

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

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

住友重機械マリンエンジニアリング(株)
製造本部 工作部 技術・教育推進G 技師
中垣 憲人



(H22-H23年度)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スキーム」による支援を受けて実施

目次

1. 目的
2. 情報システムの機能紹介
 2. 1. 概要
 2. 2. 前処理の効率化・高速化
 2. 3. レーザースキャナーの制御機能
 2. 4. システム詳細
3. 工場への導入
 3. 1. 概要
 3. 2. 設置方法
 3. 3. 計測から解析の自動化
4. 工場への導入のケーススタディ
 4. 1. システム導入による工場での効果
 4. 2. 計測結果の傾向、加工の進め方の特徴
5. 考察
6. 結論と今後の課題

1. 目的

- 目的

- 曲がり外板の工作精度評価システムを開発する。
- レーザスキャナを用いて計測した曲がり外板の計測データとCADデータの比較結果を可視化することで、熟練者でも難しい曲がり外板の加工結果の品質の定量評価を行う。
- 造船所で実運用可能なシステムを開発する。

2. 情報システムの機能紹介

2.1 概要

曲がり外板の工作精度評価システム

駆動システム・データ計測の流れ

ネットワークカメラで計測対象となる板を確認



モータ駆動により、レーザスキャナを移動



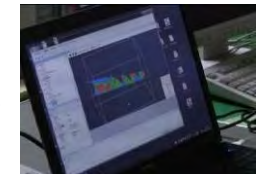
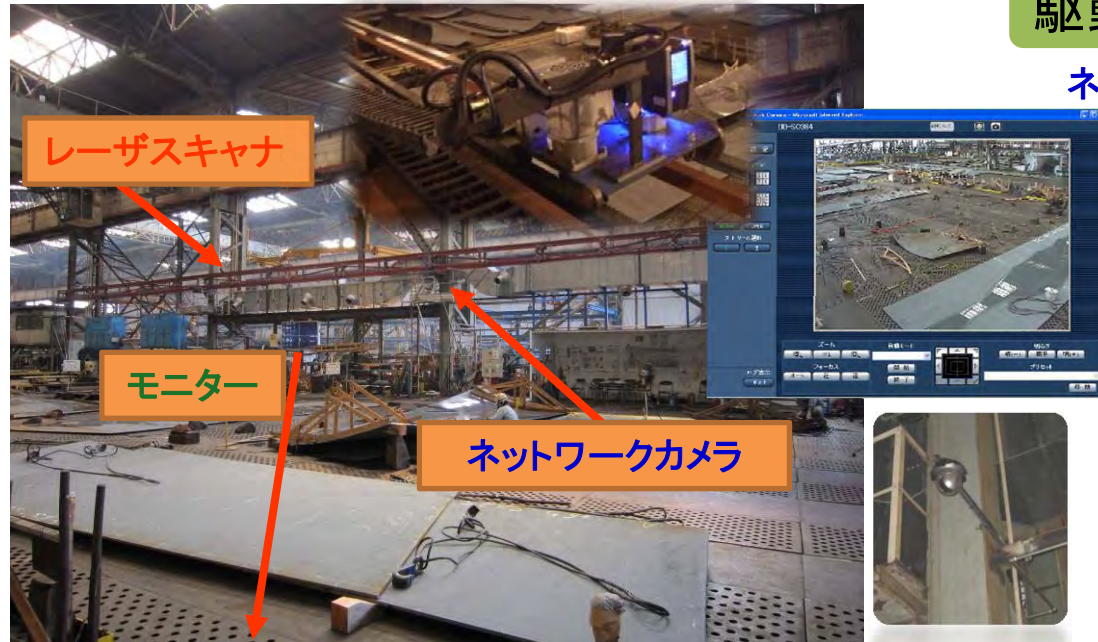
曲がり形状を計測



PCにて照合処理

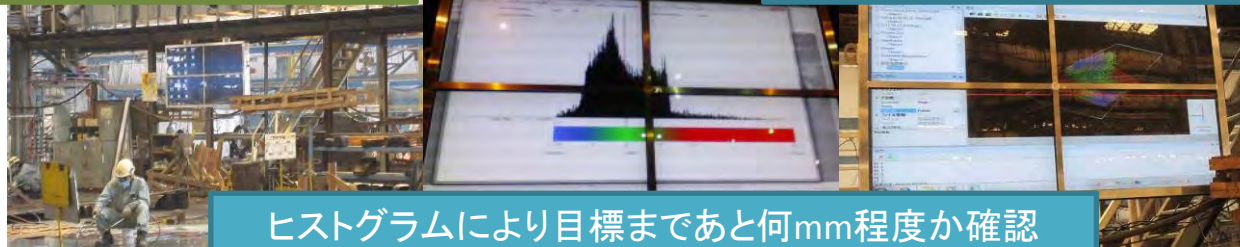


照合結果をモニターへ転送、
現場へフィードバック



モニターにPC画面を表示

点群により曲がりの過不足位置を確認



ヒストグラムにより目標まであと何mm程度か確認

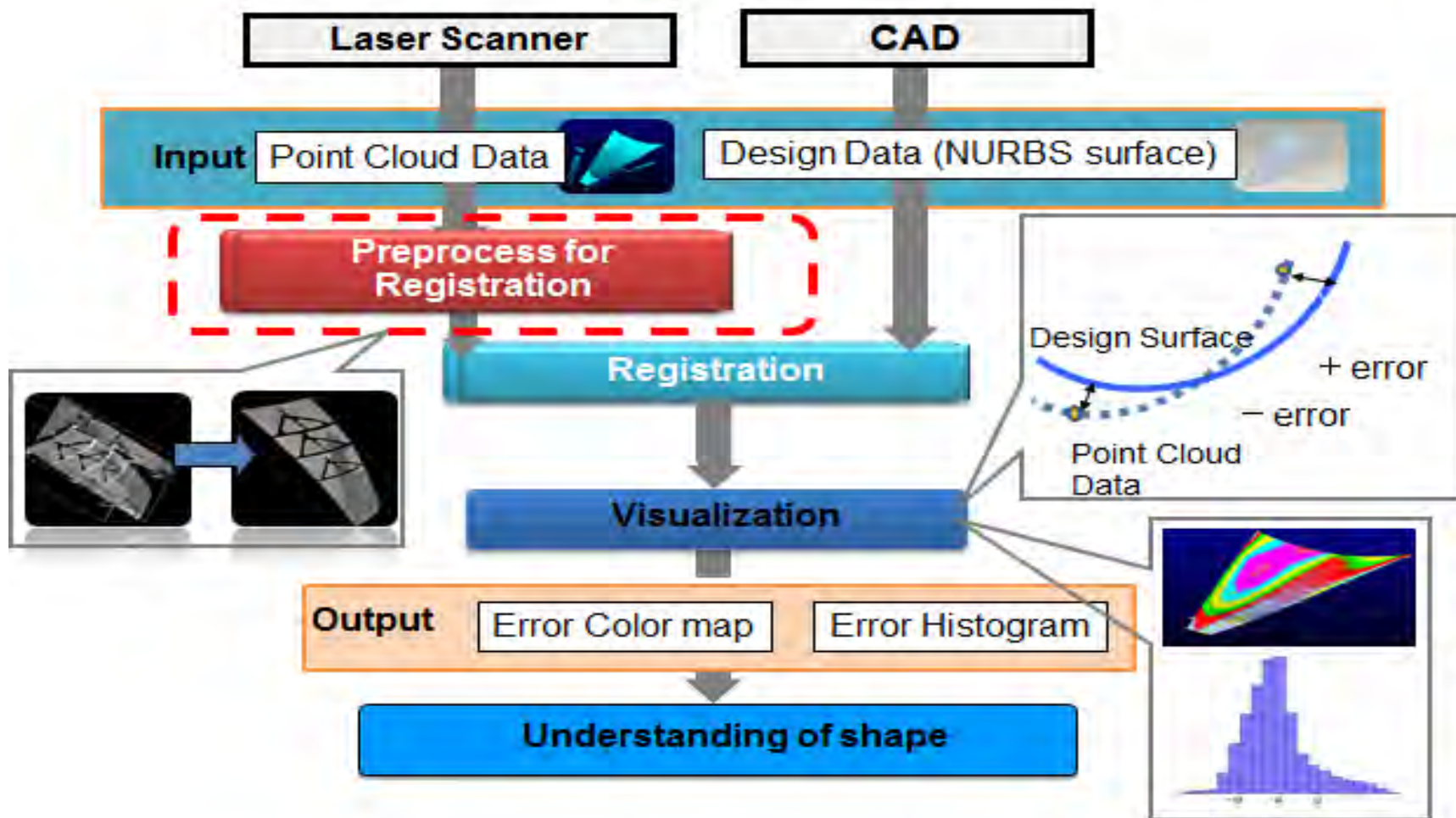
曲り評価カラーマップ

線状加熱作業前後データ比較により、曲り量と入熱の因果関係を定量的に計測する

⇒リアルタイム作業指示のためのバックデータ蓄積

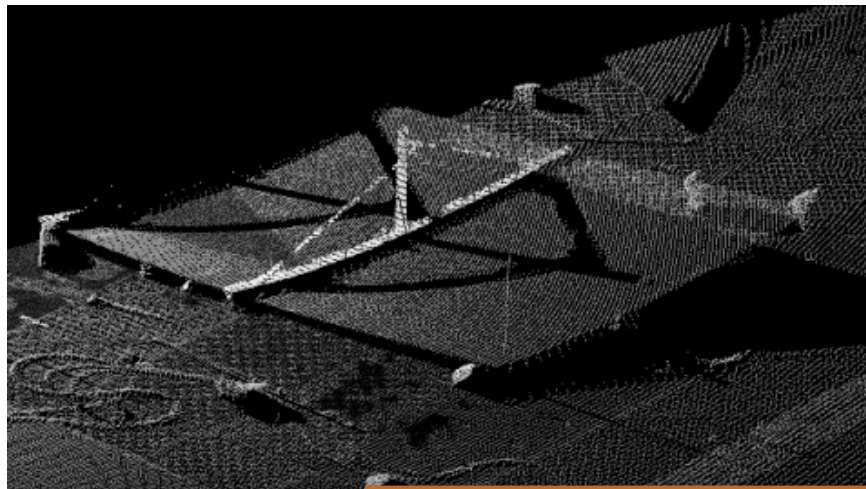
2.1 概要

計測データ精度評価のフロー



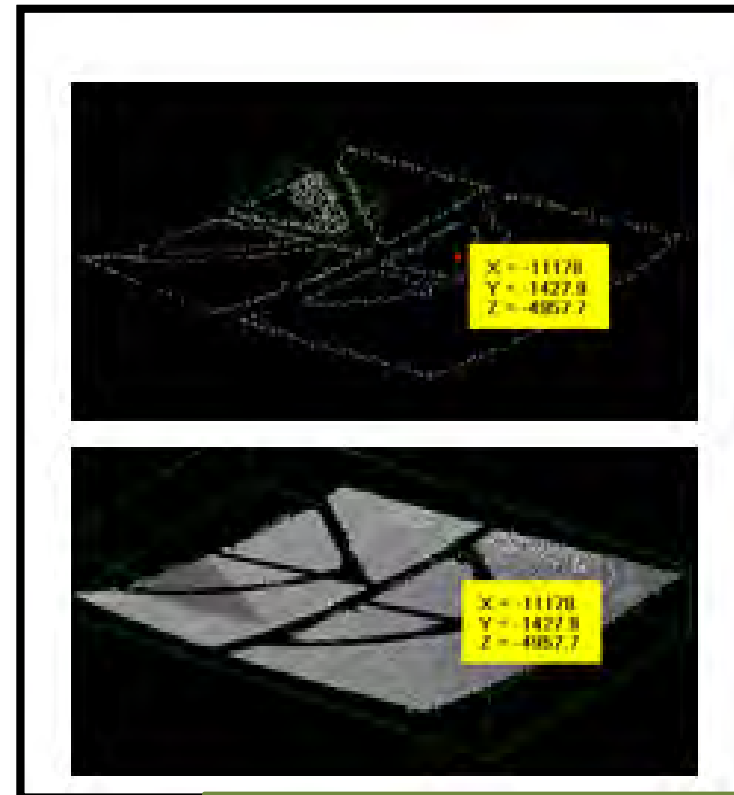
2.2 前処理の効率化・高速化 必要な部分の抽出作業を効率化

計測結果の曲がり外板の点群データから、木型等の障害物の除去、分割された外板の領域の自動認識を行い評価に必要な部分の抽出作業を効率化



外板の計測データ

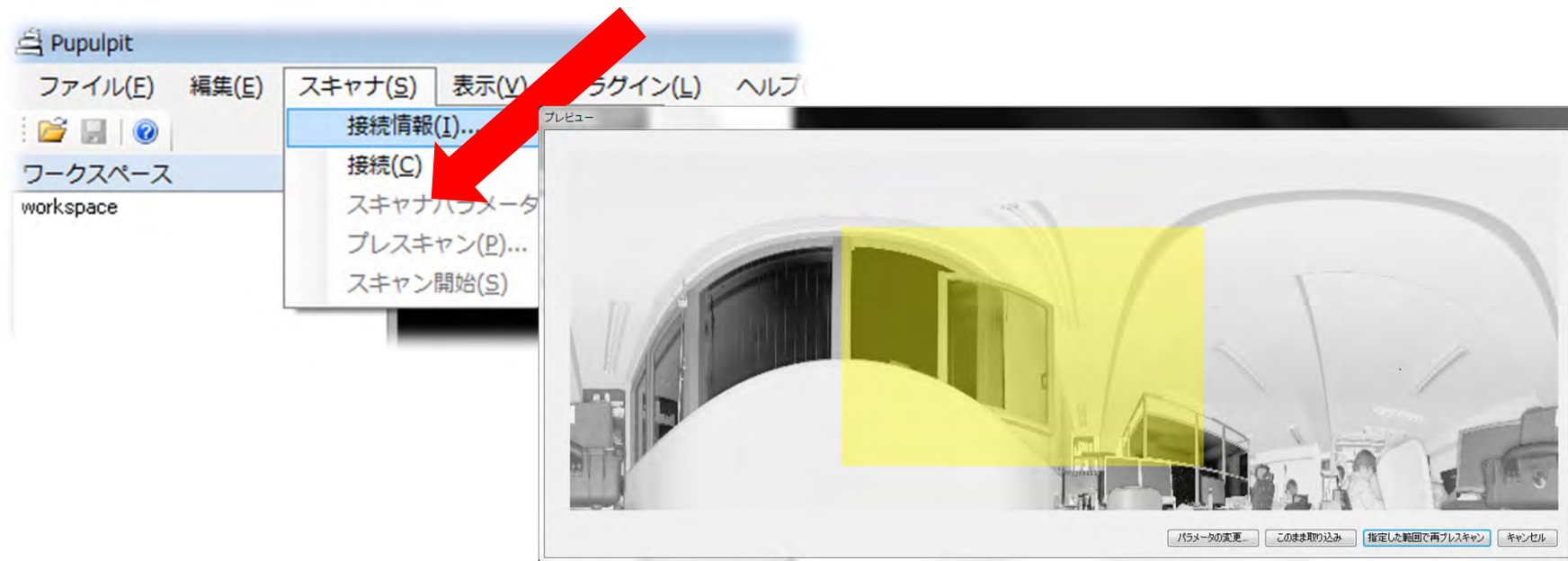
領域成長法による領域認識、端部の認識、端部への近似曲線の適用、近似曲線を利用した隣接領域の探索という手順により実現



端部と外板の認識結果

2.3 レーザスキャナの制御機能 プルピットに取り込んだスキャナ制御機能

本研究で利用したプルピットプラットフォーム*)で計測から解析までのすべての作業を可能とし、計測を効率化



パラメータの変更: 選択範囲を反映した形でスキャナパラメータダイアログを表示
このまま取り込み: プレビュー中の結果の点群を取り込み(選択範囲は関係なし)
指定した範囲で再プレスキャン: 選択範囲を反映して再度プレスキャンを実行

2.4 システム詳細

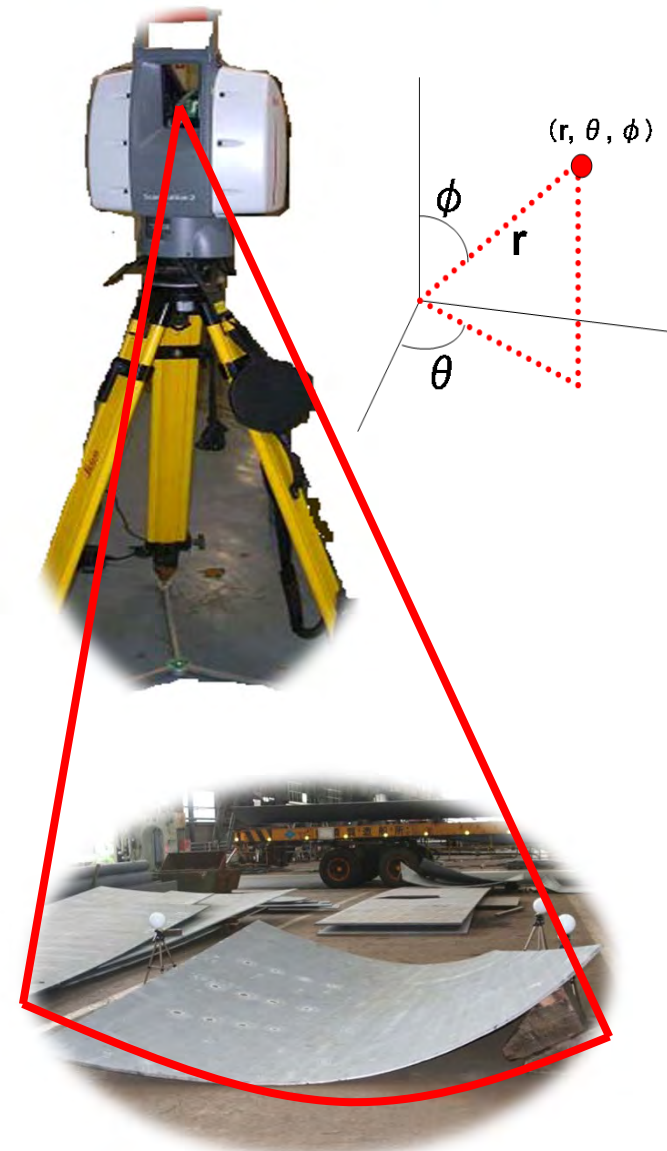
システムに使われたレーザスキャナ

一度に大量の点が計測可能

点群データとして表面全体を
評価可能

距離 r と角度(θ, ϕ)

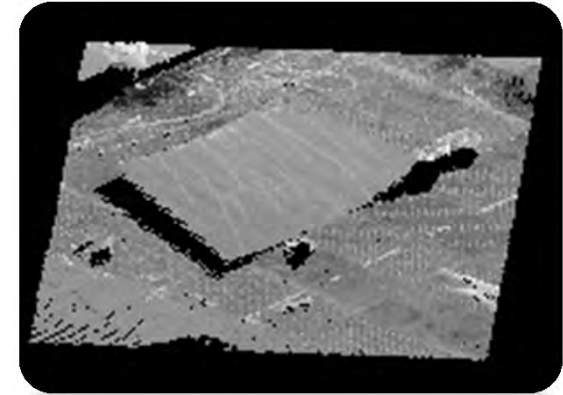
- 測定対象物とセンサ間の距離をレーザが往復する時間を計測することで(r)を求め、それに照射方向の情報(θ, ϕ)を加えて位置座標を決定する



2.4 システム詳細 対象とする二つの入力データ

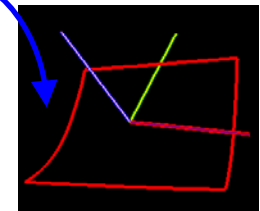
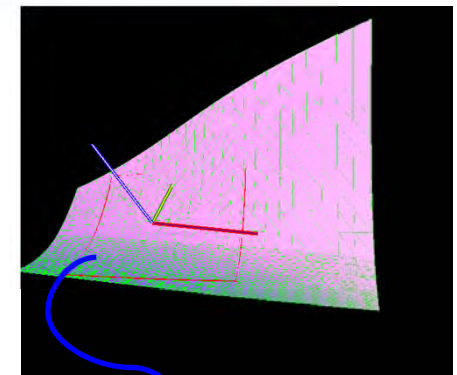
- 点群データ(計測データ)

- 大量の点データが記述
- 点の情報
 - 位置座標(XYZ) 反射強度(A) 輝度(RGB)
- Text形式



- 設計データ

- NURBS(ノットベクトルと制御点)による記述
- トリムカーブ(NURBSカーブ)
 - NURBS曲面を外板一枚の外縁に沿って切り取る
- Text形式



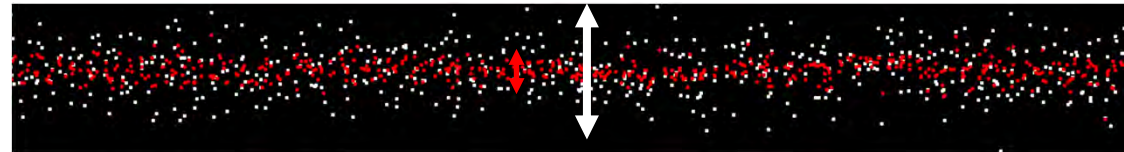
トリムカーブ₁₀

2.4 システム詳細

二つのデータ照合のための前処理

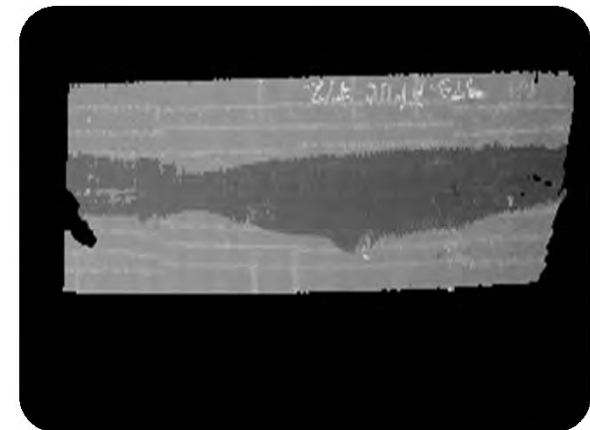
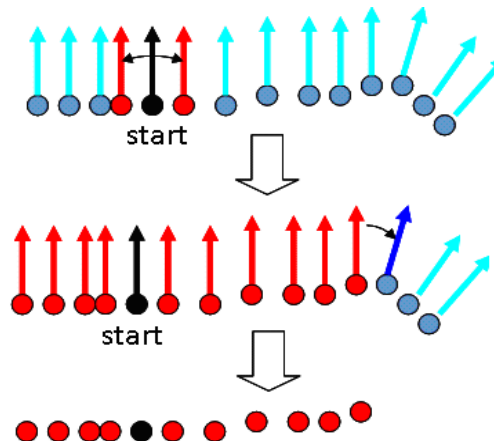
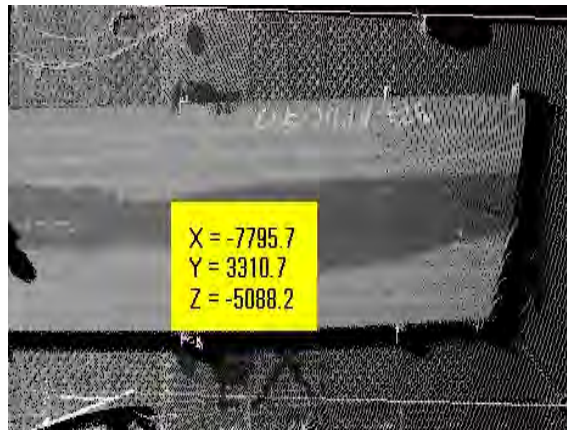
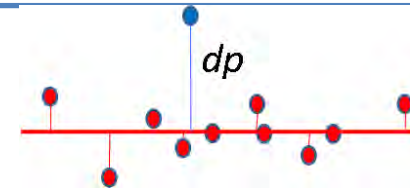
- 平滑化

- Basic Moving Least Square *



- 外れ値の除去**

- 局所最小二乗平面からの距離を利用



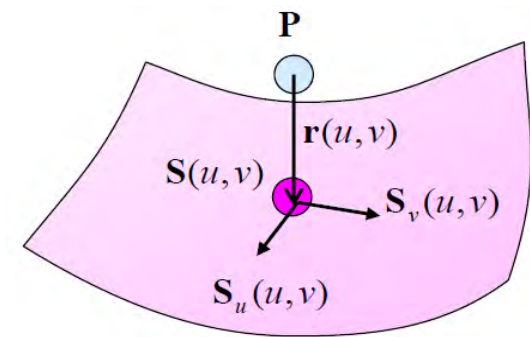
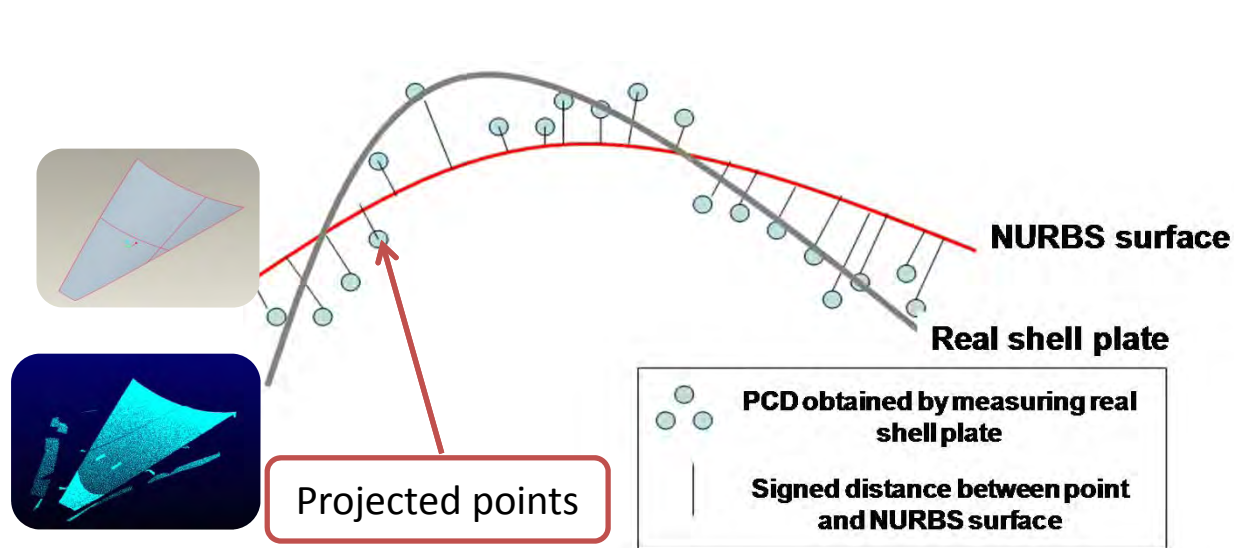
1.開始点指定

2.法線の比較

3.可能な限り領域を拡大

2.4 システム詳細

ICPアルゴリズムでの位置合わせ



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

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

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

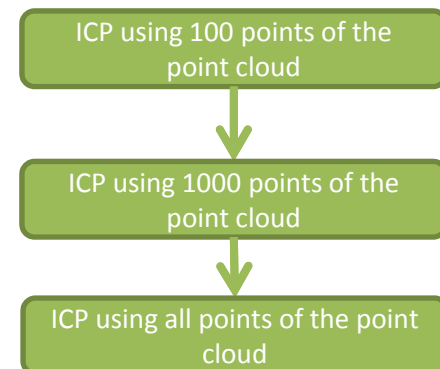
- P: point,
- S: surface function,
- r: projection vector

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

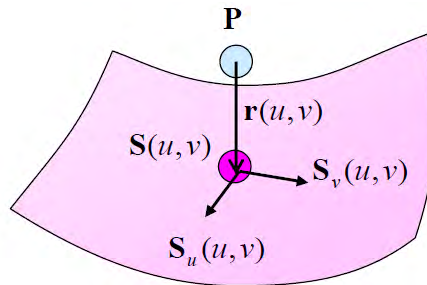
Hierarchical ICP アルゴリズム

位置合わせの精度を維持したまま、計算時間を短くする



誤差の計算方法

点とNURBS曲面間の符号付距離



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

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

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

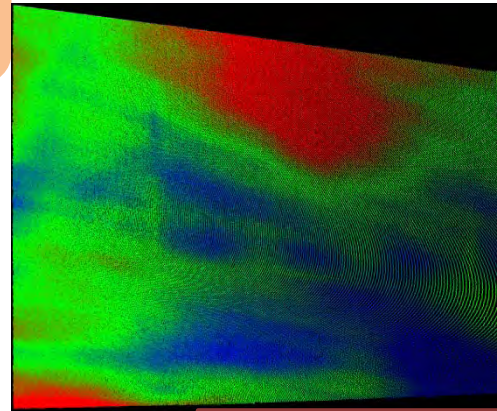
$$\delta_i = \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{i+1} - u_i \\ v_{i+1} - v_i \end{bmatrix}$$

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

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

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

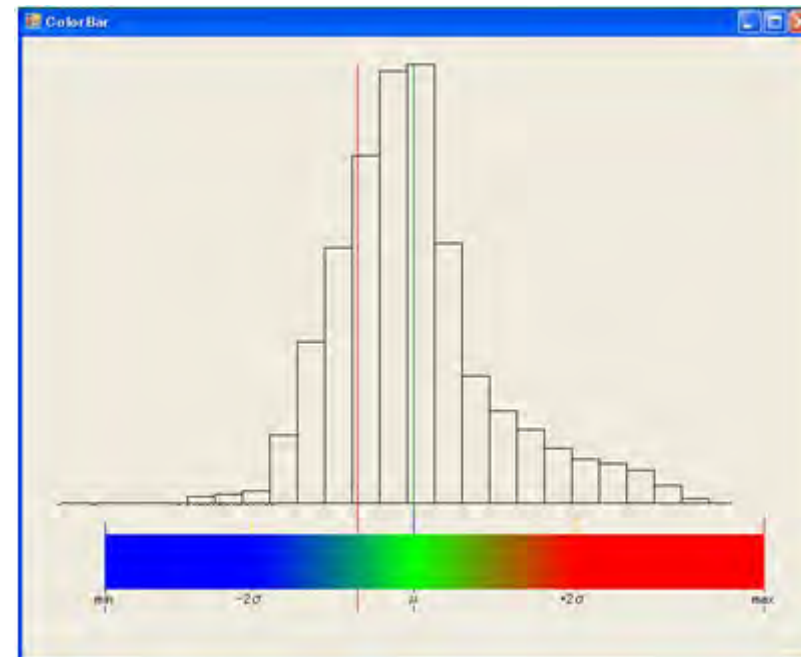
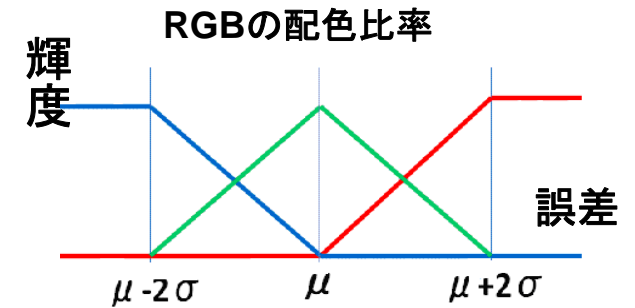
- ニュートン法によりrを求める。
- 式(1)を解き、逐次最適解に近づける。
[The NURBS book]



誤差カラーマップ

2.4 システム詳細

誤差の可視化

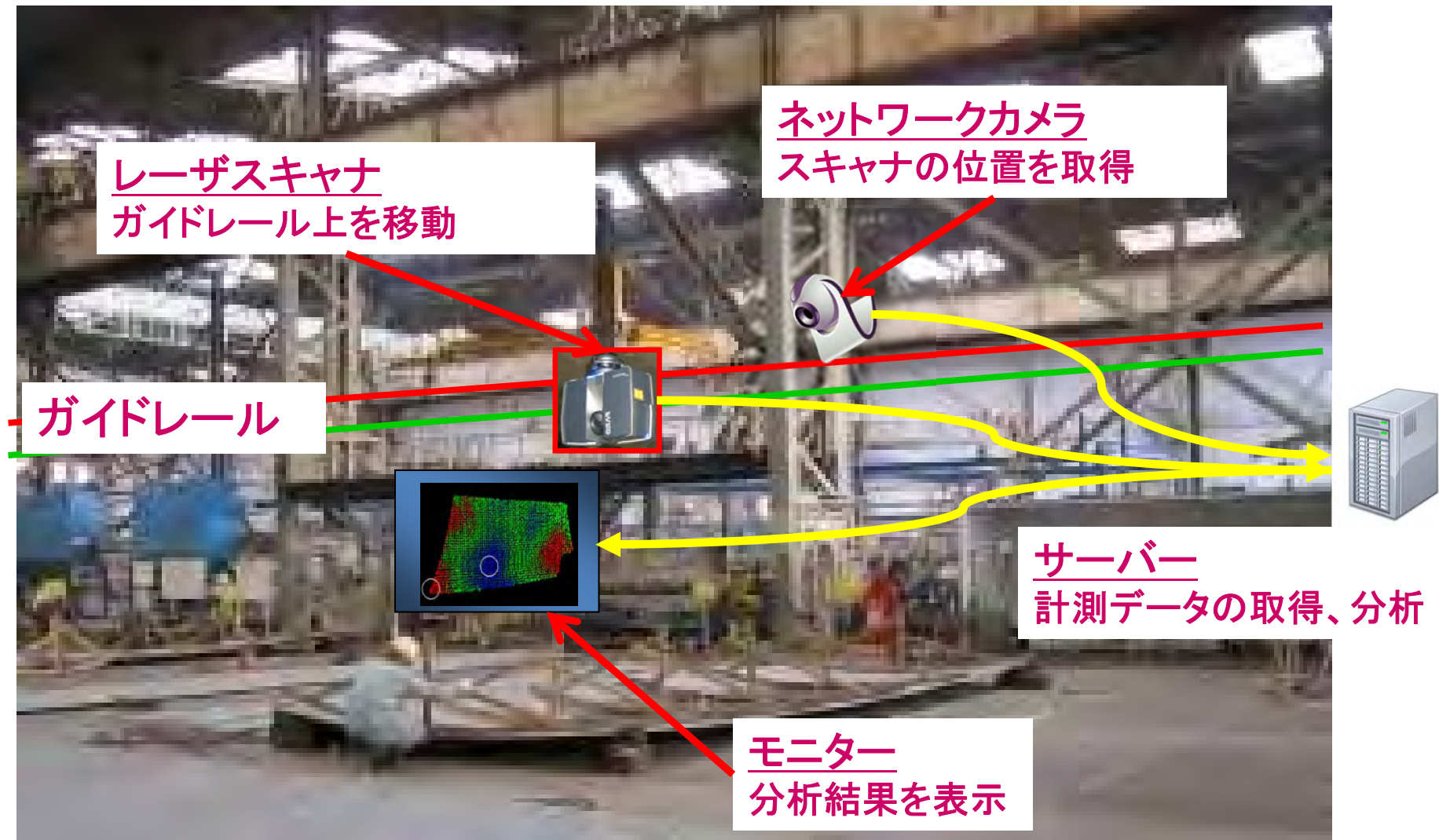


誤差ヒストグラム表示

3. 工場への導入

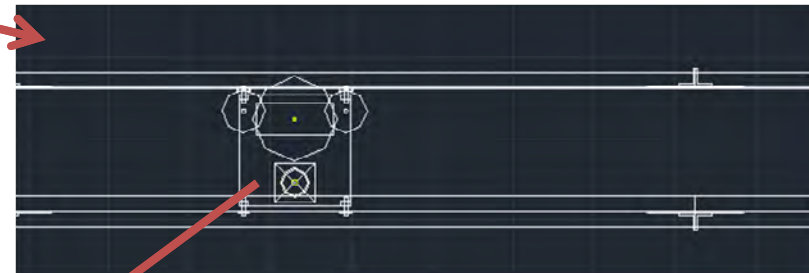
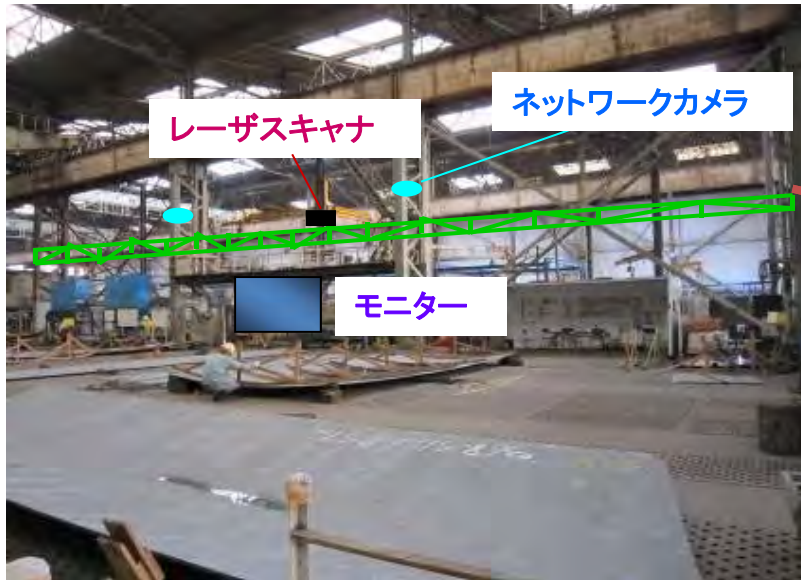
3. 1 概要

曲がり外板の工作精度評価システムの工場でのレイアウト

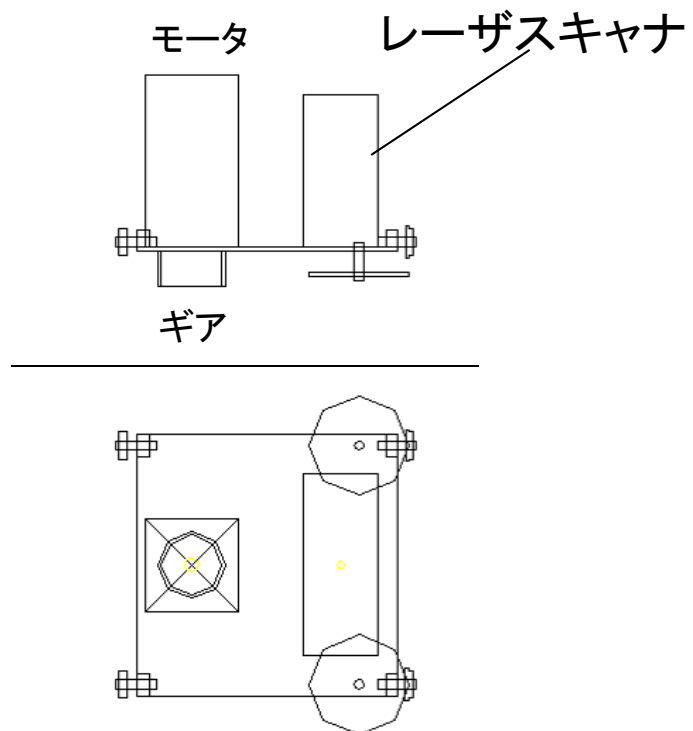


3.2 設置方法

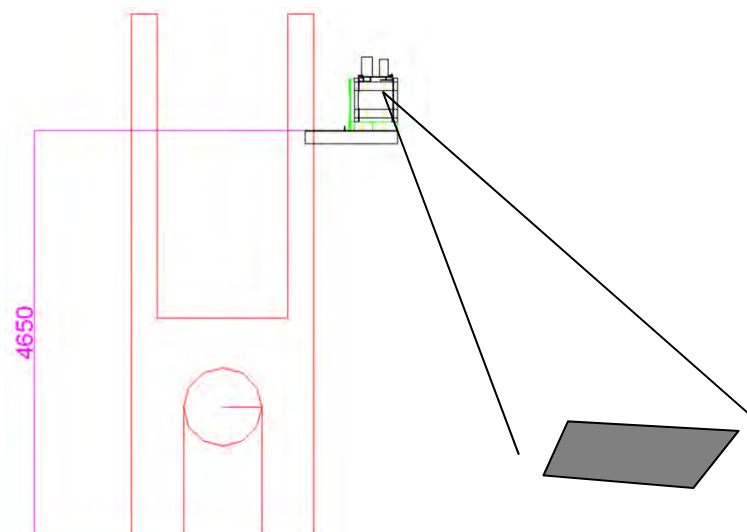
レーザスキャナの移動システム



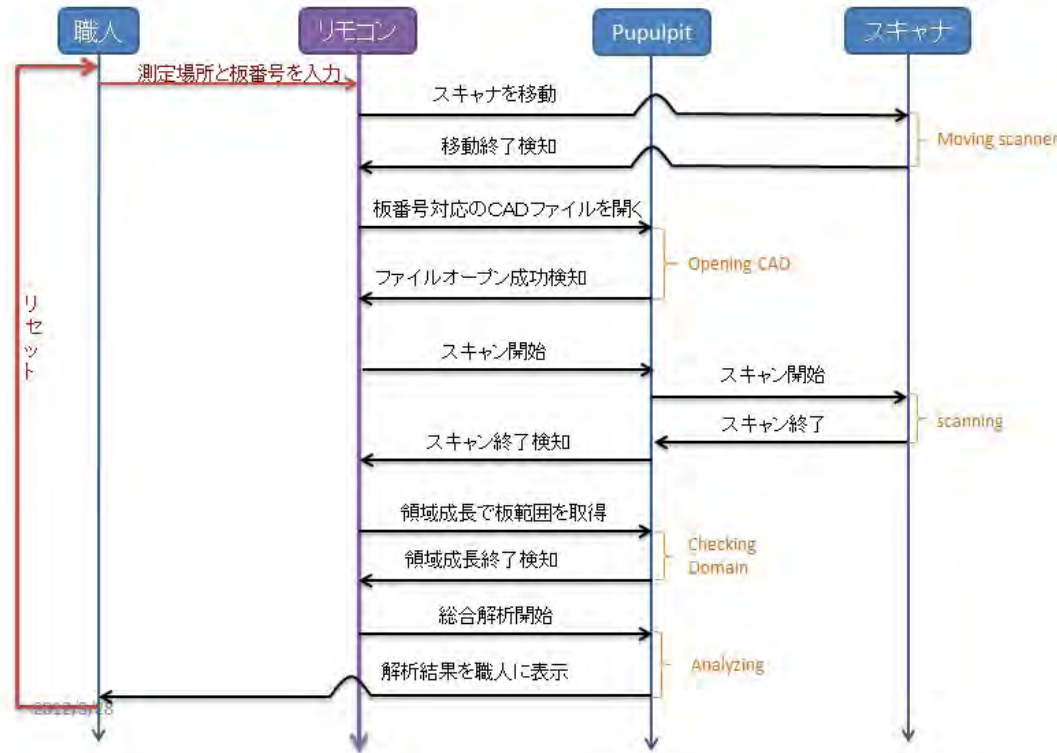
東西を駆動



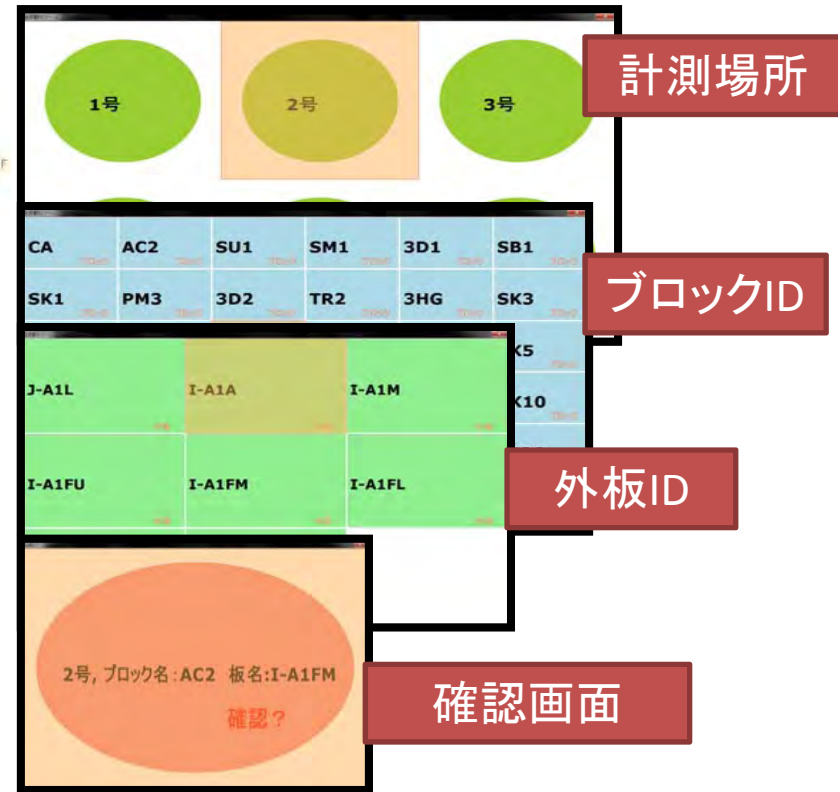
計測時のイメージ



3. 3 計測から解析の自動化 計測自動化に向けたワークフロー



計測・解析自動化したプロセス



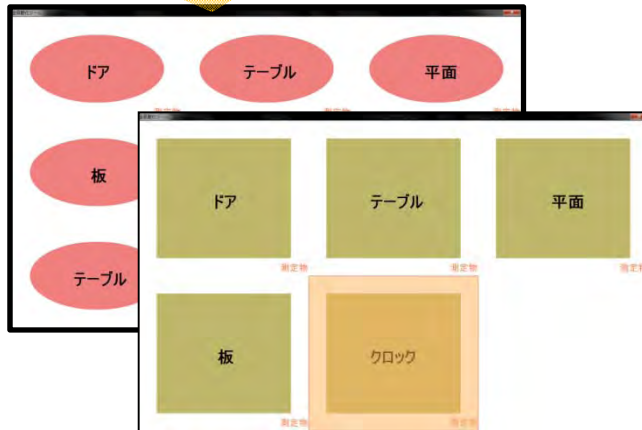
作業員へのユーザインタフェース

計測場所、ブロック番号、外板番号を入力するためのインタフェース
設定ファイルによるカスタマイズが可能

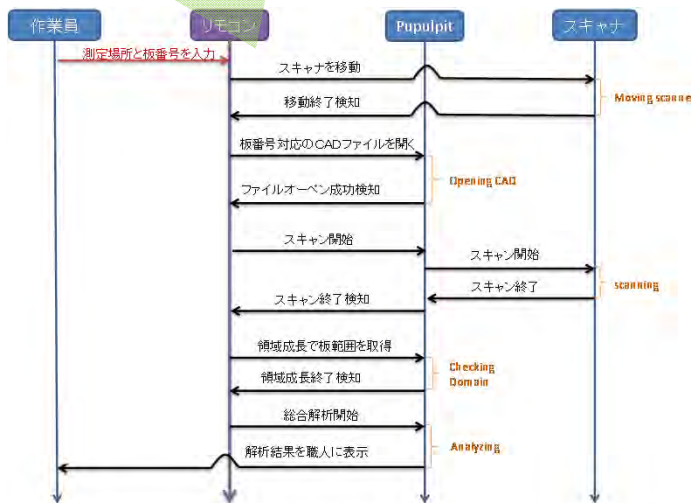
3.3 計測から解析の自動化

自動化システムの柔軟性

ユーザインタフェースのカスタマイズ例



作業フローの記述により、情報システムの自動処理のカスタマイズが可能



設定ファイルによるカスタマイズが可能

```

<UI>
<Step type="select">
  <name>測定地</name>
  <style>
    <sound>Step1.mp3</sound>
    <items ex-step="0">
  </Step>
<Step type="select">
  <name>ブロック</name>
  <style>
    <sound>Step2.mp3</sound>
    <items ex-step="0">
  </Step>
<Step type="select">
  <name>外板</name>
  <style>
    <sound>Step3.mp3</sound>
    <items ex-step="1">
    <items ex-step="2">
  </Step>
<Step type="confirm">
  <name>確認</name>
  <style>
    <sound>Confirm.mp3</sound>
    <items ex-step="0">
  </Step>
  
```

```

<operation>
  <op-set comment="adjustScreen">
  <op-set comment="setSymbol">
  <op-set comment="openDialog">
  <op-set comment="setTexttoDialog">
  <op-set comment="pushOKButton">
  <op-set comment="Scan">
  <op-set comment="DomainCheck">
  <op-set comment="Analyze">
  <op-set comment="showResult">
  <op-set comment="beginLoop">
</operation>
  
```

オペレーションセット
設定(op-set定義)

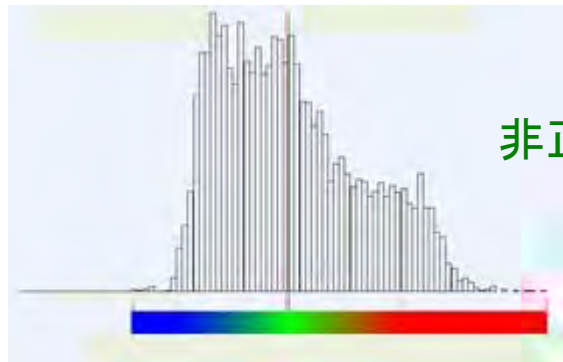
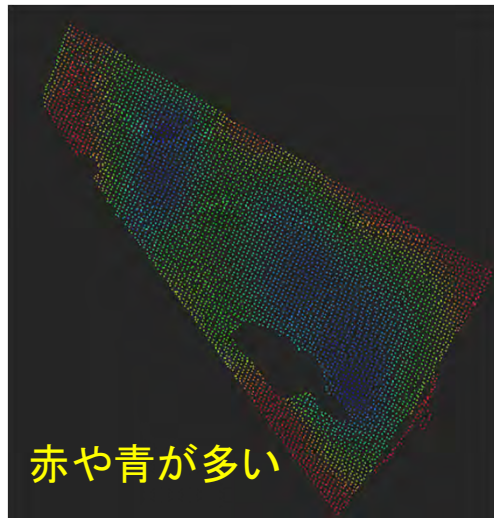
画面遷移設定
(Step定義)

4. 工場への導入のケーススタディ

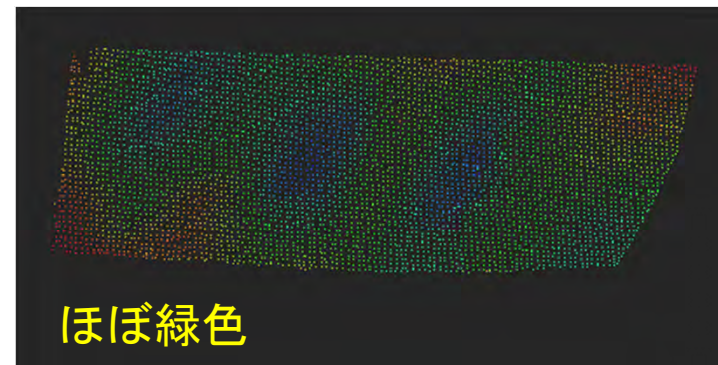
4. 1 システム導入による工場での効果

レーザスキャナ適用後の仕上がり精度の改善

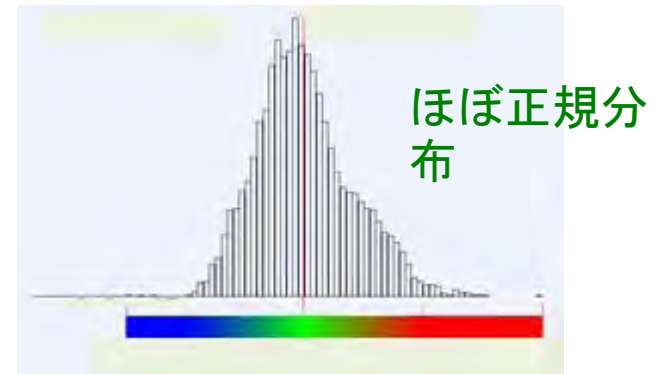
導入当初の仕上がり具合



同一部材の現在の仕上がり具合



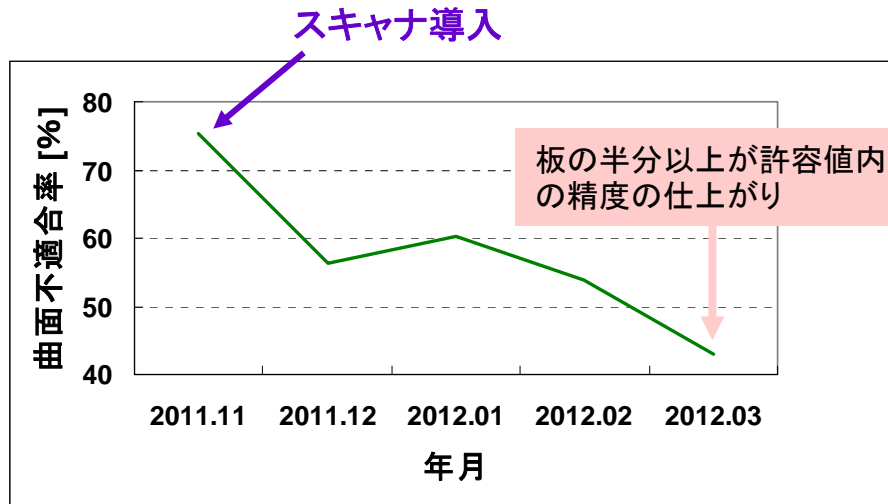
緑色の範囲: 設計値±設定した許容値



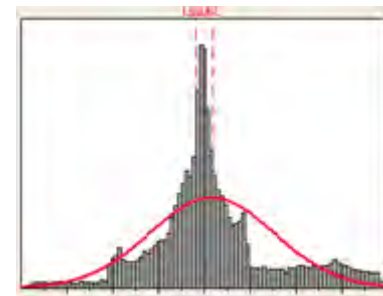
スキャン結果を現場が確認することで、精度の改善効果が得られている

4.1 システム導入による工場での効果

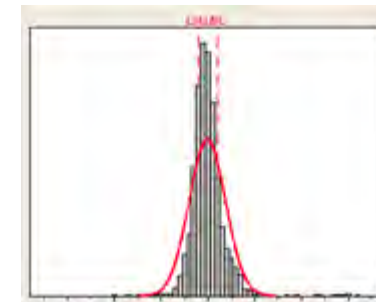
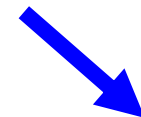
レーザスキャナ適用後の仕上がり精度の改善



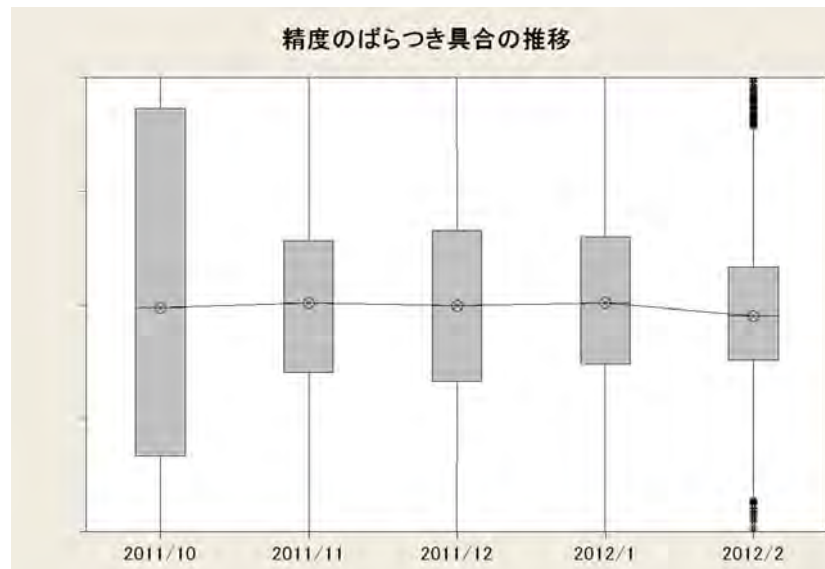
曲面不適合率：
ある許容値を定めた場合に、仕上がりは許容値に収まらない範囲の割合



11月中旬



2月末



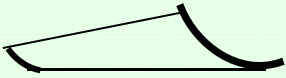



大炉仕上がり形状が大幅に改善した

4. 2 計測結果の傾向、加工の進め方の特徴

曲がり形状の分類

曲がり形状の分類

複合形状もあるものの、曲がり形状は大まかに次の4種類にまとめられる。

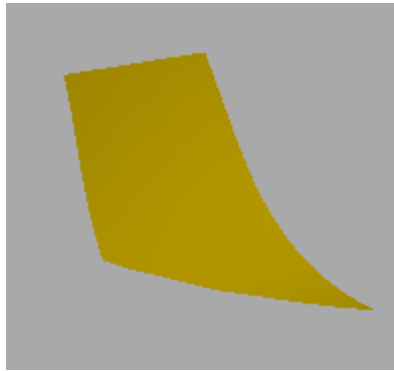
パターン	曲がり形状	記号
ラツパ型	板幅方向に曲がり 縦曲がりなし	
椀型	中央が下がるよう な縦曲がり	
鞍型	中央が上がるよう な縦曲がり	
捻れ型	曲がりがなく、対角 が高く/低くなる	

板ごとに焼き方・仕上がりの傾向を捉え、標準化を進めていく。

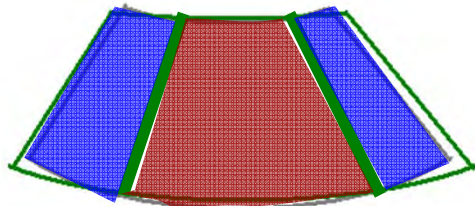
4.2 計測結果の傾向、加工の進め方の特徴

ラツパ型

ラツパ型の場合



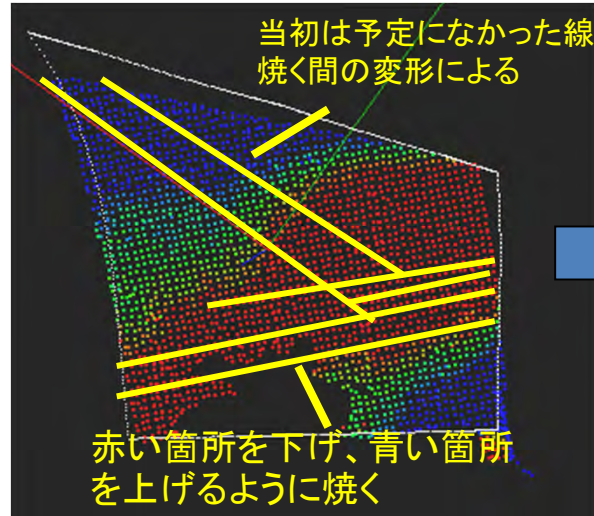
焼きやすいよう、少し曲がりを控えめにプレス



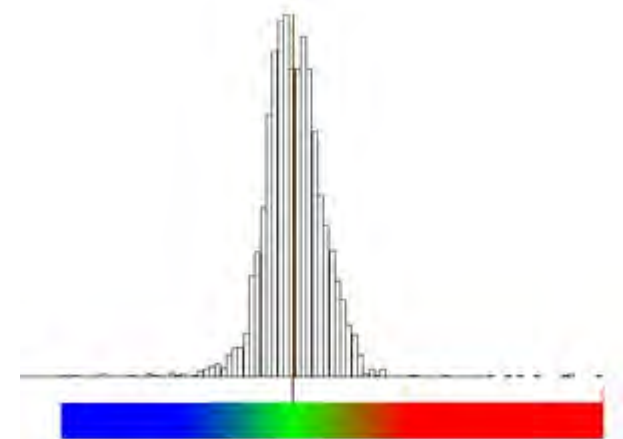
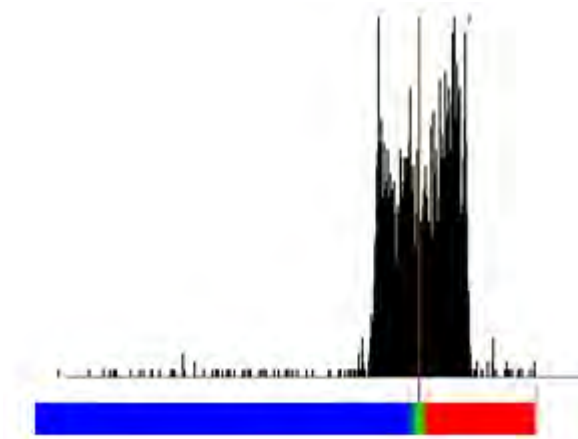
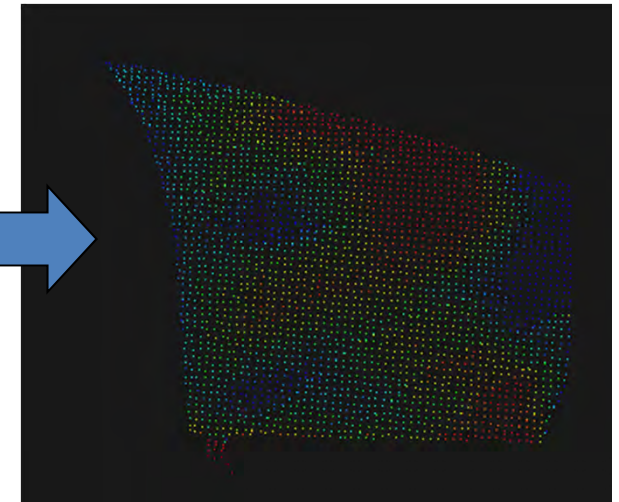
— 設計値 — 計測値



プレス後



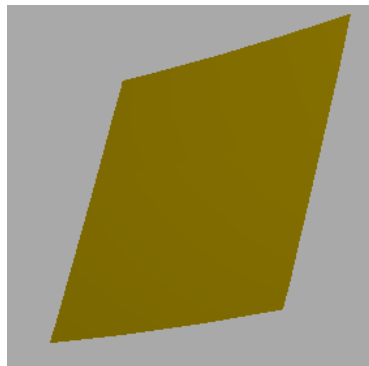
焼き曲げ後



4.2 計測結果の傾向、加工の進め方の特徴

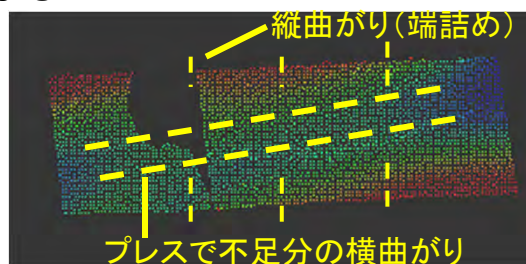
椀型

椀型の場合

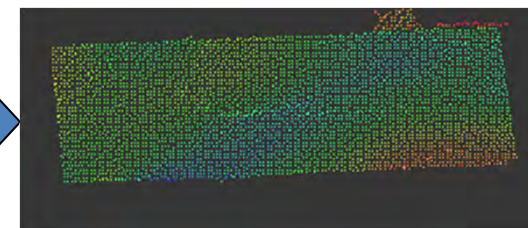


プレス後

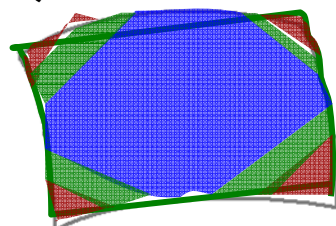
実際は大きな縦曲がりを持つ椀型の板はないため、左下のモデルと若干異なる



焼き曲げ後

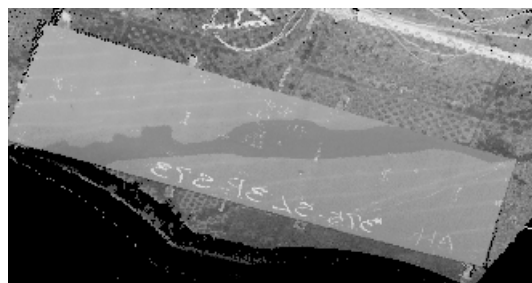
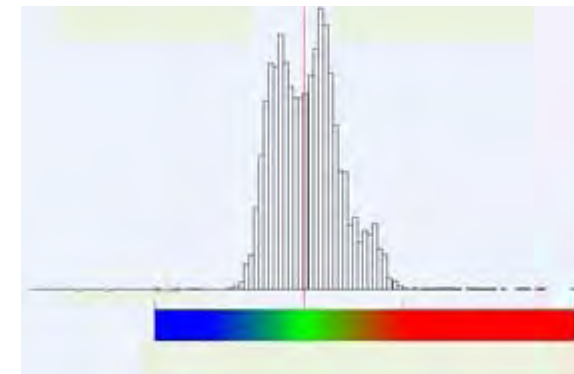
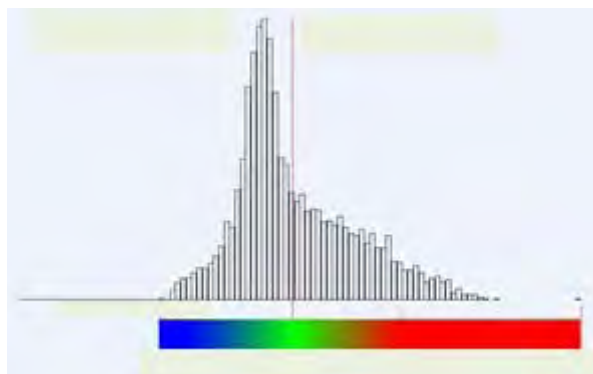


横曲がりほぼプレス、縦曲がりは焼きのみ



— 設計値 — 計測値

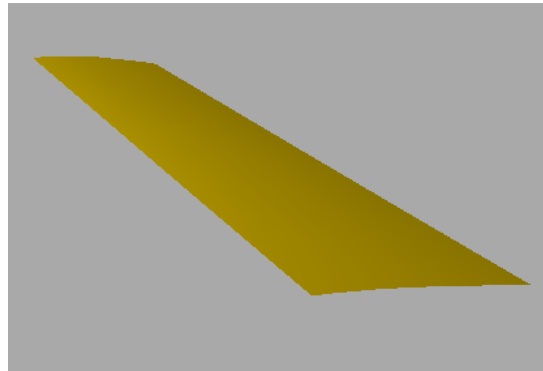
※不具合修正のため裏返した際のデータ。点線は裏側を焼くという意味



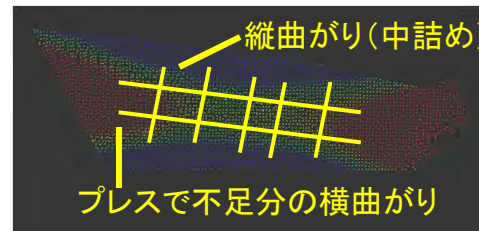
4. 2 計測結果の傾向、加工の進め方の特徴

鞍型

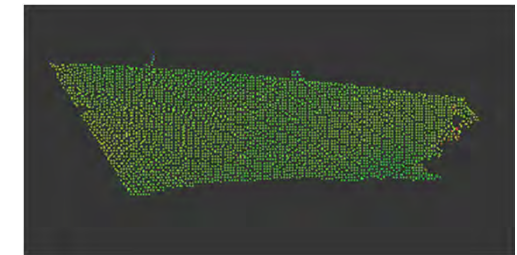
鞍型の場合



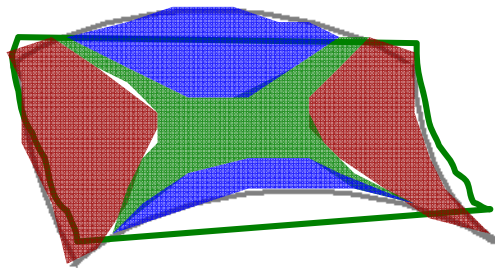
プレス後



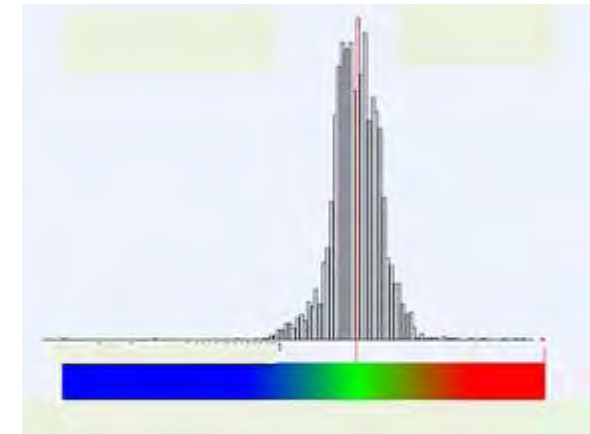
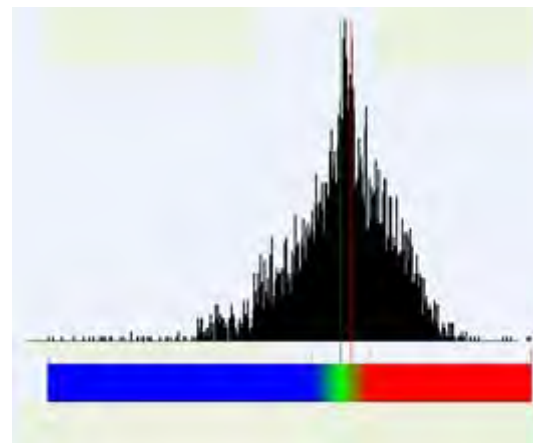
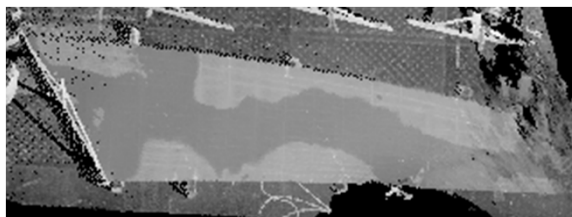
焼き曲げ後



横曲がりほぼプレス、縦曲がり
は焼きのみ



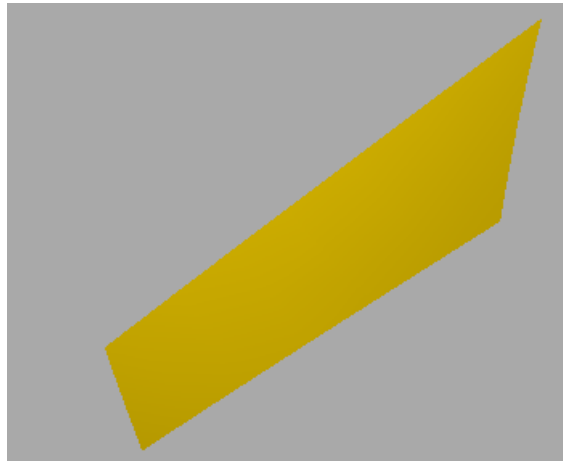
— 設計値 — 計測値



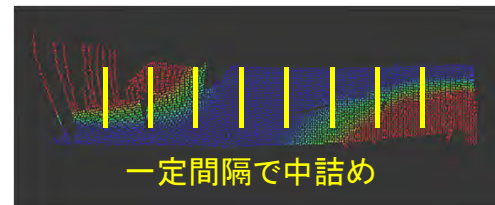
4.2 計測結果の傾向、加工の進め方の特徴

捻れ型

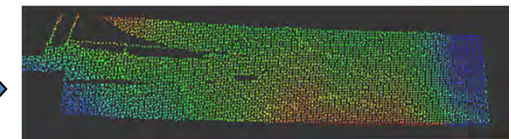
捻れ型の場合



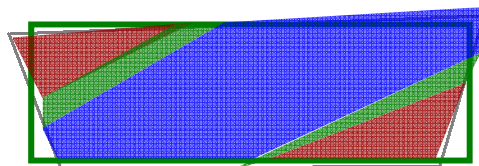
プレス後



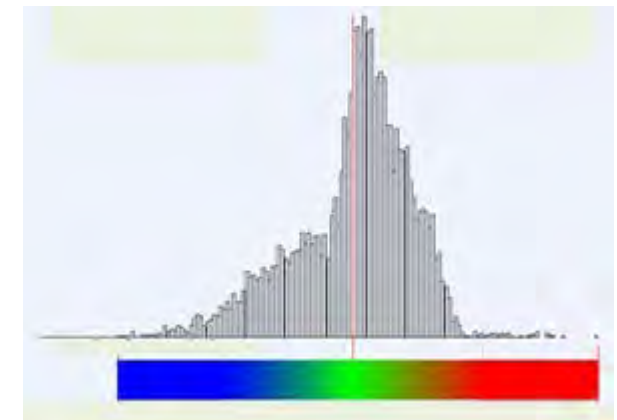
焼き曲げ後



プレスなし、平板から焼き曲げ開始



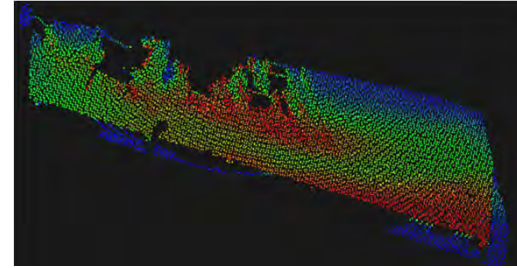
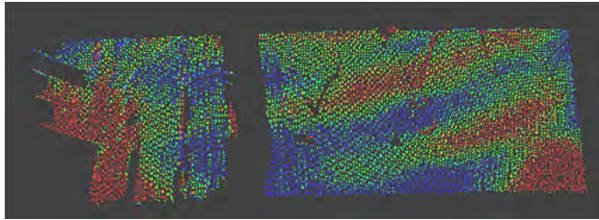
— 設計値 — 計測値



※乖離が著しく、表示されず

5. 考察

5.1 現場への反映時の課題 板の特徴ごとに異なる許容値を設定する



広範囲が許容値に
収まる
(緑の範囲になる)

→直す箇所が明白

同一基準で
評価した場合

ほとんどの領域が
許容値に収まらない
(赤や青が多い)

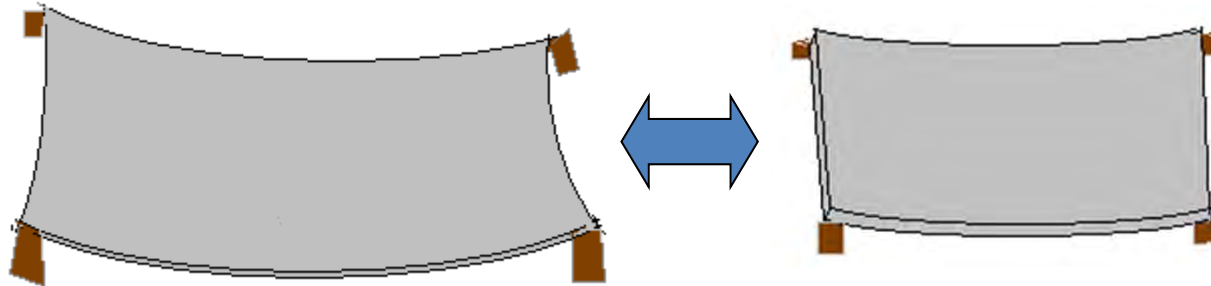
→直す箇所が不明

現場で使えるツールにするためには、板の特徴ごとに異なる許容値を設定する必要がある

5.1 現場への反映時の課題

基準の決定

基準の決定



自重たわみの観点から
許容値(設計値±何mmま
で緑色とするか)
を決定

船尾舵周辺、
ラダーホーン

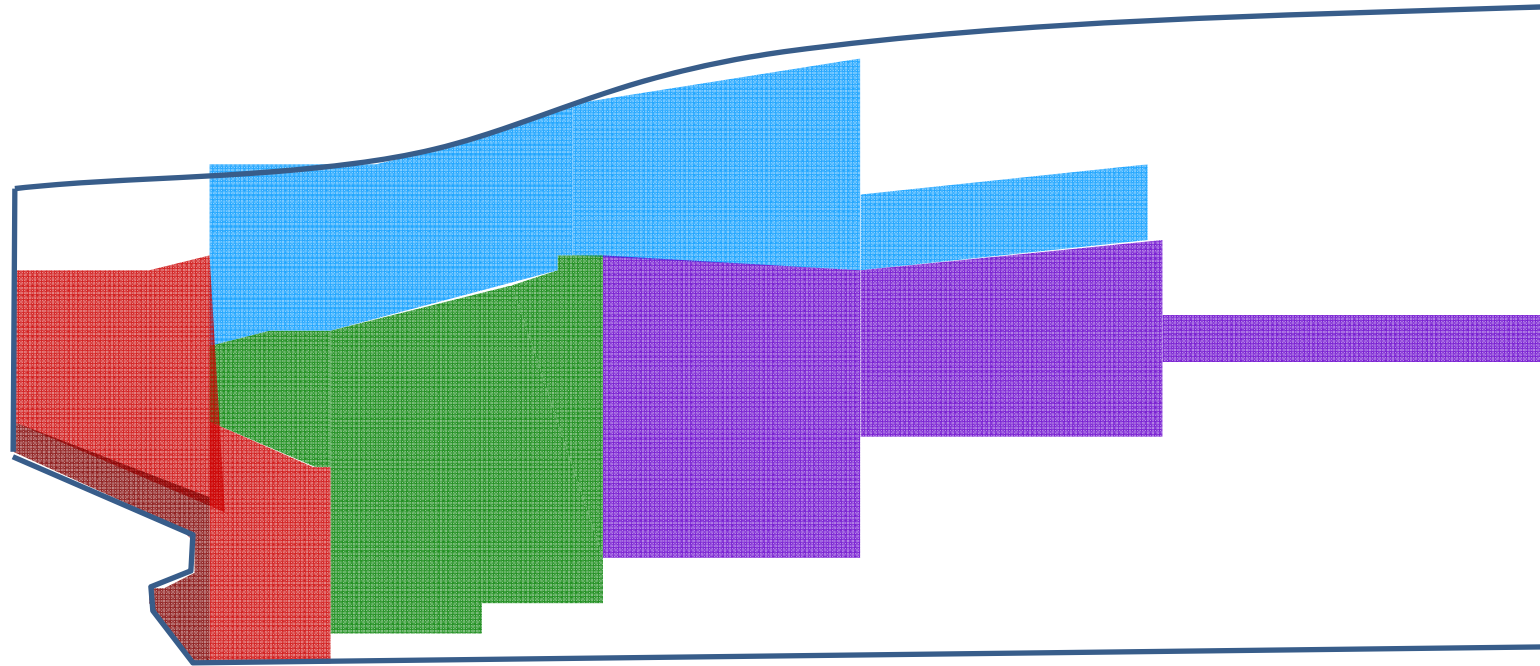
板幅\板厚	~15mm	15~20mm	20~25mm	35mm~
~1000mm	なし	通常の 許容値	通常の 許容値	厳しい 許容値
1000~ 3000mm	通常の 許容値	通常の 許容値	通常の 許容値	厳しい 許容値
3000mm~	緩やかな 許容値	緩やかな 許容値	なし	なし

側外板

5.1 現場への反映時の課題

船尾部

焼き曲げの設計値との差異の許容値(船尾部)



厳しい許容値

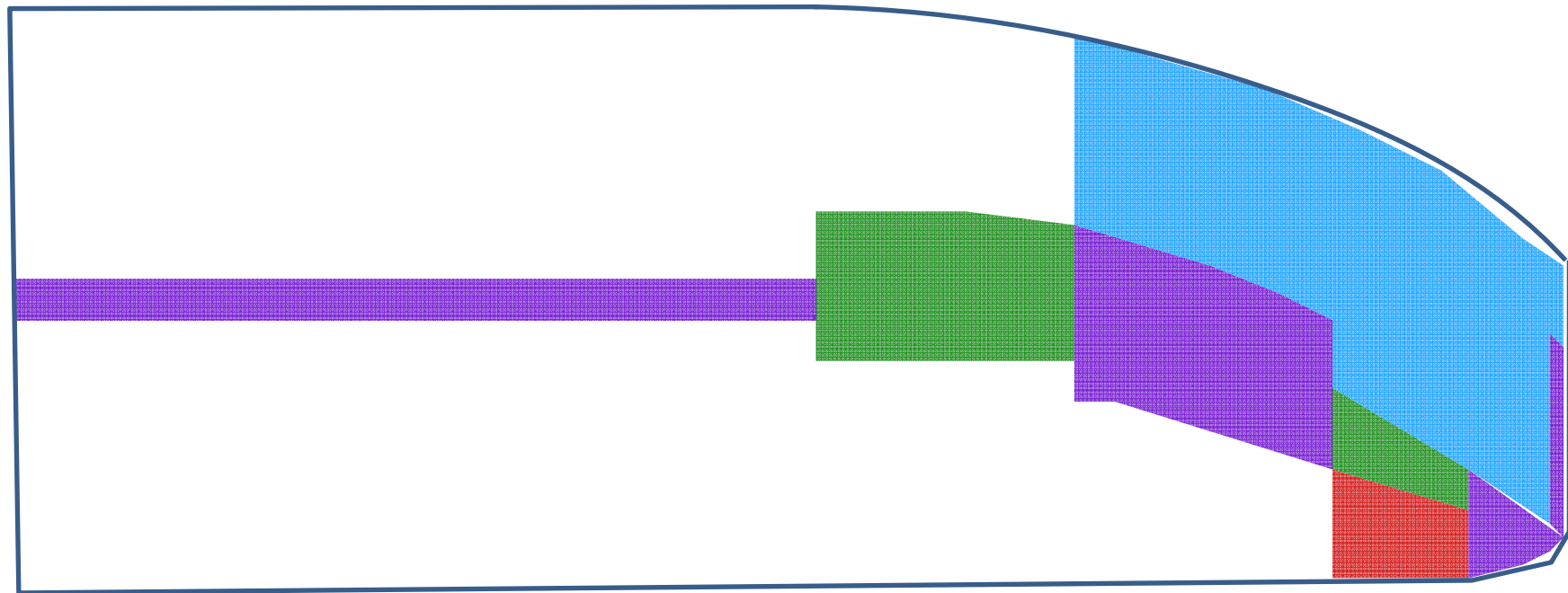


緩やかな許容値

5. 1 現場への反映時の課題

船首部

焼き曲げの設計値との差異の許容値(船首部)



厳しい許容値



緩やかな許容値

6. 結論と今後の課題

6.1 結論

- レーザスキャナにより得られた点群データと設計データとの誤差を可視化するシステムを開発した。
- 開発したシステムを試験的な導入を行い、3か月の運用期間に曲がり外板の加工精度が向上していることが確認された。
- 木型では難しい曲がり外板の面全体の評価が可能となり、外板の形状により異なる許容値を設けるべきという方針を示した。

6.2 今後の課題

1. 許容値再設定における課題

- ・ { 自重たわみが大きくても、厳密に木型に合わせる必要のある板
自重たわみが小さくても、緩やかな許容値を設定しても問題ない板 } 点群表示の限界 が存在

- ・ 自動化を行うためには、許容値の方も自動で設定されるようにする必要がある

あらかじめ設定？測定時に作業者が入力？

2. 許容範囲の条件を含めた、計測作業の自動化

※作業者が板を指定すれば、自動的に計測開始、ディスプレイに結果表示
四周寸法評価による、エラー発生防止なども必要

謝辞

- 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スキーム」による支援を受けて実施した。ここに記して感謝の意を表す。

ClassNK
R & D P R O J E C T