

# 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

47166685 岡田 航太  
指導教員 稗方 和夫 准教授

Since thermal forming process for ship curved shell plates is depending on workers' knowledge and experience, problem remains in quality and duration. In this paper, instruction system for this process using laser scanner and Spatial Augmented Reality (SAR) was developed. System evaluates normal curvature of a plate and generates heating lines, by comparing design shape and a plate in fabrication. Then it enables workers to recognize heating lines by projecting a rendered image onto plate from a projector. Heating line generating engine was developed and applied to plates at shipyard, and usefulness was verified by conducting experiments. Also, prototype of projecting instruction engine was developed, and effectiveness was validated by conducting a simulation.

Key words: Curved Shell Plate, Laser Scanner, Thermal Forming, Spatial Augmented Reality

## 1 緒言

船舶の外殻を構成する外板はぎょう鉄と呼ばれる加熱加工で成形される。ぎょう鉄は明確な標準化が為されておらず、経験と暗黙知に基づく属人的な作業であるため、品質や工期のばらつきが課題となっている。これまで全自動化<sup>1)</sup>や精度評価<sup>2)</sup>に関する研究が進められてきたが、加熱加工途中の作業指示に関する研究は未成熟である。

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う。

## 2 提案する加熱加工指示システム

### 2.1 システムの概要

Fig. 1 に提案システムのコンセプトを示す。まず設計データとレーザスキャナによる外板の計測データを用いて、計算機が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視認し、作業を行う。以下の節ではシステムを構成する 2 つのエンジン、(1)加熱指示生成エンジンと(2)指示投影エンジンについてそれぞれ説明を行う。

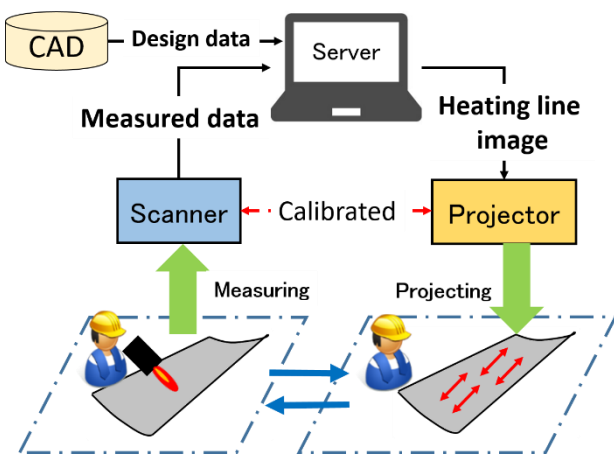


Fig. 1 Concept of proposed system

### 2.2 加熱指示生成エンジンの開発

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エンジンを開発した。具体的には加工途中の外板の法曲率を算出し、設計形状の曲率と比較を行い、その結果に基づき線状加熱の指示線を生成するシステムである。その概要を Fig. 2 に示す。入力データはレーザスキャナに

より取得した「外板の計測点群」と NURBS で表現される「設計曲面データ」、そして曲率評価を行う点の集合である「評価対象の点群」である。評価対象の点群は、CAD ソフト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。

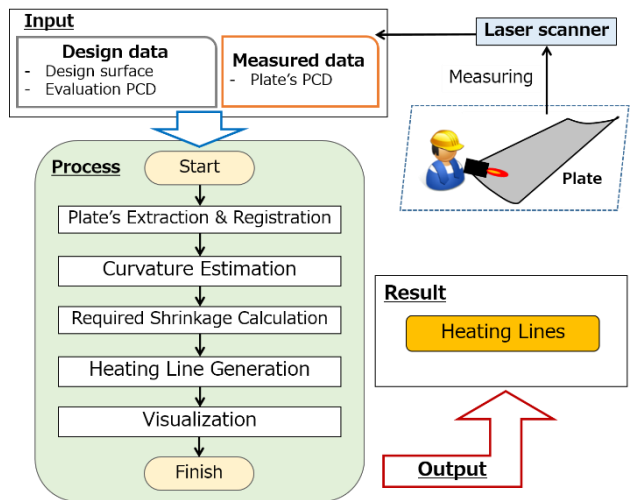


Fig. 2 Heating line generation engine

#### 2.2.1 外板点群の抽出と位置合わせ

計測点群には定盤や枕木といった外板以外のデータも含まれる。そこで領域成長法により外板の形状のみを表す点群（以下、外板点群）のみを抽出する。そして抽出した外板点群を設計曲面データに位置合わせする。ここでは階層的 ICP アルゴリズムを用いて位置合わせを行う。抽出と位置合わせの様子を、Fig. 3 にそれぞれ示す。

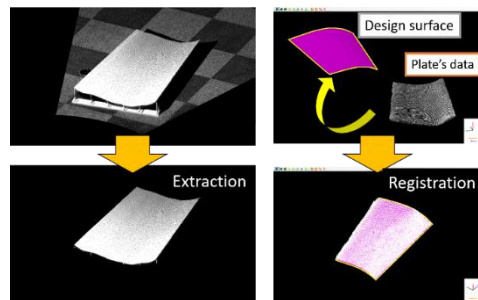


Fig. 3 Plate's extraction and registration

#### 2.2.2 複数方向の法曲率の算出

評価対象の点群  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  の各点に対応する外板の計測点（以下、対応点）における複数方向の法曲率を

算出する。その概要を Fig. 4 に示す。

まず、ある評価対象の点  $f_i$  の最近傍点  $q_i$  を、位置合わせ後の外板点群  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  の中から算出する。そして  $q_i$  の近傍点に対し平面フィッティングを適用することで、法線ベクトル  $n_i$  を算出する。

次に  $q_i$  を通り  $n_i$  を含む法平面  $S_{i,j}$  を算出する。ここで整数  $j = 1, 2, \dots, (\pi/\Delta\varphi)$  をみたし、 $\Delta\varphi$  は  $n_i$  を軸とした法平面の回転角ピッチである。また基準となる  $j = 1$  の平面  $S_{i,j}$  は  $YZ$  平面に直交するとする。そして点群  $P$  の全点と平面  $S_{i,j}$  の距離を計算し、閾値を下回る点を法断面上の点として抽出する。抽出した点は平面  $S_{i,j}$  に正射影する。

最後に  $S_{i,j}$  上に正射影された点に 2 次の重み付き曲線フィッティングを適用し、 $q_i$  における曲率  $c_{i,j}$  を計算する。

以上の計算プロセスを全ての  $f_i$  で実行する。

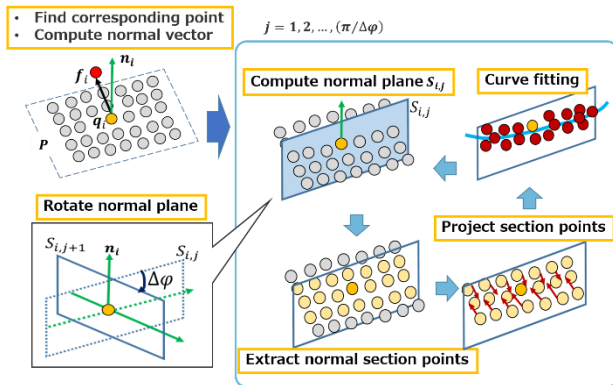


Fig. 4 Curvature estimation in multiple directions

### 2.2.3 所要収縮量の計算

所要収縮量と呼ばれる、ある点の曲率誤差に起因する収縮量を定量化する指標を、加熱指示生成の基準として使用する。これは単位長さ当たり要求される縮み長さの割合を表す。そこで点  $f_i (i = 0, 1, \dots, n)$  における全  $(\pi/\Delta\varphi)$  方向の所要収縮量  $E_i = \{e_1, e_2, \dots, e_{\pi/\Delta\varphi}\}$  を式(1)に従い計算する。

ここで  $m_{i,j}$  は点  $f_i$  における、 $j$  番目の方向の法曲率である。これは点  $f_i$  における設計曲面の法平面を、2.2.2 と同様の向きに  $\Delta\varphi$  ずつ回転させたものと曲面の交線（法断面）から解析的に計算することができる。なお基準となる  $j = 1$  の法平面は、同様に  $YZ$  平面に直交するとする。

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

### 2.2.4 加熱指示線の生成

2.2.3 で計算した各  $f_i$  における所要収縮量の絶対値が閾値  $\varepsilon$  を超える場合は、加熱による修正が必要と判定し、加熱指示を提示する。具体的には、閾値を超える方向の法平面  $S_{i,j}$  の法線ベクトルを方向ベクトルとし、 $q_i$  を中心に両方向に伸びた長さ  $L$  の線分を加熱指示線として生成する。同一の点に関して、複数の方向の所要収縮量の絶対値が  $\varepsilon$  を上回る場合は、その値が最大となるものを加熱線とする。

### 2.2.5 可視化と出力

生成した加熱指示線を一定間隔の点群に変換した上で、Fig. 5 のように 3D ビューワ上で可視化する。ここで所要

収縮量の値が正の場合は赤色、負の場合は青色を点群に付与する。赤色の線は曲げ不足箇所に対する追加の加熱線を、青色の線は曲げ過ぎ箇所に対する修正の加熱線を表す。また加熱線の点群は、2.3 で述べる指示投影エンジンの入力データとして出力される。

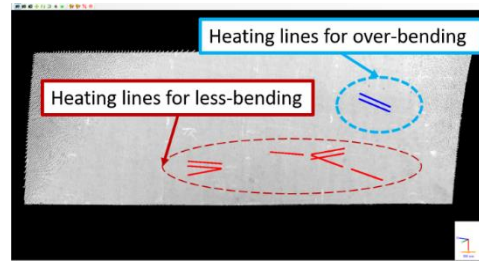


Fig. 5 Visualized heating lines

## 2.3 指示投影エンジンの開発

指示投影エンジンは空間型 AR の技術を用いることで、加熱指示生成エンジンにより出力された加熱指示線の情報を、作業員に直感的に分かりやすい形式で伝達することを目的としたエンジンである。使用するプロジェクタは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、事前にキャリブレーションが行われているものを使用する。キャリブレーションとは 3 次元の世界座標系と 2 次元のプロジェクタ画像座標系との射影関係および位置姿勢を光学的に推定するプロセスである。本研究では、レーザスキャナとプロジェクタの相対位置を固定した状態で、既存手法<sup>3)</sup>によりキャリブレーションを行う。そして加熱指示生成エンジンが出力する加熱指示の点群を、キャリブレーション結果を用いて投影画像に変換し、プロジェクタから外板に向けて投影する。

## 2.4 加熱加工指示システムのハードウェア構成

システムのハードウェアを Fig. 6 に示す。やぐら式に組み上げられた可搬型の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。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経路で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画像を送信できる。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。

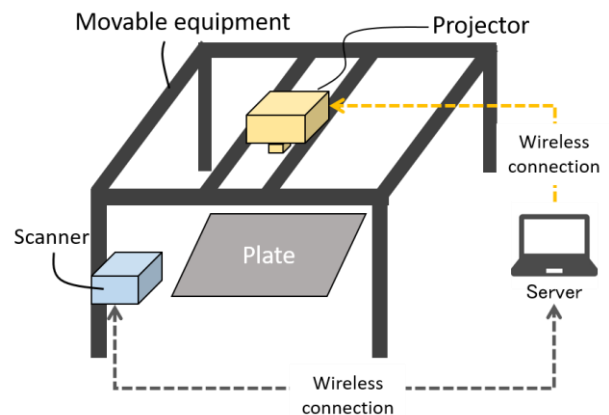


Fig. 6 System's hardware configuration

### 3 実験によるシステムの検証と評価

#### 3.1 実験における法曲率算出の実用性の評価

##### 3.1.1 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。

##### 3.1.2 実験環境

対象とした外板は板幅約 3m、長さ約 9m の腕型の形状をした加工途中の外板である。評価点データは、現行の工程で評価を行う板幅方向のフレーム線上に並んだ離散点を用いた。レーザスキャナは Faro 社の Focus 3D X130 を、計算機は Microsoft 社の Surface Pro 4 を使用した。

##### 3.1.3 実験方法

本実験は、①エンジンによる外板の法曲率の算出、②作業員による木型を用いた形状評価、③作業員による加熱加工、④エンジンによる外板の法曲率の算出、⑤作業員による木型を用いた形状評価、の順で行った。このときエンジンの出力と木型による評価結果を比べるため、法曲率の算出はフレーム線の接線ベクトルを含む方向のみを実施した。実験の様子を Fig. 7 に示す。



Fig. 7 Snapshot of experiment

##### 3.1.4 結果と評価

まず②作業員による評価結果と③追加の加工内容を Fig. 8 に示す。作業員は橙色点線で示したフレーム線 A の形状評価を行い、青丸箇所を「曲げ過ぎ」、赤丸箇所を「曲げ不足」と判定した。そして青丸箇所の修正を目的とし、クレーンを用いて部材を反転させたうえで裏側から青色矢印のような線状加熱を行った。線状加熱の完了後に再び木型を用いてフレーム線 A の形状評価を行ったところ、⑤青丸箇所の曲がりは緩やかになり修正が完了したと作業員は判断した。

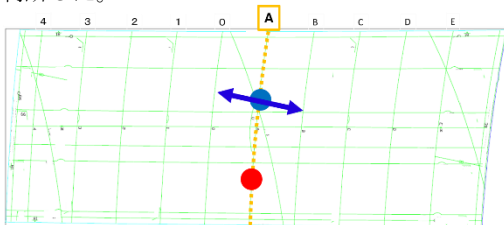


Fig. 8 Evaluation result and heating line

続いて Fig. 9 にフレーム線 A 上の評価点の①加熱前と④加熱後の法曲率の算出結果を示す。横軸がフレーム線 A 上の評価点のインデックス、縦軸が算出した法曲率を表している。インデックスは Fig. 8 の下側（手前側）から順に昇順で自然数を付与した。灰色プロットは設計データから解析的に求められる法曲率、青色プロットは加熱前に算

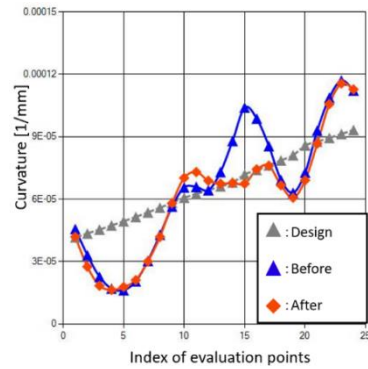


Fig. 9 Evaluation and planning by worker

出された法曲率、橙色プロットは加熱後に算出された法曲率である。結果から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、中央付近が「曲げ過ぎ」であるということが読み取れる。これは Fig. 8 に示した作業員による評価結果と整合している。また加工により加熱箇所周辺の法曲率が設計データに近づくように減少していることが分かる。以上より、エンジンを用いた外板の法曲率算出は実現場環境で有効に機能することを示した。

#### 3.2 加熱指示生成エンジンの実現可能性の評価

##### 3.2.1 目的

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。そして加工により完成形状に近づくかどうかを評価する。

##### 3.2.2 実験環境

本実験では、3.1.2 と同仕様の外板を用意し、それ以外の実験環境は 3.1.2 と同様に設定した。

##### 3.2.3 実験方法

加工途中の外板に対してエンジンを適用し、加熱指示を生成する。そして筆者が作業員に伝達し、その指示に従って加熱加工を行った。回転角ピッチは、 $\Delta\varphi = (\pi/12)$  とした。実験終了後、インタビューを行った。また板の形状変化を確認する為に、加工前後の計測データを中垣らの精度評価システム<sup>2)</sup>に入力し、カラーマップを出力した。

##### 3.2.4 結果と評価

システムが出力した加熱指示線を加工前のカラーマップ上に重ね合わせて表示したものを Fig. 10 (左) に示す。閾値  $\epsilon$  を  $2.5 \times 10^{-4}$  としたところ、7 本の青色の加熱指示線が表示された。本実験では拡大した加熱指示線に従い線状加熱を行った。加工後のカラーマップを Fig. 10 (右) に示す。カラーマップを比較すると、膨らみの誤差を意味する赤色の領域が減少していることが分かる。またインタビューにより、加熱指示は外板の形状に対して妥当なものであるというコメントを得た。以上より、生成される加熱指示は妥当なものであり、指示通りに加熱加工を行うことで外板の形状を完成形状に近づけることが出来たと言える。

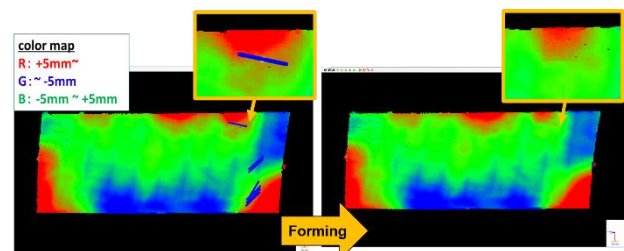


Fig. 10 Generated heating lines and result

### 3.3 指示投影エンジンを用いた加熱指示実験

#### 3.3.1 目的

指示投影エンジンと必要な設備を合わせたプロトタイプピングを行い、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行うことで、情報投影による加熱指示の有用性を検証する。

#### 3.3.2 プロトタイプピング

Fig. 11 (左) に示すように、アルミ製パイプの骨組みとプロジェクタ、レーザスキャナと計算機を組み合わせたプロトタイプピングを行った。キャリブレーションを行ったのちに、デモンストレーションとして模型に映像を投影した様子を Fig. 11 (右上) に示す。

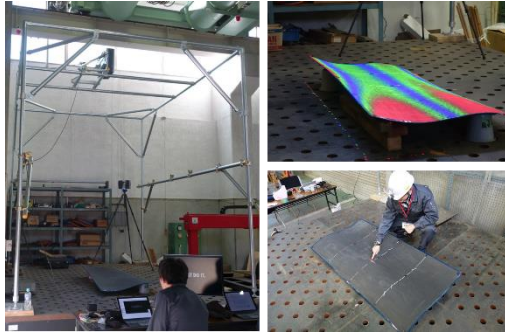


Fig. 11 Prototyped system and demonstration

#### 3.3.3 実験方法

実験では、CFRP製の外板の模型(縦 1.60m 横 0.82m)を用いる。被験者は模型の前に立ち、指示された箇所にも1本ずつテープでマーキングを行うタスクを与えられる。実験は2セットに分けられ、第1セットでは口頭で「位置座標」と「マーキングの角度」を伝達し、被験者は巻尺と分度器を用いて位置を特定しマーキングを行う。第2セットでは Fig. 11 (右下) のようにプロジェクタから模型に向けて赤色の指示線が投影され、被験者は投影された指示線の上にマーキングを行う。指示が出されてからマーキングを完了するまでの時間を1本ずつ計測し、各セットは10本のマーキングを終えた時点で終了とする。本実験では、60代の男性1名を被験者とした。

#### 3.3.4 結果

各セットで1回ずつ計測したマーキングに要する時間を集計し箱ひげ図にまとめたものを Fig. 12 に示す。この結果から、空間型ARを用いたマーキング作業の方が、要する時間が短くなる傾向にあることが推察された。

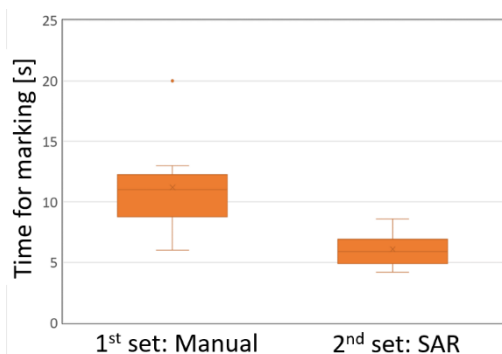


Fig. 12 Comparison between 1st set and 2nd set

## 4 考察

本研究で開発した加熱指示生成エンジン(以下、本エン

ジン)について考察する。本エンジンは加熱指示の生成において、外板の曲率の誤差が大きい箇所を修正するアプローチを採用した。その際に、ある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。そのためサイズが大きく比較的緩やかな曲がりを持つ外板を対象とする場合、評価する点における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。今後は、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。

また本エンジンは最も基本的な線状加熱に焦点を当て、加熱箇所の特定に取り組んだ。工程の属人性を低減するためには、上記に加えて炎の温度や入熱時間の指示など、より高度な加熱指示を提示する手法の検討が考えられる。

## 5 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、それぞれを評価した。

加熱指示生成エンジンは、レーザスキャナで計測した外板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である。エンジンの実装を行い、その評価として造船所で取得した外板の計測データの法曲率を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、エンジンを用いた法曲率算出は実現場で有効に機能することを示した。また加工途中の外板に対してエンジンを適用し、出力した加熱指示に従い加工を行った。その結果、加工により外板の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熱指示が実現可能であることを示した。

指示投影エンジンは、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である。指示投影エンジンと必要な設備を合わせたプロトタイプピングを行い、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することで、情報投影による加熱指示の有用性が示唆された。

今後の展望としては、造船所での実用に向けてシステムの高度化と品質・信頼性・安定性の向上に取り組む。

## 文献

- 1) J.Park, D.Kim, S.Mun, K.Kwon, J.Lee, and K.Hee Ko: Automated thermal forming of curved plates in shipbuilding: system development and validation, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 29, pp. 1128-1145, 2016.
- 2) 中垣憲人, 菅原晃佳, 榎方和夫, 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.
- 3) B.Oliver, R.Rascar: Spatial augmented reality, merging real and virtual worlds, CRC press, 2005.