多くの友人と、私をいつも

謝辞

応援し支え続けてくれた家族に最大限の感謝の意を表し、本論文の結びとさせていただきます。これからも宜しくお願いします。本当にありがとうございました。

2018年2月8日

岡田航太

参考文献

-
- [1]. R. Storch, C. Hammon, H. Bunch, and R. Moore, “Ship Production 2nd Edition”, Cornel Maritime Press, 1995.
- [2]. 池田良穂: プロが教える船のすべてがわかる本, ナツメ社, 2009.
- [3]. 奥本泰久, 大沢直樹: 船舶海洋工学シリーズ⑨ 造船工作法, 成山堂書店, 2012.
- [4]. 奥本泰久: 造船技術と生産システム, 成山堂書店, 2009.
- [5]. 丹後義彦, 石山隆庸, 永原章二, 長島智樹, 小林順: 線状加熱自動鋼板曲げシステムの実船適用, 日本造船学会論文集, 第 193 号, pp. 85-95, 2003.
- [6]. 稗方和夫, 大和裕幸, 笈田佳彰, 榎本昌一, 古川慈之, 牧野有紀, 杉廣武俊: レーザースキャナによる曲がり外板の工作精度評価システムの開発, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 13, pp. 231-238, 2011.
- [7]. ソンショウギョク, 稗方和夫, 大和裕幸, 中垣憲人, 菅原晃佳: 3D 計測データとバーチャル木型を用いた曲がり外板加工方案生成システムの開発と評価, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 19 号, pp. 603-606, 2014.
- [8]. 篠田達也, 永田優次: 3D 計測技術の動向とその応用, コマツテクニカルレポート, Vol. 61, No. 168, pp. 13-17, 2015.
- [9]. 3D Station NET1AXII, Available at <http://www.topcon.co.jp/positioning/sokkia/products/pdf/NET-AXII_J.pdf>, Accessed on February 8, 2018.
- [10]. 遠藤健, 池野谷尚史, 古賀祐一郎, 倉爪亮: 三次元形状計測装置を用いた建設構造物の施工管理システムの開発, 日本ロボット学会誌, 第 30 巻, 第 1 号, pp. 84-90, 2012.
- [11]. D. E. Kim and T. H. Chen, “A Virtual Erection Simulation System for a Steel Structure Based on 3-D Measurement Data”, Journal of Marine Science and Application, Vol. 11, pp. 52-58, 2012.
- [12]. 蚊野浩, 金出武雄: 任意のカメラ配置におけるステレオ視とステレオカメラ校正, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J79-D2, No.11, pp. 1810-1818, 1996.
- [13]. 杉本茂樹, 本岡昂馬, 奥富正敏, 志磨健: 車載ステレオカメラを用いたロ
-

-
- バストな 3D 地表サーフェスマップ生成, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J98-D, No.4, pp. 627-638, 2015.
- [14]. H. Joo, T. Simon and Y. Sheikh, “Total Capture: A 3D Deformation Model for Tracking Faces, Hands, and Bodies”, arXiv, 2018.
- [15]. 松岡諒, 増田宏: 大規模点群からの生産設備の形状再構成 (第 1 報) -抽出曲面に基づく接続部材の推定と適合度評価-, 精密工学会誌, 第 80 巻, 第 6 号, pp. 604-608, 2014.
- [16]. 松岡諒, 増田宏: 大規模点群からの生産設備の形状再構成 (第 2 報) - 複数の点群データからの統合的な部材形状の再構成-, 精密工学会誌, 第 80 巻, 第 10 号, pp. 939-943, 2014.
- [17]. 中垣憲人, 菅原晃佳, 稗方和夫, 大和裕幸, ソンショウギョク: レーザスキャナによる曲がり外板の工作精度評価システムの研究開発(第 2 報), 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 17, pp. 169-176, 2013.
- [18]. J. Sun, K. Hiekata, H. Yamato, N. Nakagaki and A. Sugawara, “Virtualization and automation for knowledge extraction in curved shell plates’ machining plan design process”, *Int. J. Agile Systems and Management*, pp. 282-303, Vol. 7, 2014.
- [19]. 松尾宏平, 松岡一祥: 船舶の曲り外板製造を支援する新しい外板展開システムの開発, 日本機械学会論文集 (C 編), 第 76 巻, 第 771 号, pp. 2797-2802, 2010.
- [20]. 丹後義彦, 石山隆庸, 鈴木博之: 船殻外板の全自動曲げシステム”IHIMU- α ”の開発, IHI 技報, Vol. 51, No.1, pp. 24-29, 2011.
- [21]. J. Park, D. Kim, C. Hyun, J. Shin and K. H. Ko, “Thermal forming automation system for curved hull plates in shipbuilding: analysis and design”, *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 29, pp. 287-297, 2016.
- [22]. J. Park, D. Kim, S. Mun, K. Kwon, J. Lee and K. H. Ko, “Automated thermal forming of curved plates in shipbuilding: system development and validation”, *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, Vol.29, pp. 1128–1145, 2016.
- [23]. Microsoft HoloLens, Available at:< <https://www.microsoft.com/ja->
-

-
- jp/hololens>, Accessed on February 8, 2018.
- [24]. 松尾宏平, 藤本修平, 白石耕一郎: 造船工程への AR 技術の応用・実用化に関する研究, 海上技術安全研究所報告, 第 14 巻, 第 1 号, 2014.
- [25]. 3 次元モデル AR を用いた保守点検作業支援技術, Available at: <<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2016/pdf/1107.pdf>>, Accessed on February 8, 2018.
- [26]. A. Doshi, R. T. Smith, B. H. Thomas and C. Bouras, “Use of projector based augmented reality to improve manual spot-welding precision and accuracy for automotive manufacturing”, *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, Issue 5 – 8, pp. 1279-1293, 2017.
- [27]. M. K. Park, K. J. Lim, M. K. Seo, S. J. Jung and K. H. Lee, “Spatial augmented reality for product appearance design evaluation”, *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 2, Issue 1, pp. 38-46, 2015.
- [28]. R. Krempien, H. Hoppe, L. Kahrs, S. Daeuber, O. Schorr, G. Eggers, M. Bischof, M. W. Munter, J. Debus and W. Harms, “Projector-based augmented reality for intuitive intraoperative guidance in image-guided 3D interstitial brachytherapy”, *Int. J. Radiation Oncology-Biology-Physics*, Vol. 70, No. 3, pp. 994-952, 2008.
- [29]. J. Baumeister, S. Y. Ssin, N. A. M ElSayed, J. Dorrian, D. P. Webb, J. A. Walsh, T. M. Simon, A. Irlitti, R. T. Smith, M. Kohler and B. H. Thomas, “Cognitive Cost of Using Augmented Reality Displays”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 11, pp. 2378-2388, 2017.
- [30]. J. Mankins, “Technology readiness and risk assessments: A new approach”, *Acta Astronautica*, Vol. 65, Issue 9-10, pp. 1208-1215, 2009.
- [31]. 環境省 地球環境局: TRL 計算ツールマニュアル<初版>, 2014.
- [32]. G. Farin, “Curve and Surfaces for Computer Aided Geometric Design A Practical Guide Second Edition”, Academic Press, 1990.
- [33]. L. Piegl and W. Tiller, “The NURBS Book 2nd Edition”, Springer, 1996.
- [34]. I. Jolliffe, “Principal Component Analysis, Second Edition”, Springer, 2002.
-

-
- [35]. M. Gross and H. Pfister, “Point-based Graphics”, Morgan Kaufmann Publishers, 2007.
- [36]. J. S. Beis and D. G. Lowe, “Shape Indexing Using Approximate Nearest-Neighbour Search in High-Dimensional Spaces”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1000-1006, 1997.
- [37]. H. Okuda, M. Hashimoto, Y. Kitaaki and Y. Kaneko, “Fast and high-precision 3-D registration algorithm using hierarchical M-ICP,” *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Technical Report of IEICE, PRMU2003-54*, pp. 1-8, 2004.
- [38]. J. Sun, K. Hiekata, H. Yamato, N. Nakagaki, A. Sugawara and Y. Kaneko, “Efficient point cloud data processing in shipbuilding: Reformative component extraction method and registration method,” *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 1, Issue 3, pp.202-212, 2014.
- [39]. PUPULPIT, Available at:<<http://pupulpit.com/>>, Accessed on: February 8, 2018.
- [40]. 佐藤淳: コンピュータビジョン - 視覚の幾何学 -, コロナ社, 1999.
- [41]. OpenCV, Available at:< <https://opencv.org/>>, Accessed on February 8, 2018.
- [42]. OpenCVSharp, Available at:< <https://github.com/shimat/opencvsharp>>, Accessed on February 8, 2018.
- [43]. Kazuo Hiekata, Taiga Mitsuyuki, Masakazu Enomoto, Kota Okada and Yoshiyuki Furukawa, “Spatial Augmented Reality for Manufacturing Information of Curved Shell Plates”, *Proc. of the 18th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*, Vol. 2, pp.115-120, 2017.
- [44]. FARO Laser Scanner Focus 3D X130 HDR, Available at:<https://www.faro.com/download-center/download-centre/04ref101-073---faro-laser-scanner-focus3d-x-130-hdr_jp.pdf>, Accessed on: February 8, 2018.
- [45]. Microsoft Surface Pro 4, Available at:<[134](https://www.microsoft.com/ja-</p><hr/></div><div data-bbox=)

jp/store/b/surface>, Accessed on: February 8, 2018.

[46]. Canon WUX6000, Available at:<
<http://cweb.canon.jp/projector/lineup/wux6000/spec.html>>, Accessed on:
February 8, 2018.

[47]. R. Raskar, G. Welch and K. L. Low, “Shader Lamps: Animating real
objects with image-based illumination”, In Proceeding of the
Eurographics Workshop on Rendering, pp. 89-102.

Appendix

a. 外板加工工程について

ここでは本論文の主題である曲がり外板の加工工程の手順について説明し、続いてその加熱加工、通称「ぎょう鉄」のメカニズムについて説明を行う。本節は、奥本らの書籍[4]をもとに記述している。

曲がり外板の加工は、冷間加工(Cold forming)と加熱加工(Thermal forming)の2通りに分けられる。冷間加工は1次加工として、ベンディングローラーやプレス機を用いて板幅方向の大きな曲率を成形するプロセスである。プレス機によるプレスの様子を、図 9-1 に示す。造船のプレスは多くの場合、2次元の曲げ加工に利用されるため U 字または V 字型断面を持つ押し治具を装着して、一方向の曲げを与える。ベンディングローラーはシップベンダーとも呼ばれ、長いローラーで鋼板を挟み込むことで曲げを与える。これによりローラー軸に平行な円筒や円錐で構成される可展開曲面を生成する事が出来る。



図 9-1 プレス機によるプレスの様子

ついで加熱加工は、冷間加工の後の2次加工として加熱により目標形状に仕上げる作業であり、ぎょう鉄と呼ばれる。単純で曲率の大きな曲げを目的とした冷間加工とは異なり、加

熱箇所と入熱量を制御することで複雑な曲面の成形が可能である。また加熱加工を行う際の補助手段として、鋼板を枕木で支える事で自重による内部応力を制御し、治具を用いて定盤に拘束して弾性歪を与えることで塑性変形を増加させることも行われている。作業員は木型を用いながら図 1-2 で述べたプロセスを繰り返し、外板を完成させる。

つづいて、ぎょう鉄のメカニズムと目的形状に応じた加熱方法について説明する。変形の定性的なメカニズムを図 9-2 に表す。まずガスバーナーにより鋼板を局部的に加熱することで、その付近は剛性が低下しつつ膨張する。一方でその周辺の鋼板は温度が低く剛性が高い。そのため加熱を行った箇所は拘束の少ない表面から面外方向に向かって膨張し、多少盛り上がる。熱源の移動および放水による冷却によって、温度が下がり熱が周囲に伝わることで一気に収縮が生じる。そしてこの収縮により面外への角変形が起こる。局所加熱がより長い時間行われると、板厚全体に収縮が生じるため面内方向に変形が起こる。

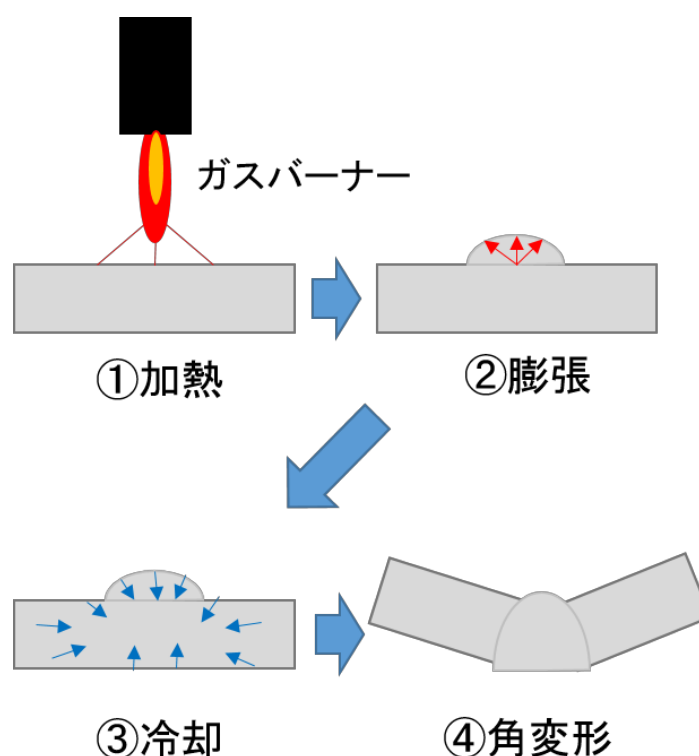


図 9-2 ぎょう鉄による変形のメカニズム

作業員は加熱方法や加熱時間、炎の温度を調整することで経験的にこの変形を使い分け

ることで、曲面を成形している。その代表的な加熱方法を図 9-3 に示す。最も一般的である線状加熱は、熱源を一定のスピードで直線的に移動させながら加熱を行う。また三角焼きと呼ばれる加熱方法は、熱源を狭い範囲で往復移動させながら加熱を行うことで、より大きな収縮量を得る事が出来る。三角焼きは、周囲の鋼板からの拘束が小さくなる板端部で収縮変形を得るために多用される。

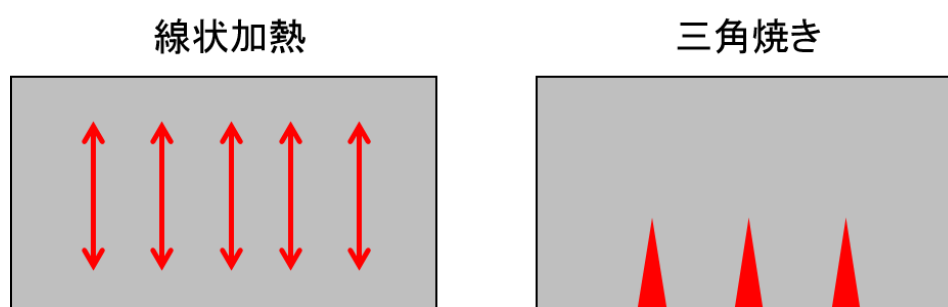


図 9-3 加熱方法の種類

b. キャリブレーション用のソフトウェアについて

ここでは、7.5.2.2 で行ったプロトタイピングにおける、プロジェクトのキャリブレーションを行った際のソフトウェアについて述べる。本ソフトウェアは、5.5 と同様に、Pupulpit のプラグインとして別途実装した。

ソフトウェアが要する機能は、主に以下の 2 つである。

- ① マーカーの 3 次元座標の抽出
- ② マーカーに対応するプロジェクトの画像座標の抽出

以下、それぞれについて述べる。

- ① マーカーの 3 次元座標の抽出

(ア) レーザスキャナで計測したデータを Pupulpit に読み込む。

点群データを図 9-4 のように読み込む。

(イ) マーカーの周辺をクリッピングする。

Pupulpit の基本機能であるクリッピング機能を用いて、マーカーがすべて含まれ

るように 1 つずつ周辺を切り取る. 切り取った点はワークスペースに「Plane_Cut」という名前が表示される. 図 9-5 では 2 つのマーカ―に関してクリッピングを行った様子を示す.

(ウ) 重心を抽出し, 出力する.

全てのマーカ―に対してクリッピングを完了したら, 「プラグイン→プロトタイプ→マーカ―抽出」をクリックする. このときの処理は, 以下の通りである.

1. クリッピングした各マーカ―の点群データを読み取り, 反射光強度が閾値を超える点だけを抽出する. マーカ―は反射光強度が強い為, 適切な値を設定すればマーカ―以外の点が除かれる.
2. 抽出した点の重心を計算する.
3. 各マーカ―の点群データに関して計算を終えたら, 重心座標を並べた CSV ファイルを出力する.

最終的に抽出されたマーカ―の重心座標は図 9-6 のように赤色点で描画される. プロトタイプの場合, 閾値を 100 程度にすると, 綺麗にマーカ―のみが抽出された. 出力された CSV ファイルを読み取ることで, キャリブレーションに用いるマーカ―の 3 次元座標を取得できる.

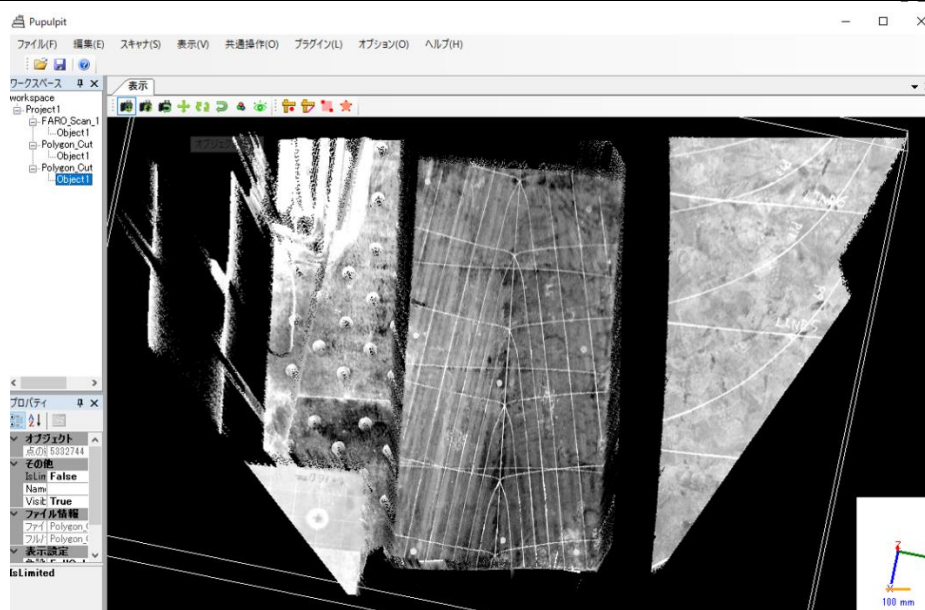


図 9-4 データの読み込み

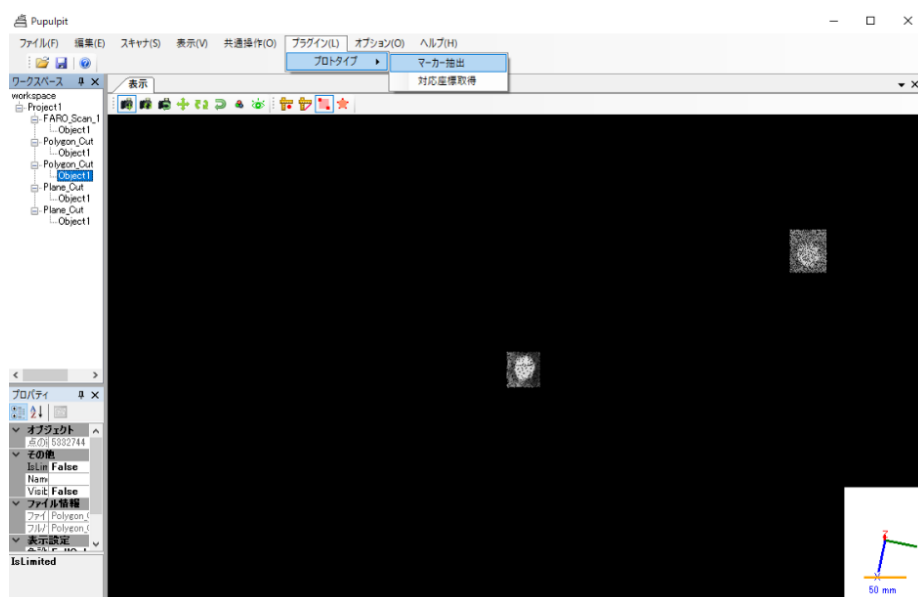


図 9-5 マーカー周辺のクリッピング

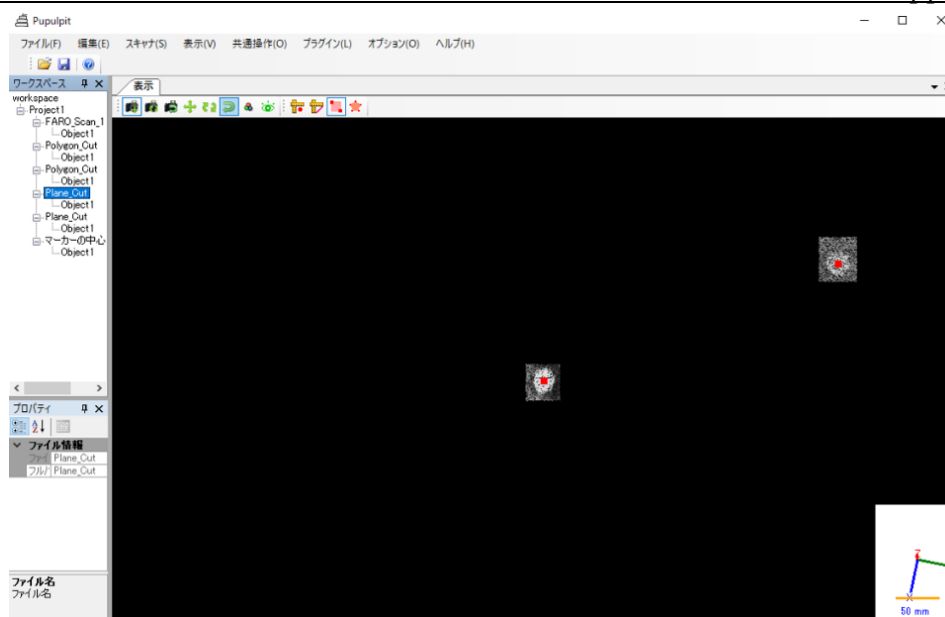


図 9-6 重心の抽出

② マーカーに対応するプロジェクトの画像座標の抽出

(ア) 座標取得ウィンドウの立ち上げ

「プラグイン→プロトタイピング→対応座標取得」をクリックすると、接続したプロジェクトの入力となるスクリーンに、スクリーンと同じサイズで枠の無い白色のウィンドウを新規に立ち上げ、そのウィンドウの全画面に画像を描画する。

(イ) 対応点の取得と出力

投影されている映像を見ながら、十字キーを操作することで、ウィンドウ上に描画されている十字映像を動かす。マーカーの中央の印と十字の交差点が重なり合ったと判断した際に、キーボードの **Space** キーを押すと、その時の交差点の画素座標を取得する。全てのマーカーに対して座標取得が終わった後、**Enter** キーを押すと、抽出した座標を並べた **CSV** ファイルを出力する。

出力された **CSV** ファイルを読み取ることで、キャリブレーションに用いるプロジェクトの画像座標を取得できる。