



ClassNK
R&D PROJECT

レーザスキャナによる曲がり外板加工工程の高度化に関する研究

-工作精度評価とバーチャル木型を用いた加工方案の生成-

東京大学大学院新領域創成科学研究科 人間環境学専攻
稗方 和夫

目次

1. はじめに
2. レーザスキャナと点群データ
 - 2.1 レーザスキャナ
 - 2.2 点群データ
 - 2.3 設計データ
3. 工作精度評価システム
 - 3.1 システムの概要
 - 3.2 前処理
 - 3.2.1 点群データからの外板抽出
 - 3.2.2 データ欠損への対応
 - 3.2.3 位置合わせ
 - 3.3 工作精度の評価と可視化
 - 3.4 システム導入の効果
4. バーチャル木型システム
 - 4.1 システムの概要
 - 4.2 バーチャル木型の生成
 - 4.3 木型のコントロールと確認
 - 4.4 加工方案の自動生成
 - 4.5 加工方案の自動生成の評価
5. まとめ

1. はじめに

属人的で標準化が難しいとされる曲がり外板加工工程における品質管理を定量的に行う為に、非接触型三次元計測機であるレーザスキャナを用いた研究開発プロジェクトを進めてきた。

Phase 1. 精度評価について (2010年10月～2012年3月)
工作精度を定量的に算出・可視化するシステム

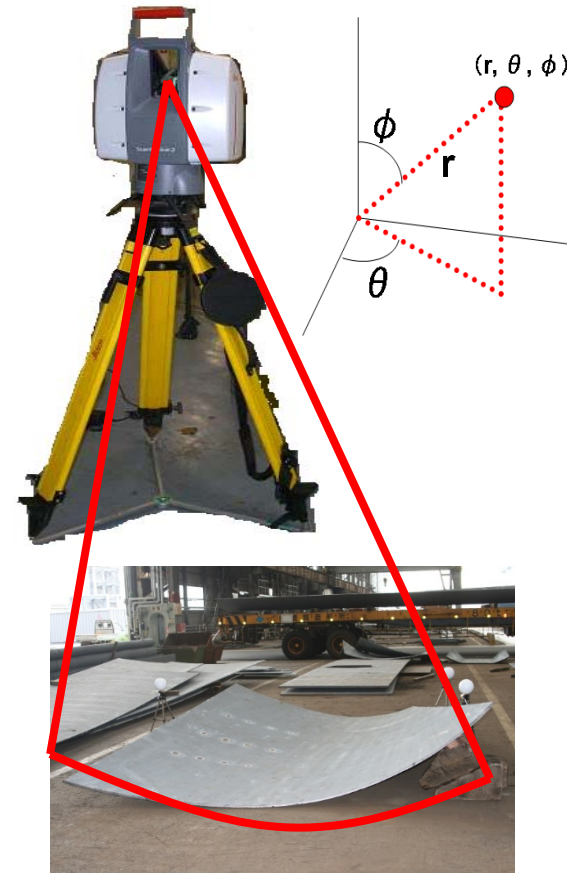
Phase 2. 木型のバーチャル化 (2012年9月～2014年8月)
バーチャル木型による加工方案の生成を行うシステム

2.1 レーザスキャナ

- 一度に大量の点が計測可能
 - 外板表面全体を計測可能
- 測定対象物とセンサ間の距離をレーザが往復する時間を計測することで(r)を求め、それに照射方向の情報(θ, ϕ)を加えて位置座標を決定する
 - 位相差方式
 - Time of flight

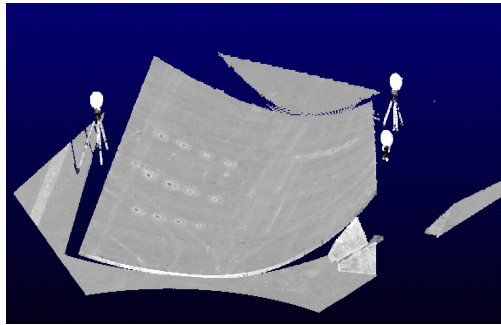
曲がり外板Aの計測

- 計測レーザスキャナ FARO Photon80
- 測距精度: $\sigma: \pm 2\text{mm}@25\text{m}$
- 測定速度: 120,000 (points/sec)



2.2 点群データ

基本的な点群のデータ構造

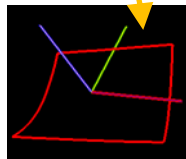
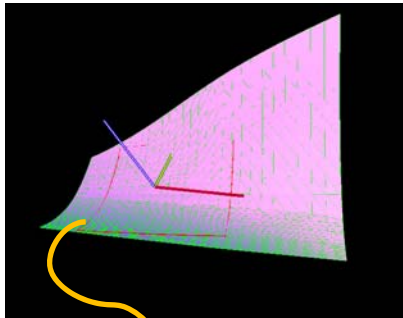


X	Y	Z	A	R	G	B
14083.3571765117	-2322.84877695493	849.63759043349	50	15	239	0
14084.1185559813	-2325.08497331368	852.03773862377	50	0	253	1
14085.3354202633	-2321.26865931808	847.27669727621	50	9	245	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

- 位置座標(XYZ) 反射強度(A) 輝度(RGB)
- Text形式

2.3 設計データ

SATファイル形式のデータ構造



トリムカーブ

```
spline-surface $-1 -1 -1 $-1 reversed { exactsur full nurbs 3 3 both open open none none 10 10
0 3 1 1 2 1 3 1 4 1
5 1 6 1 7 1 8 1 9 3
0 3 1 1 2 1 3 1 4 1
5 1 6 1 7 1 8 1 9 3
8.5580000220301304 -0.92409787947322908 0.75000036917360902 1
8.5580000220301304 -0.9808766428846194 0.88479110307986031 1
8.5580000220301304 -1.0691391369363783 1.1643095080388095 1
8.5580000220301304 -1.1520157021548232 1.5953959814328116 1
⋮
⋮
⋮
}
```

ノットベクトル

制御点

- ・ ACISモデリングカーネルの標準ソースファイル形式(Save As Text)
- ・ NURBSによる記述
- ・ NURBS曲面を外板一枚の外枠に沿って切り取るトリムカーブが記述されている。
- **NURBS曲面とトリムの情報**で一意に定義される

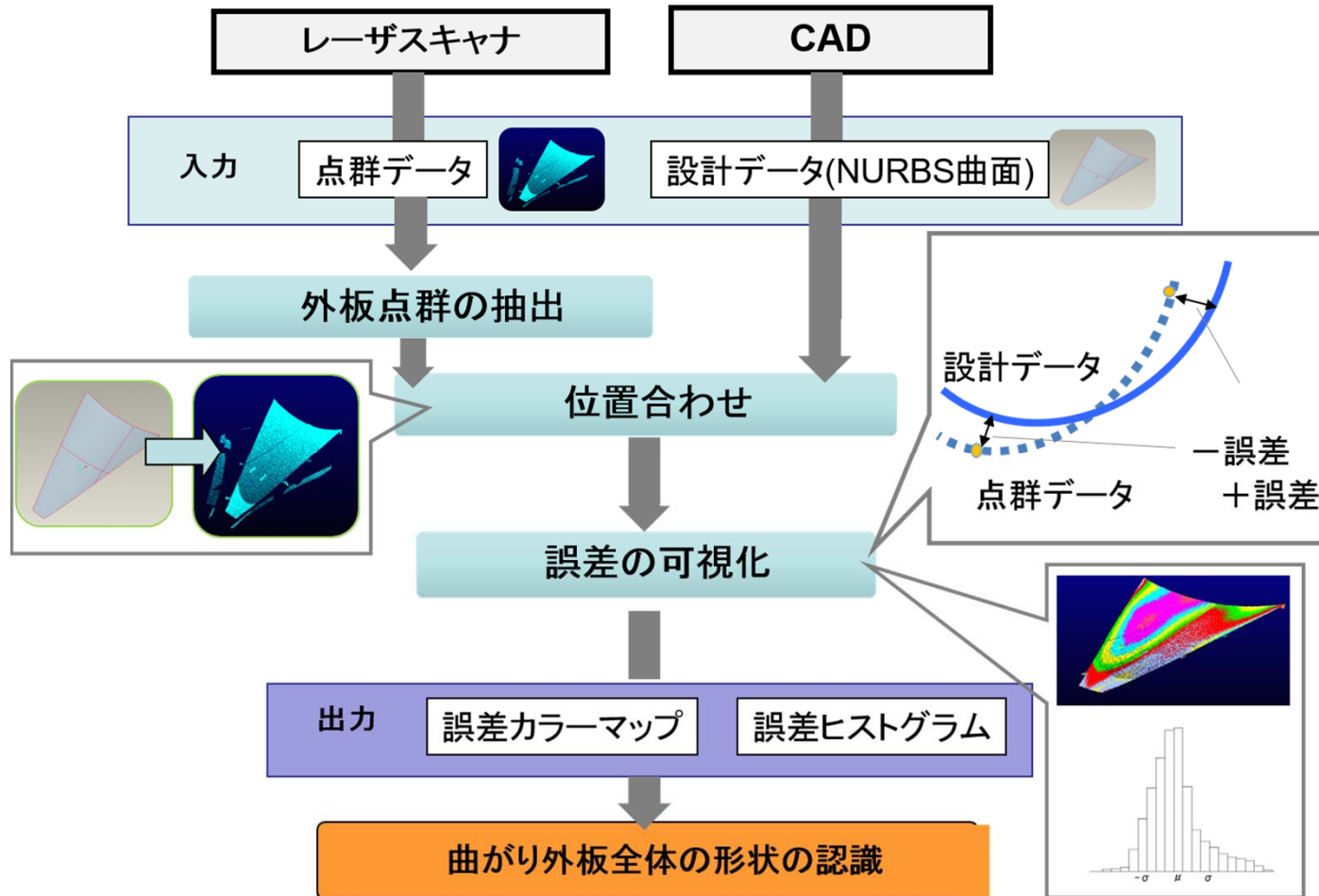
曲がり外板工作の高度化に関する研究

1. 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

2. 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

- i. 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第17号, pp169-176, 2013
- ii. 稗方和夫, 大和裕幸, ソンショウギョク, 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, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第16号, pp.563-566, 2013

3.1 システムの概要



3.1 システムの概要



3.2.1 点群データからの外板抽出

三次元計測して得られるデータ

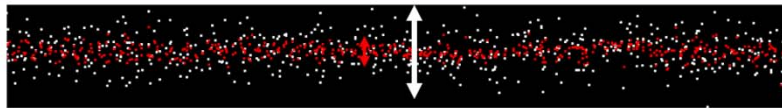
- 真の値を基準としたバラつき
- 計測ノイズ、データの欠損



バラつき、ノイズを考慮したうえで
外板を構成する点群のみを抽出する必要性

• 平滑化

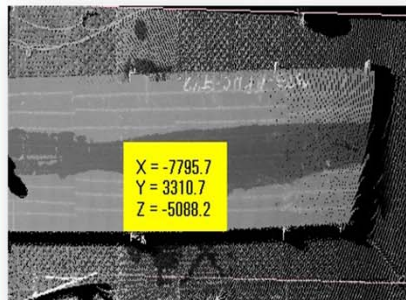
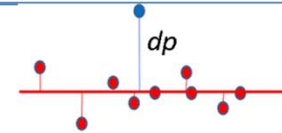
- Basic Moving Least Square *



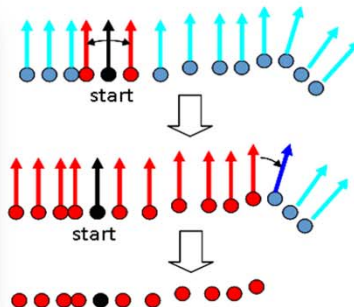
:Smoothed point

• 外れ値の除去**

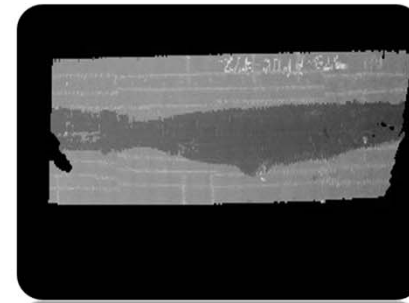
- 局所最小二乗平面からの距離を利用



1. 開始点指定



2. 法線の比較



3. 可能な限り領域を拡大

3.2.2 データ欠損への対応～概要～

実際の現場では、木型や作業員などに起因する点群データの欠損が生じる。



データの欠損への対応が必要
➤ 左下図に示す同一曲面判定による点群データの乗り越えにより実現

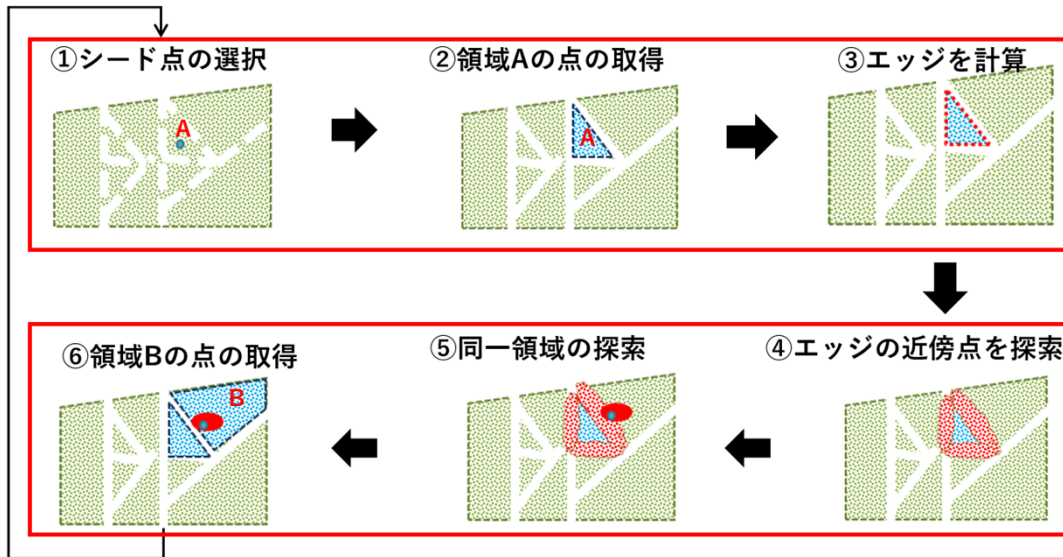


図: データ欠損時の領域の拡張

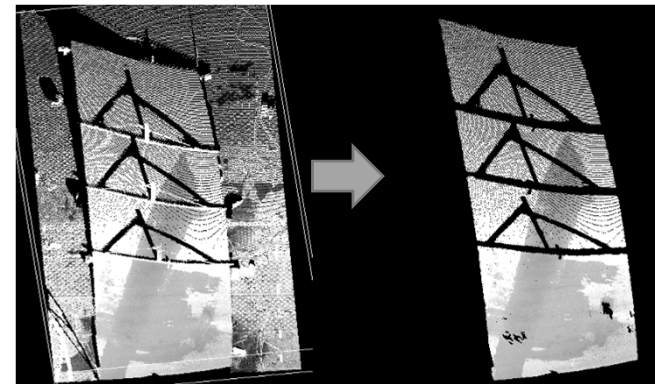


図: 欠損のある外板点群の抽出の様子

3.2.2 データ欠損への対応～アルゴリズム～

- **部分曲面フィッティング**では、得られたこの曲面の方程式のような4次方程式により四次曲面フィッティングを適用してエッジの点の近傍点が元の小さい曲面と同じ曲面にあるかをチェックします。

$$z = \sum_{j=4}^0 \left(\sum_{i=j}^0 c_{i,j-i} x^i y^{j-i} \right)$$

$$Q = \sum_{k=1}^N \left[Z_k - \sum_{j=4}^0 \left(\sum_{i=j}^0 c_{i,j-i} x_k^i y_k^{j-i} \right) \right]^2$$

- **断面B-Spline曲線分析**

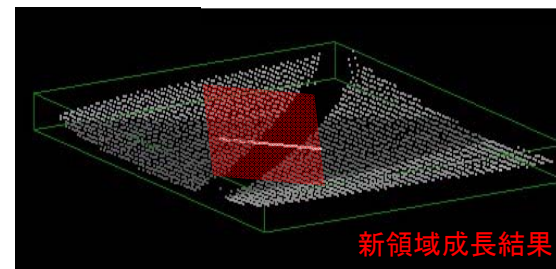
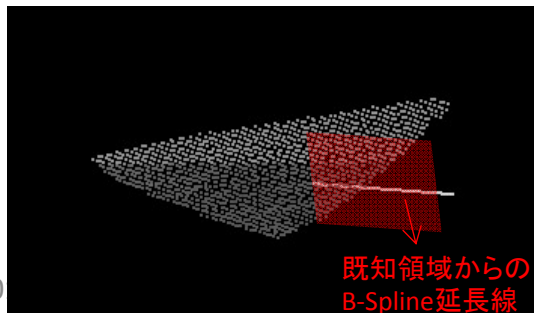
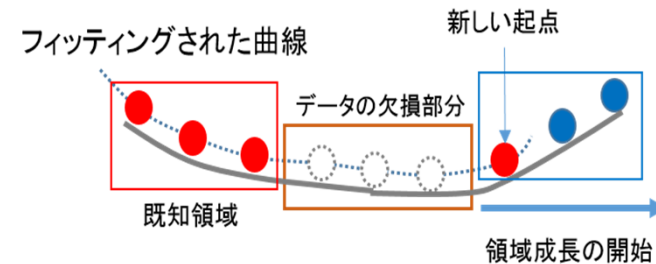
- 既知小領域のエッジの点ごとに、既知領域のこの点を通るB-Spline曲線を計算し、既知領域外にこの線を延長することにより、新領域の点を発見する。

B-spline曲線:

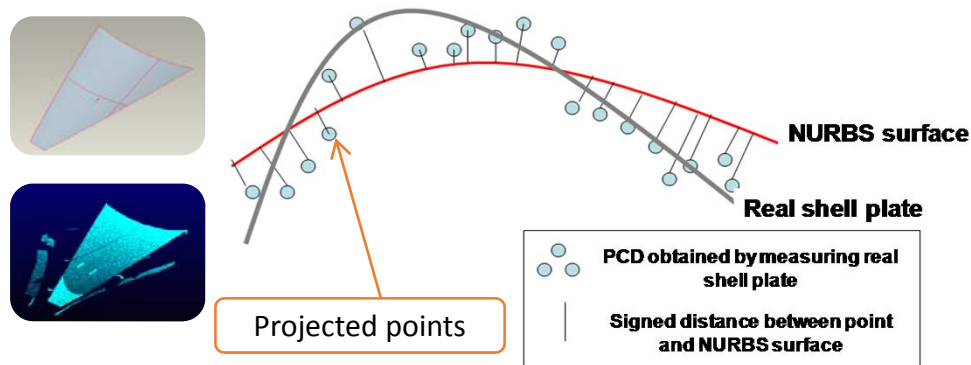
$$P_{j,k}(t) = \sum_{i=1}^k N_i^{[k]}(t) P_{j+i-2} \quad (0 \leq t \leq 1; j = 2, 3, \dots, n - k + 2)$$

$$N_i^{[k]}(t) = \sum_{m=1}^r a_{im}^{-[k]} t^{k-m} \quad (0 \leq t \leq 1)$$

k: 点数



3.2.3 位置合わせ

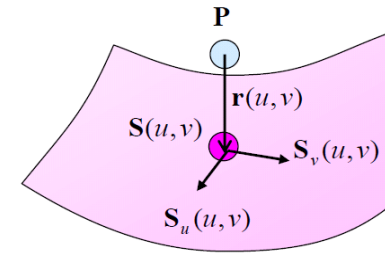


• ICP アルゴリズム

- 設計データに点を投影
- 目標点群を移動させて目標点群とデザイン点群の距離を短縮
- 投影と移動操作を繰り返し、距離を短縮

階層化ICP アルゴリズム

位置合わせの精度を減少させずに、計算時間を短くする

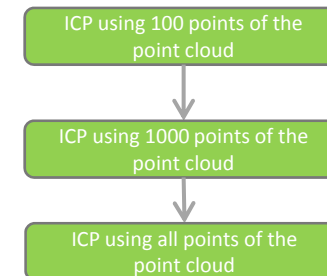


$$r(u, v) = S(u, v) - P \quad (1)$$

$$g(u, v) = r(u, v) \cdot S_v(u, v) = 0 \quad (2)$$

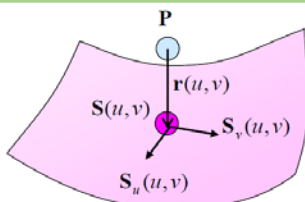
$$f(u, v) = r(u, v) \cdot S_u(u, v) = 0 \quad (3)$$

- P: point,
- S: surface function,
- r: projection vector



3.3 工作精度の評価と可視化

誤差の計算方法
点とNURBS曲面間の符号付



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

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

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

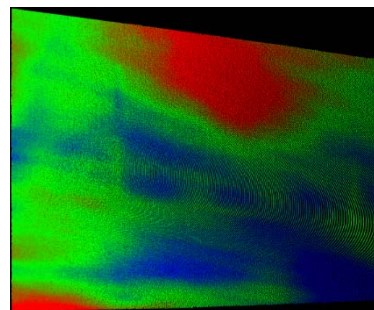
$$\delta_i = \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{i+1} - u_i \\ v_{i+1} - v_i \end{bmatrix}$$

$$J_i = \begin{bmatrix} f_u & f_v \\ g_u & g_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\mathbf{S}_u|^2 + \mathbf{r} \cdot \mathbf{S}_{uu} & \mathbf{S}_u \cdot \mathbf{S}_v + \mathbf{r} \cdot \mathbf{S}_{uv} \\ \mathbf{S}_u \cdot \mathbf{S}_v + \mathbf{r} \cdot \mathbf{S}_{uv} & |\mathbf{S}_v|^2 + \mathbf{r} \cdot \mathbf{S}_{vv} \end{bmatrix}$$

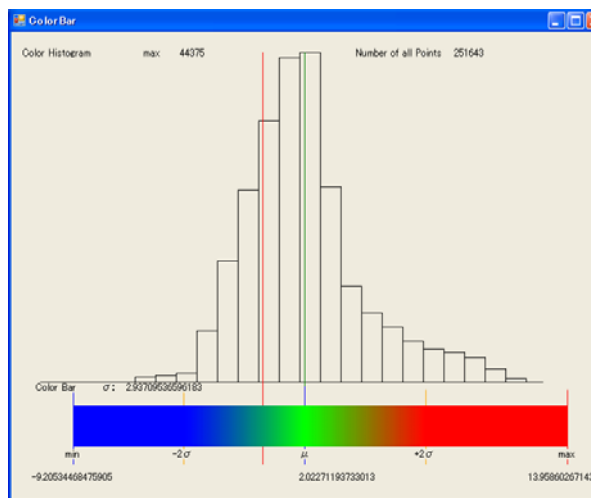
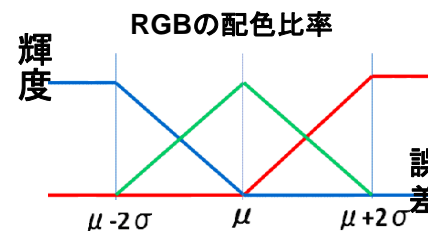
$$\kappa_i = - \begin{bmatrix} f(u_i, v_i) \\ g(u_i, v_i) \end{bmatrix}$$

$$J_i \delta_i = \kappa_i \quad \text{-(1)}$$

- ニュートン法によりrを求める。
- 式(1)を解き、逐次最適解に近づける。
[The NURBS book]

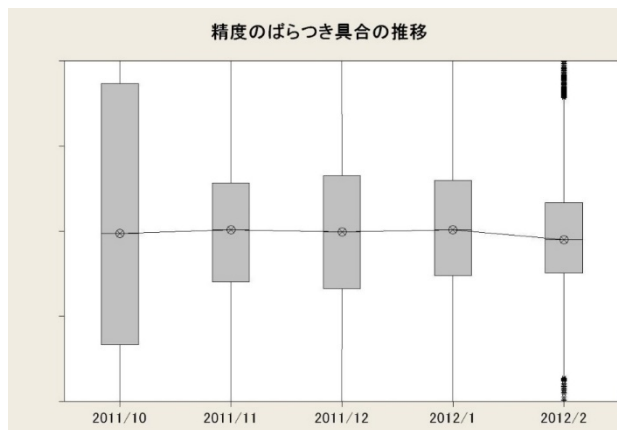
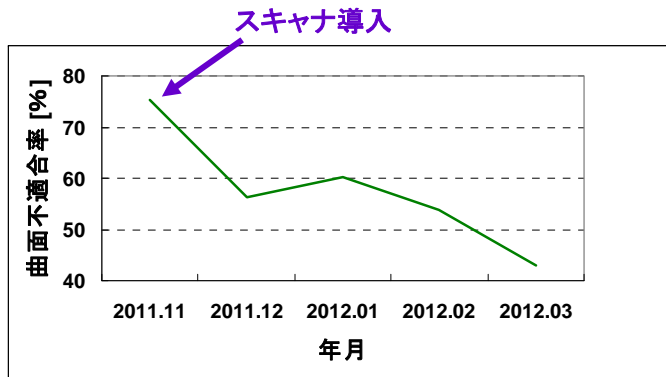


誤差カラーマップ



誤差ヒストグラム表示

3.4 システム導入の効果

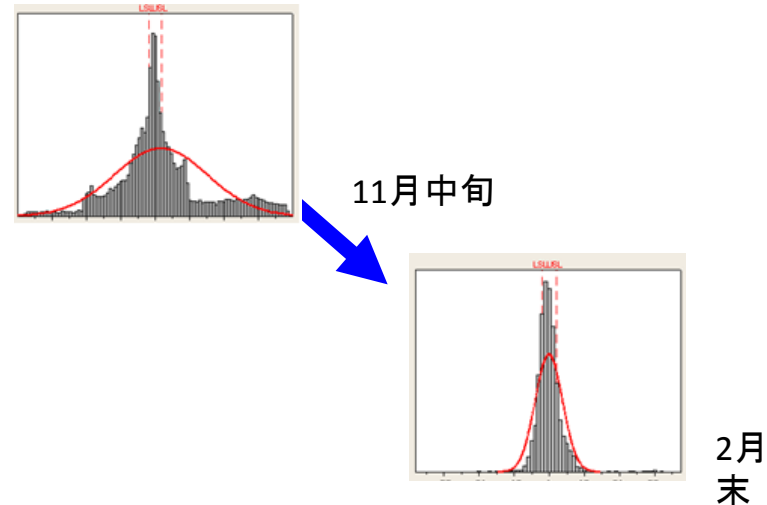


実験内容:

工作後の曲がり外板を計測して評価した結果を、熟練作業員にフィードバックすることで、必要に応じて再度焼き直しを行う工程を四半期間行う。

結果:

導入後、許容値を下回る割合が増えた。
また、精度のばらつき範囲も小さくなった。



大炉仕上がり形状が大幅に改善した

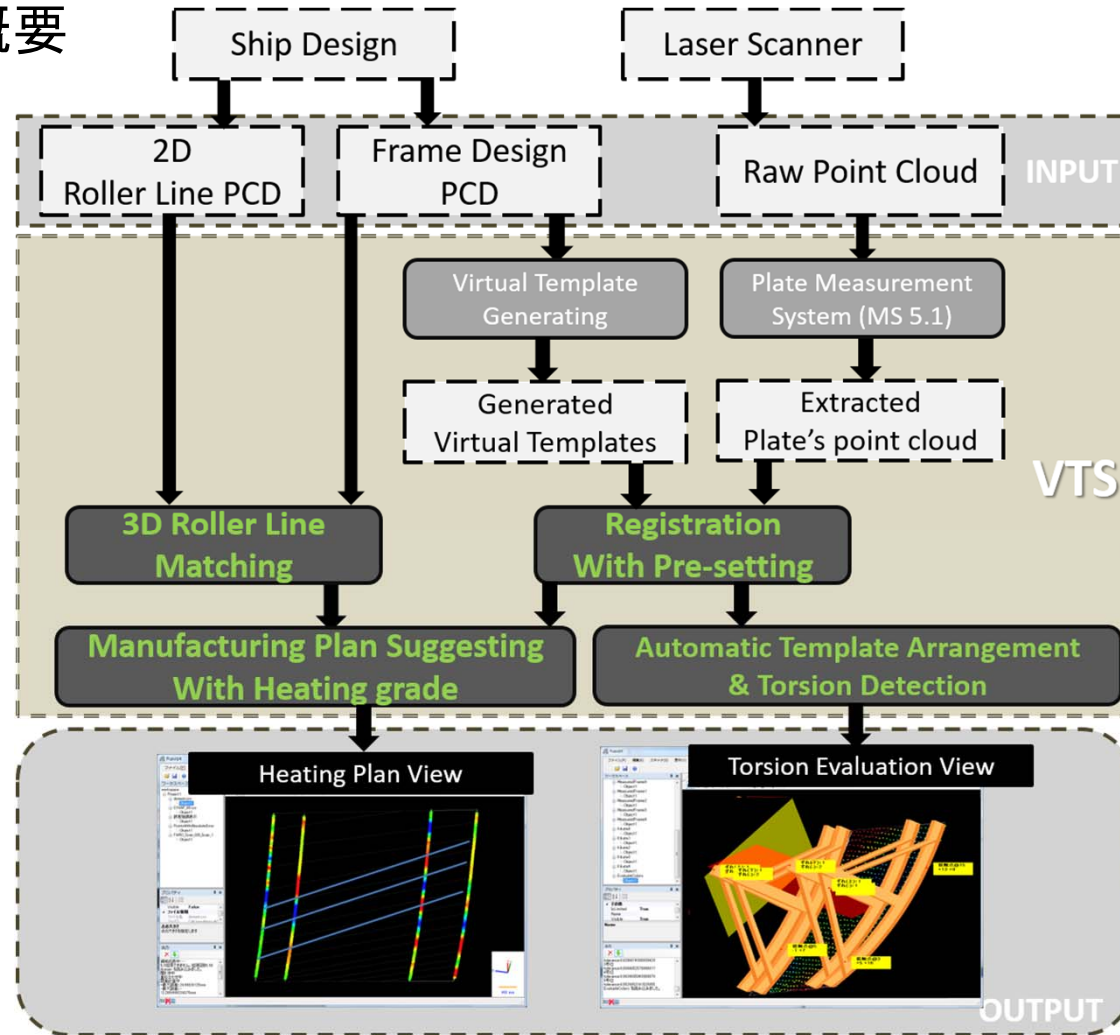
曲がり外板工作の高度化に関する研究

1. 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)

2. 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

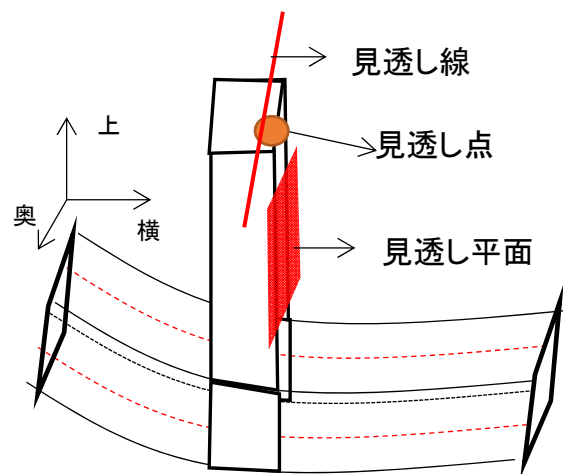
- i. 中垣憲人, 菅原晃佳, 稗方和夫, 大和裕幸, ソンショウギョク:レーザスキャナによる曲がり外板の工作精度評価システムの研究開発(第2報), 日本船舶海洋工学会論文集第17号, pp.169-176, 2013
- ii. 稗方和夫, 大和裕幸, ソンショウギョク, 中垣憲人, 菅原晃佳:3D計測データとバーチャル木型を用いた曲がり外板加工方案生成システムの開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第16号, pp.563-566, 2013

4.1 システムの概要



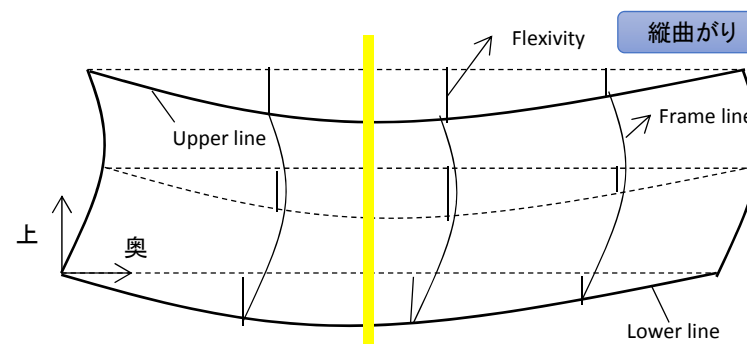
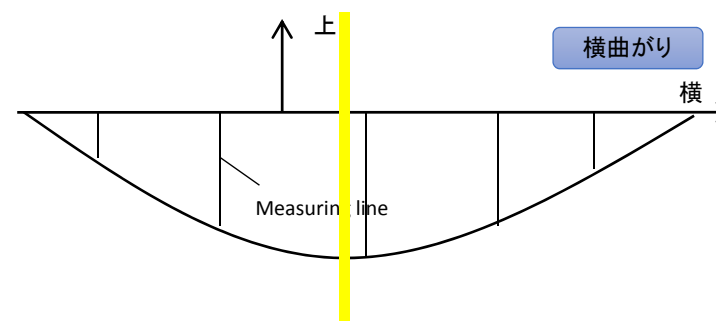
4.2 バーチャル木型の生成

木型を用いた従来の確認手法について

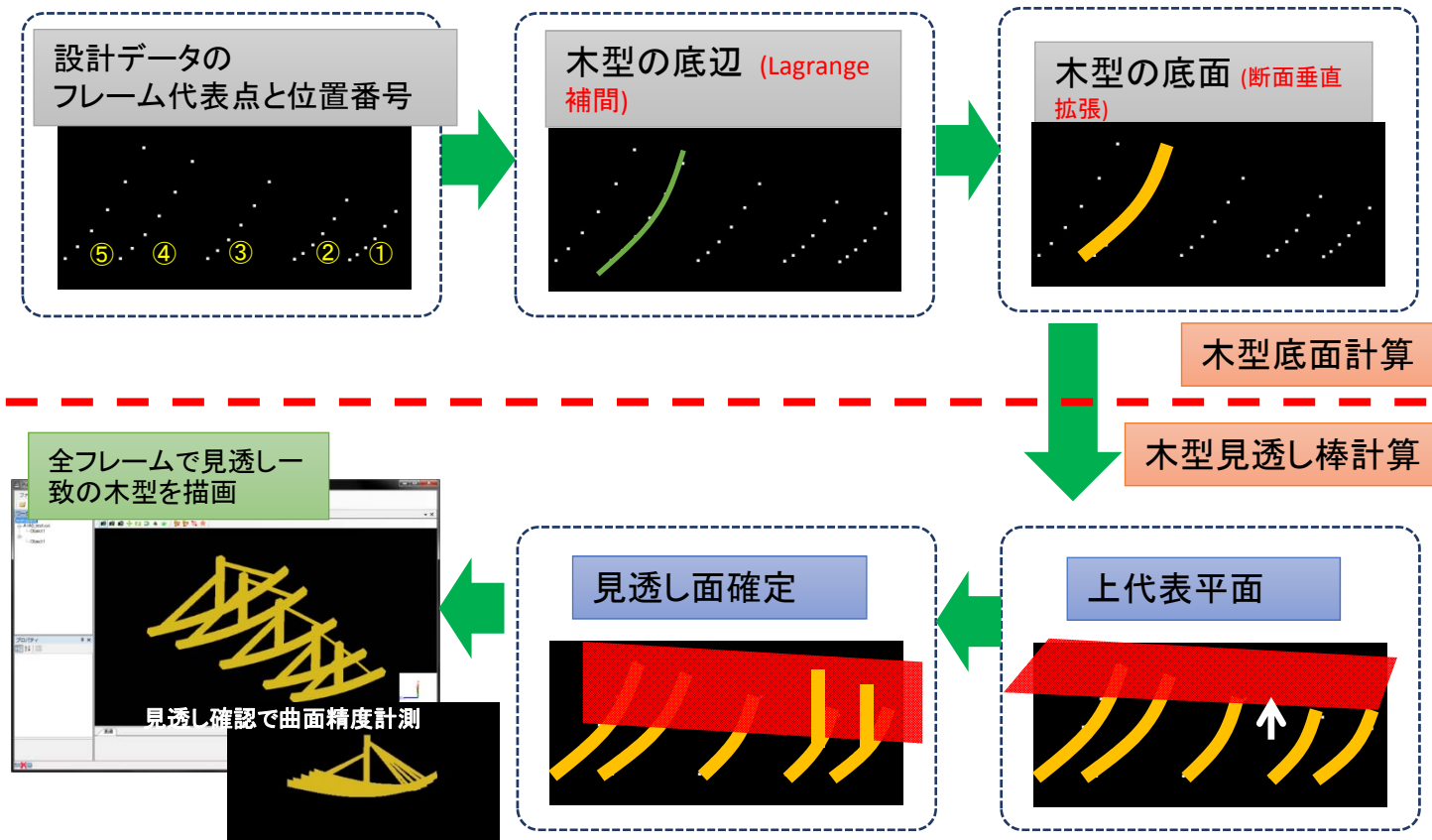


木型を用いた加工の完了を確認する方法
(バーチャル木型の設定条件):

- I. 見透し棒が同一方向を向く
- II. 各フレームに置かれた見透し棒に一枚の平面が通る
- III. さらに、各フレームに設定された見透し棒上の見透し点が一直線に通る



4.2 バーチャル木型の生成



4.3 木型のコントロールと確認

ICPアルゴリズムを用いて、生成したバーチャル木型を計測データの適切な位置（外板フレーム上）に設置することが出来る。



木型の位置を自由に調整することで、現行のプロセスをバーチャル空間上で行うことが可能となる。

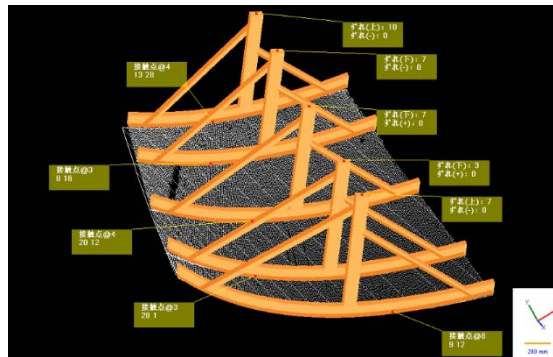


図: フレーム上に設置した木型

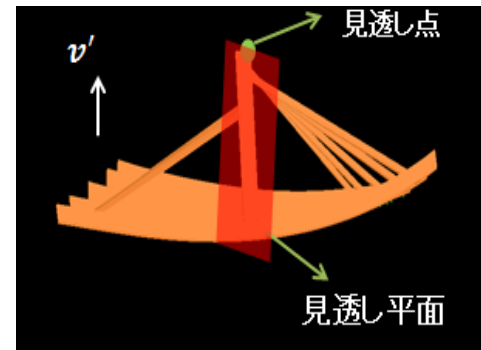
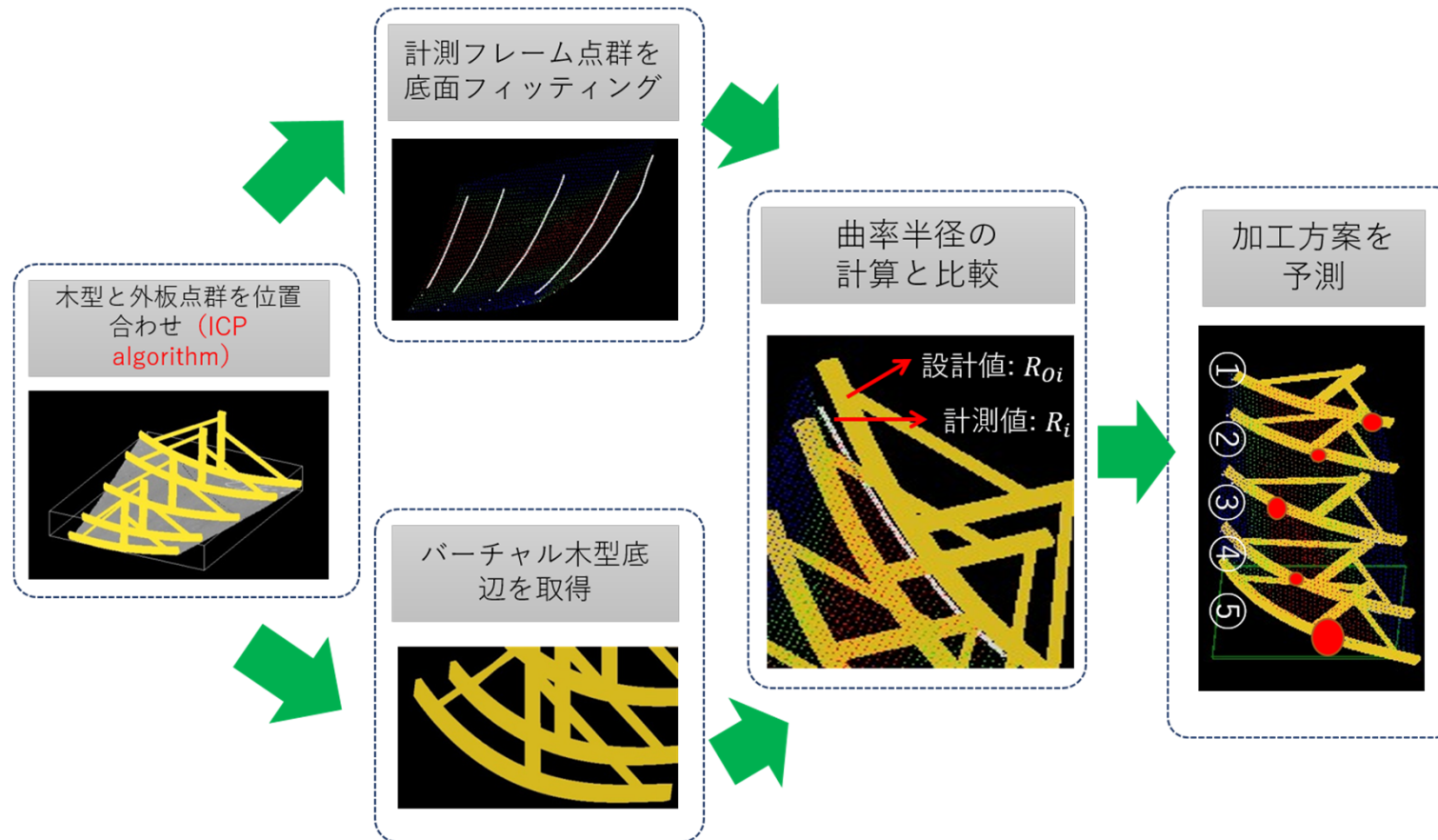


図: 木型による見通し確認

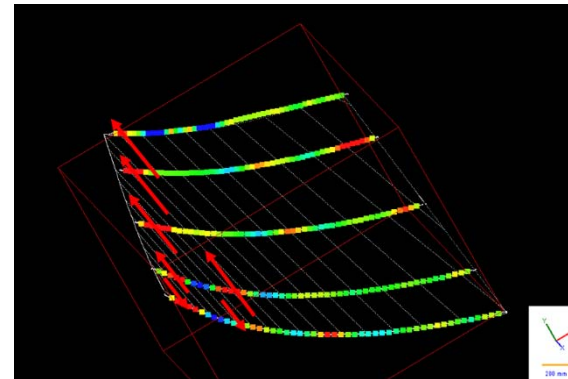
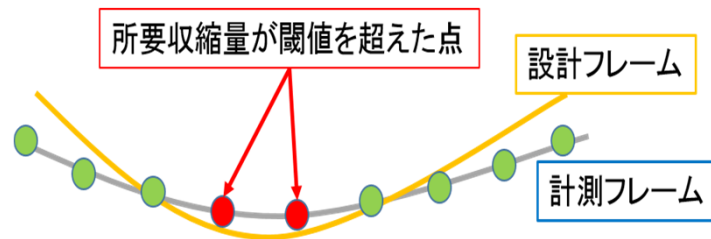
4.4 加工方案の自動生成 フロー



4.4 加工方案の自動生成 加熱

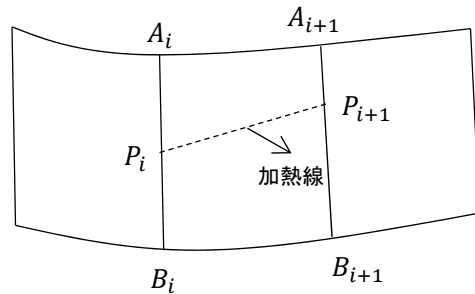
設計フレームと計測フレームの位置合わせを行い、それぞれの曲率半径から算出される所要収縮量が閾値を超える箇所を**加熱箇所**とする。

また、各フレーム毎で算出された加熱箇所を線分で結び、**加熱線**とする。



図：加熱箇所の判定(左)と加熱線の配置(右)の様子

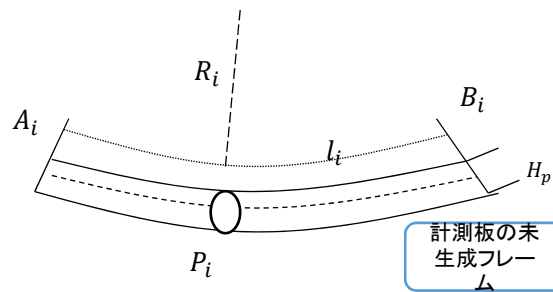
4.4 加工方案の自動生成 計算アルゴリズム



P_i 点の成形完了の条件: $\mu = |R_{oi} - R_i| \div R_{oi} > \epsilon_{thresh}$

板中性軸のアーク長: $l'_i = \frac{l_i}{R_i} \left(R_i + \frac{1}{2} H_p \right)$

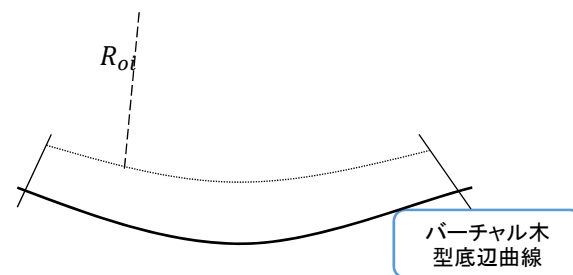
* 加熱で中性軸アーク長は不変とする。



逆に求めた設計板(木型底面)表面のアーク長:

$$l_{oi} = l_i \times \frac{R_{oi}}{R_i} \times \frac{R_i + H_p/2}{R_{oi} + H_p/2} \quad \begin{array}{l} H_p : \text{板の厚さ} \\ R_i : \text{曲率半径} \end{array}$$

二次加熱で所要表面収縮: $\Delta l_i = l_i - l_{oi}$



加熱変形公式: $\Delta l_i = f(H_p, B, v, s)$

B: 板の幅 v: 加熱速度 s: 加熱器具パラメータ

4.5 加工方案自動生成の評価

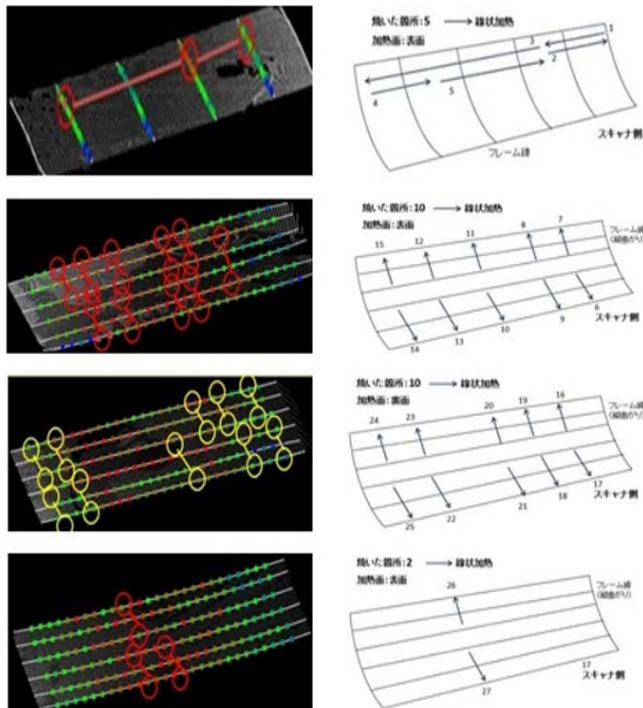


図: システムの出力結果(左)と実際の加工箇所(右)

加熱前の外板の三次元計測を行い、システムを用いて加工方案の生成を行う。生成された加工方案と、実際に作業者によって採用された加工箇所との比較を行った。



ほぼ一致していることが確認できた。
一致していない箇所に関しては、
バーチャル木型を操作することで
妥当な加工が行われたことを確認した。

システムの有用性が示された

まとめ

曲がり外板工作が抱える精度評価の課題を解決するために、レーザスキャナを用いて以下の2つのシステムの開発を行った。

- i. 曲がり外板の工作精度評価システム
- ii. バーチャル木型を用いた加工方案生成システム

また、上記の開発したシステムを実際の造船所の現場に導入し、ケーススタディを行うことでシステムの有用性を示した。



本研究開発は、東京大学、住友重機械マリンエンジニアリング、日本海事協会との共同研究体制により研究を実施すると共に、日本海事協会の「業界要望による共同研究」のスキームにより研究支援を受けて実施しました。
導入を希望される場合にはウニクス社にご連絡ください。