

平成22-23年度共同研究
「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」
報告書

平成24年3月

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

プロジェクトの背景と目的

- 背景

- H21年度に東京大学/住友重機械MEの共同研究により曲がり外板の工作精度評価システムを開発した。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が可能となった。

- 目的

- 商用レベルで造船所に導入できるレベルまでのユーザビリティやシステムの品質向上を行うこと。

成果の概要

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



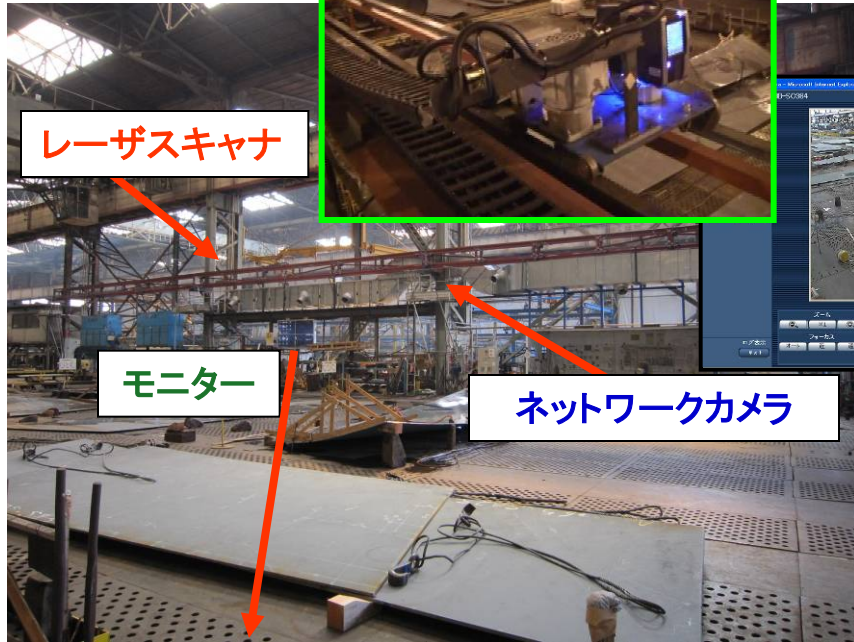
曲がり形状を計測



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



レーザスキャナ

モニター

ネットワークカメラ

モニターにPC画面を
表示

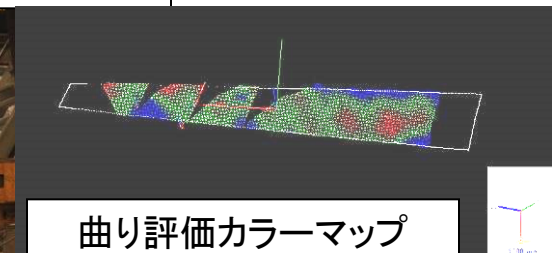


ヒストグラムにより目標まであと何mm程度か確認

点群により曲がりの過不足位置を確認



曲り評価カラーマップ

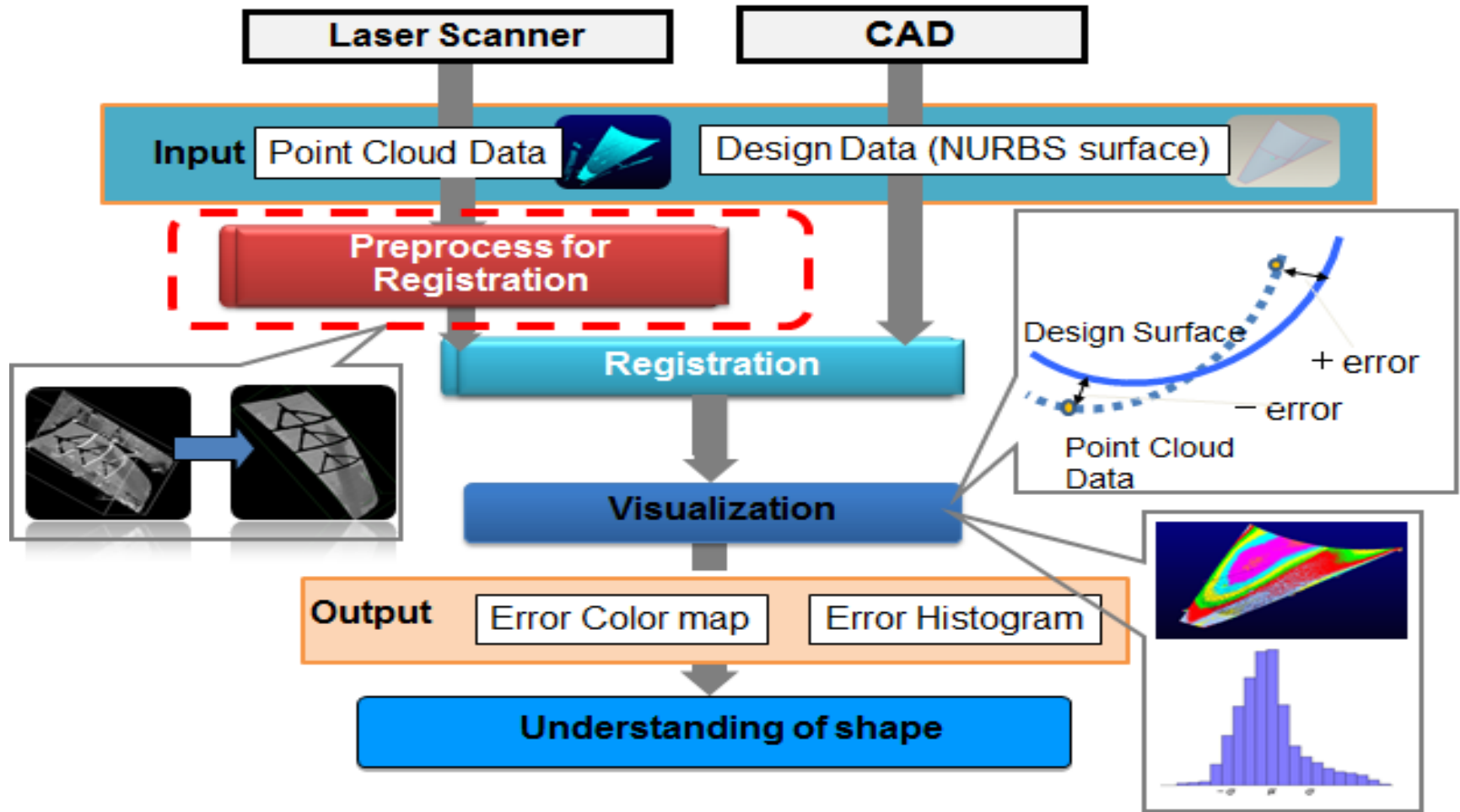


線状加熱作業前後データ比較により、曲り量と入熱の因果関係を定量的に計測する

⇒リアルタイム作業指示のためのバックデータ蓄積

曲がり外板の工作精度評価システム

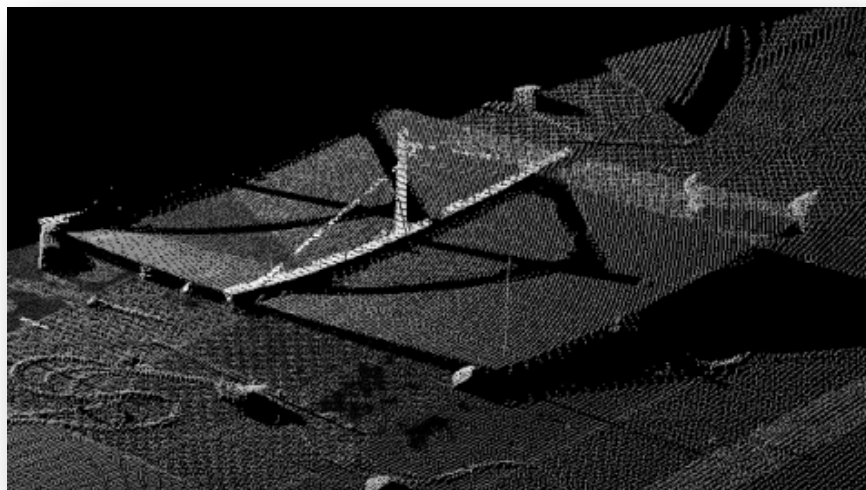
計測データ精度評価のフロー



開発した機能の紹介

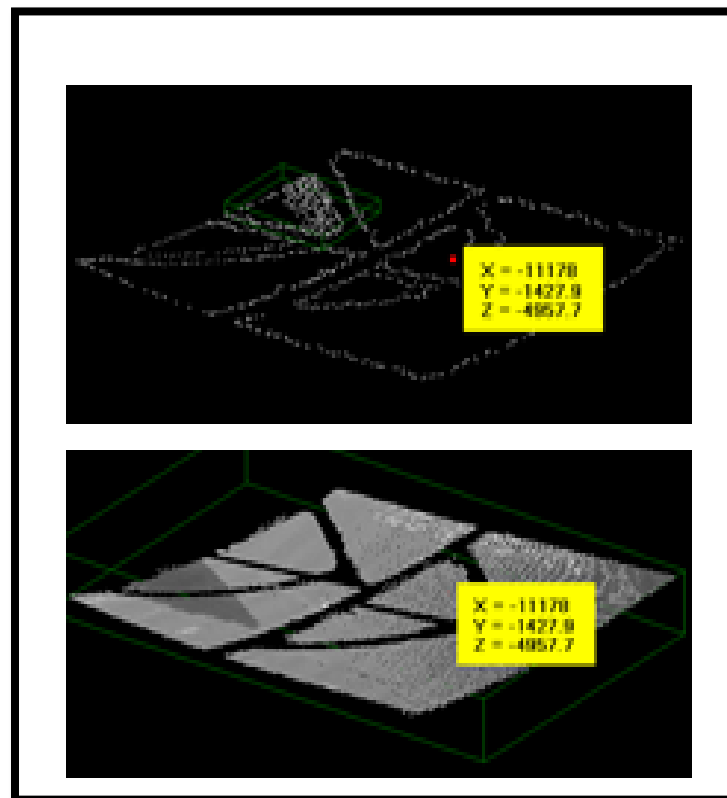
計測結果の前処理の効率化

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

レーザスキャナの制御機能の開発

本研究で利用したプルピットプラットホームで計測から解析までのすべての作業を行えるようにすることによる計測の効率化

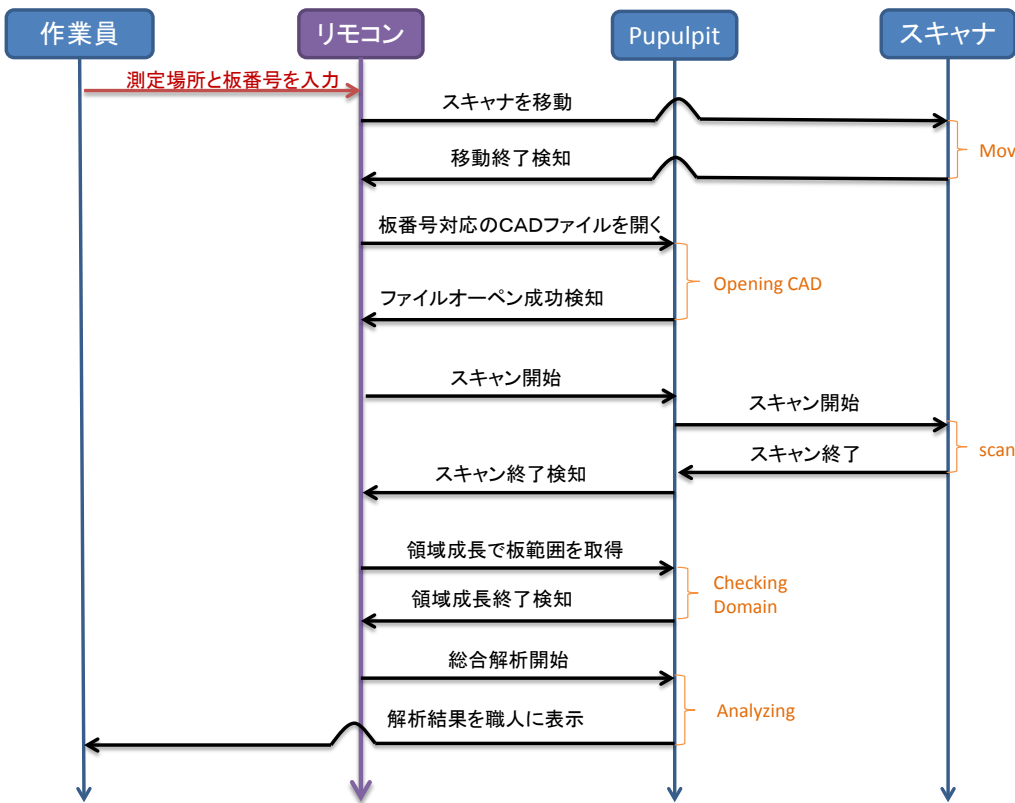


パラメータの変更： 選択範囲を反映した形でスキャナパラメータダイアログを表示

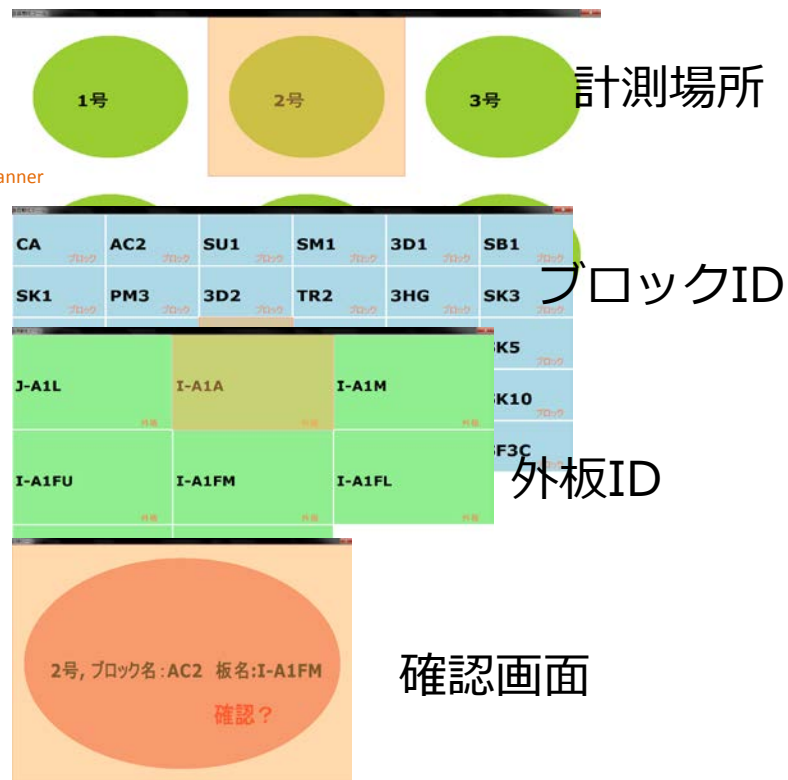
このまま取り込み： プレビュー中の結果の点群を取り込み（選択範囲は関係なし）

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

計測から解析までの全自動化



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ID、外板IDを簡単に入力できるインタフェース

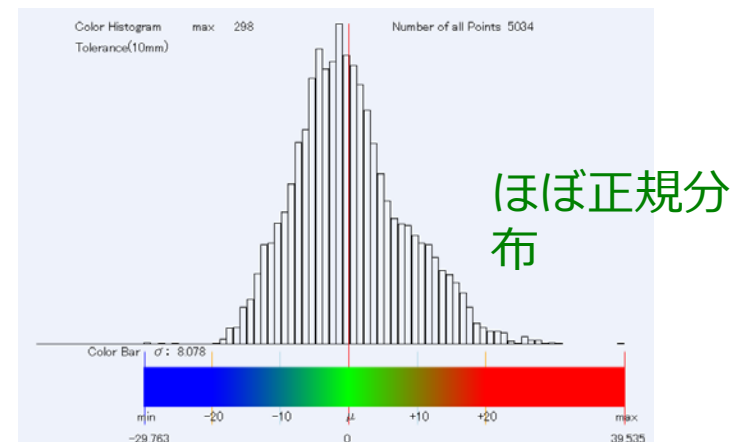
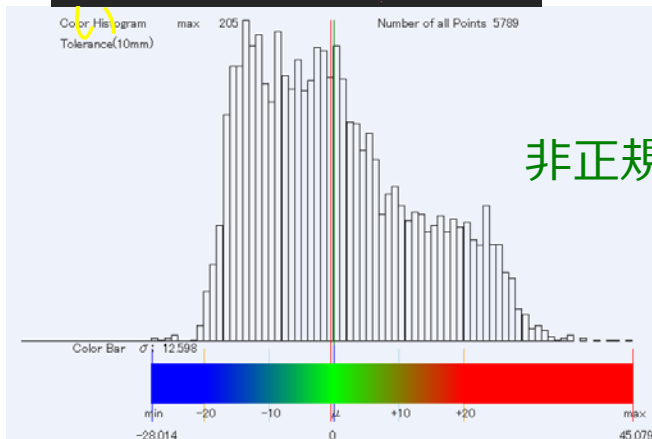
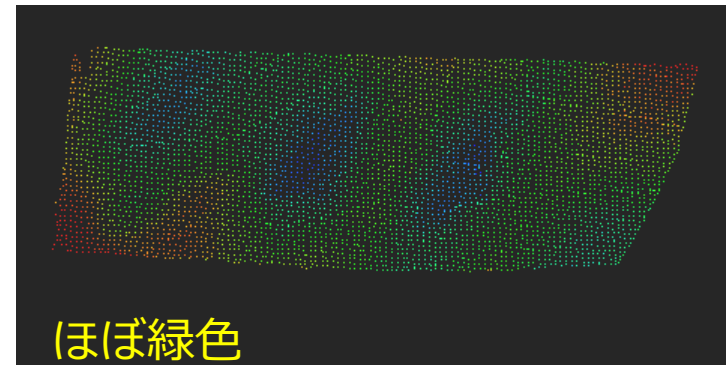
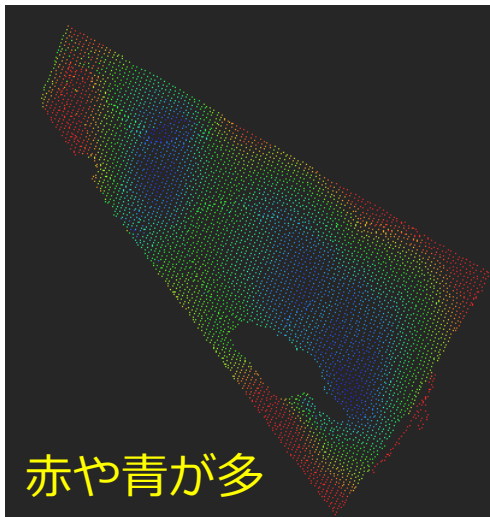
計測結果の評価

レーザスキャナ適用による効果

導入当初の仕上がり具合 G2 SC2
HA1LP

緑色の範囲：設計値±10mm以内

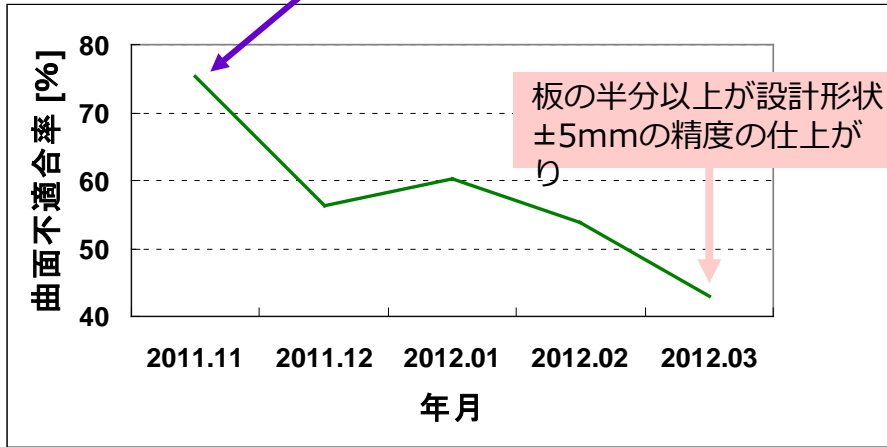
現在の仕上がり具合
G3 SB2 G2LAS



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

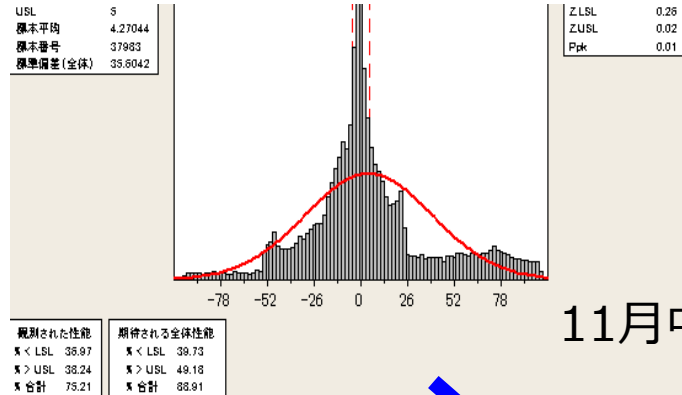
レーザスキャナ適用後の 仕上がり精度の改善

スキャナ導入

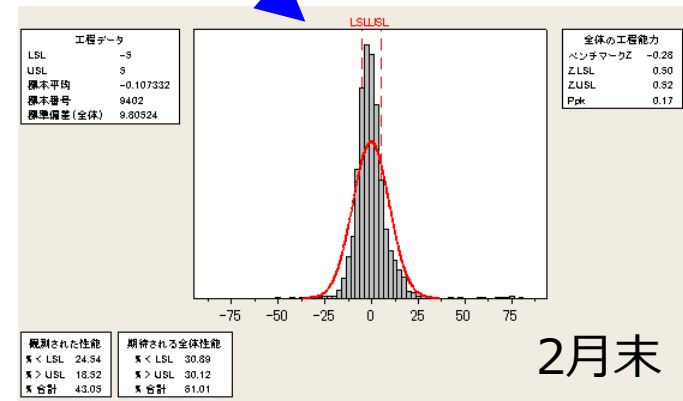
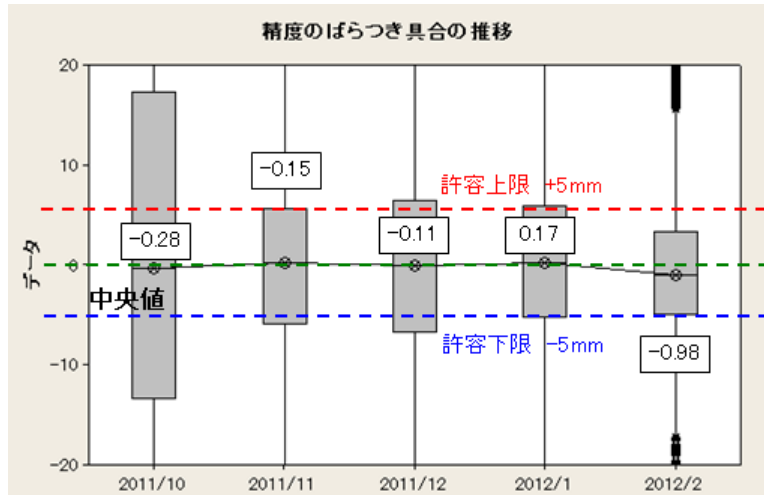


曲面不適合率：

仕上がりが設計値±5mm以内に収まらない範囲の割合



11月中旬



2月末

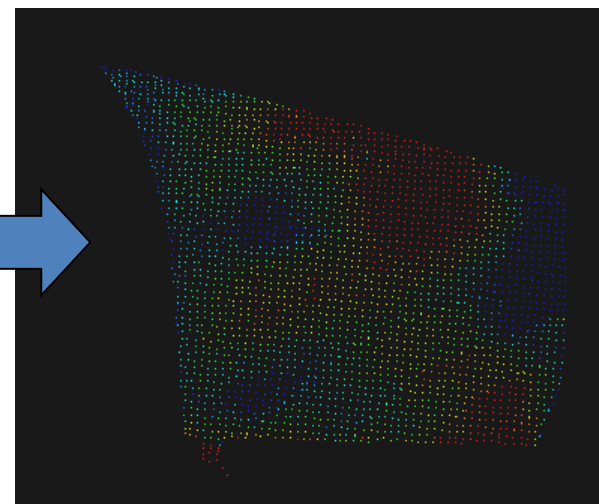
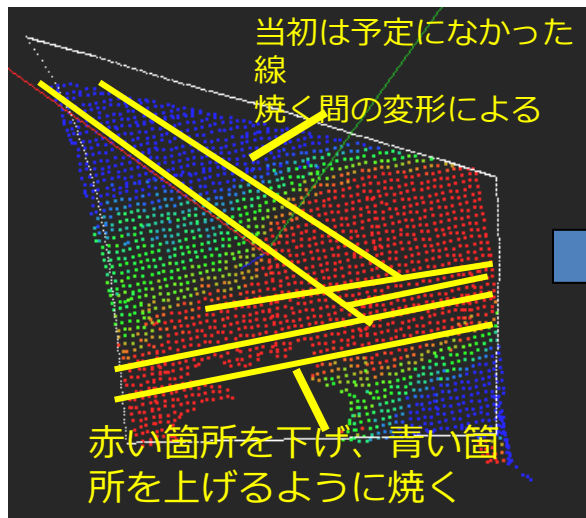
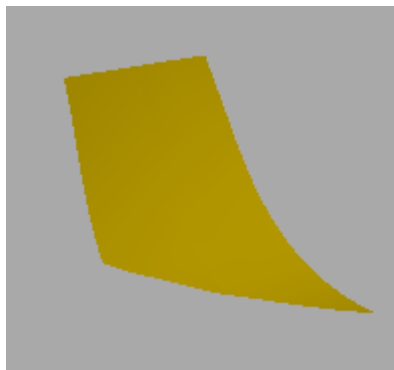
大炉仕上がり形状が大幅に改善した

提案システムによる工程分析例

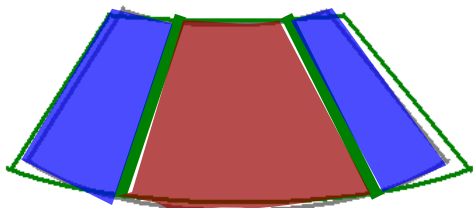
#75 SB1 F1FP

プレス後

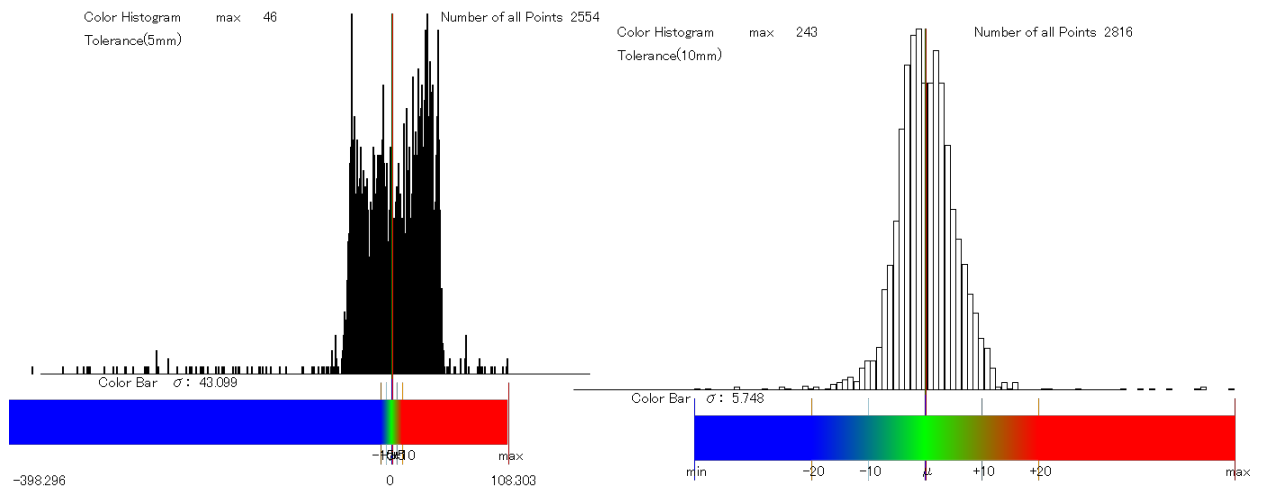
焼き曲げ後



焼きやすいよう、少し曲がりを含めめにプレス



設計値 計測値

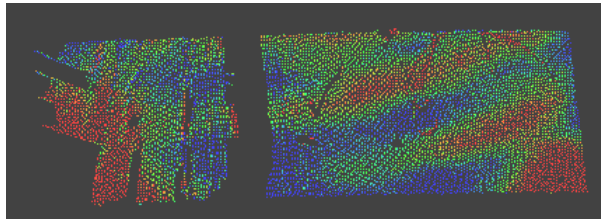


許容範囲：±10mm

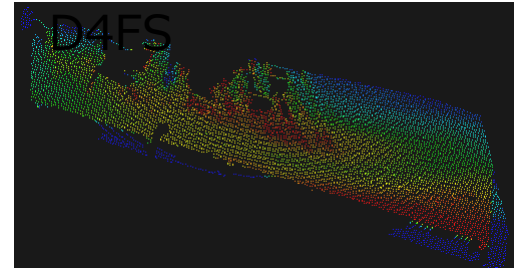
今後の課題

現場への反映時の課題

#75 SB3 F3S

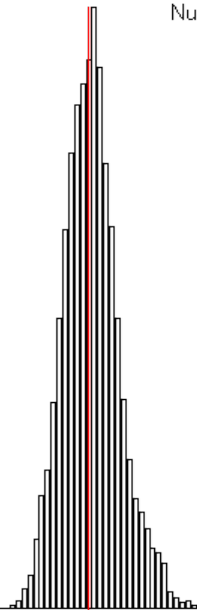


#75 S4L



Color Histogram max 959
Tolerance(10mm)

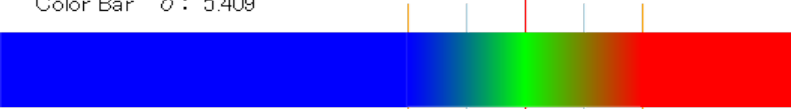
Number of all Points 10272



広範囲が設計値
±10mmに収まる
(緑の範囲になる)
)

→直す箇所が明白

Color Bar σ : 5.409

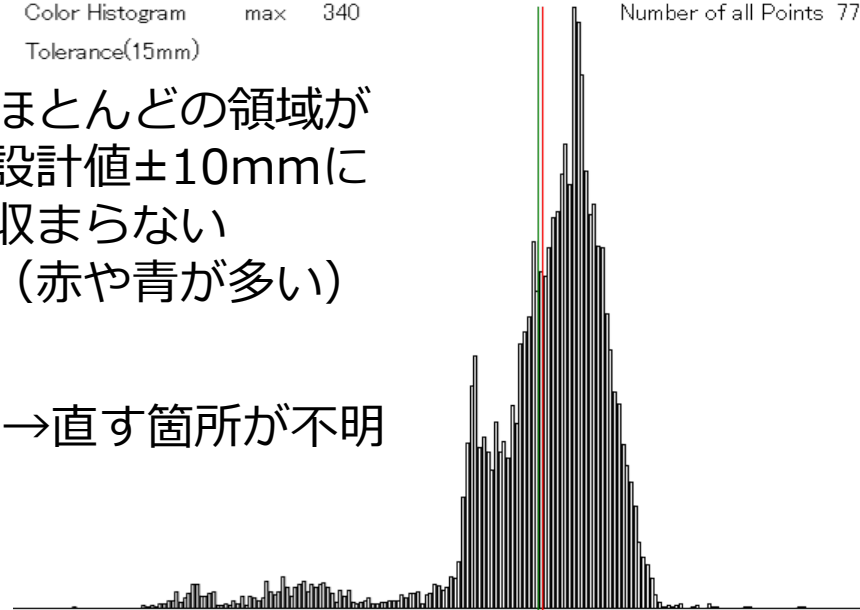


Color Histogram max 340
Tolerance(15mm)

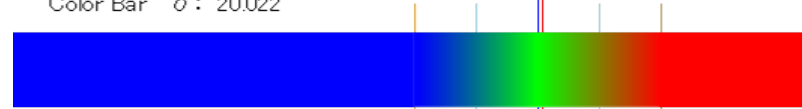
Number of all Points 7728

ほとんどの領域が
設計値±10mmに
収まらない
(赤や青が多い)

→直す箇所が不明



Color Bar σ : 20.022



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

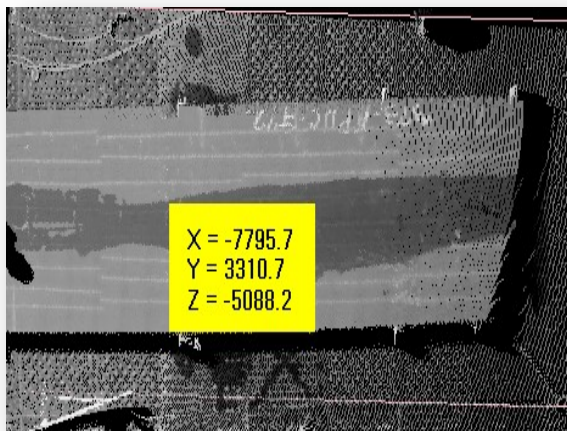
max
64.496

詳細情報

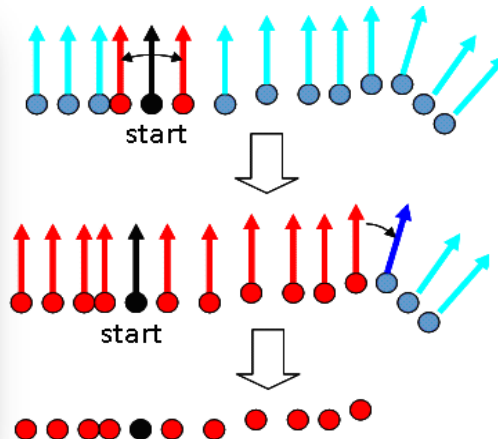
(計測結果の前処理の効率化)

領域成長法

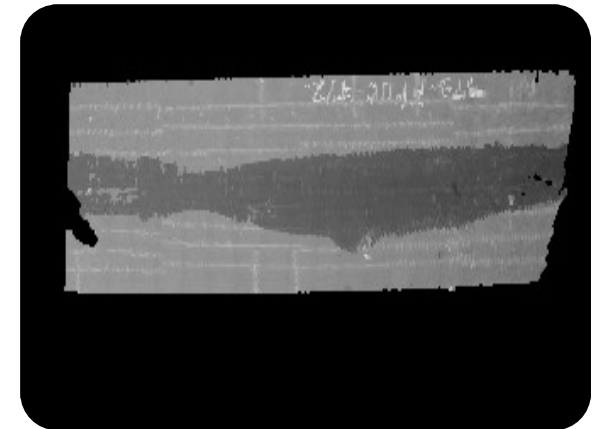
- 領域成長法(**Region Growing Method**)を用いて、外板である部分を抽出。



1. 開始点指定

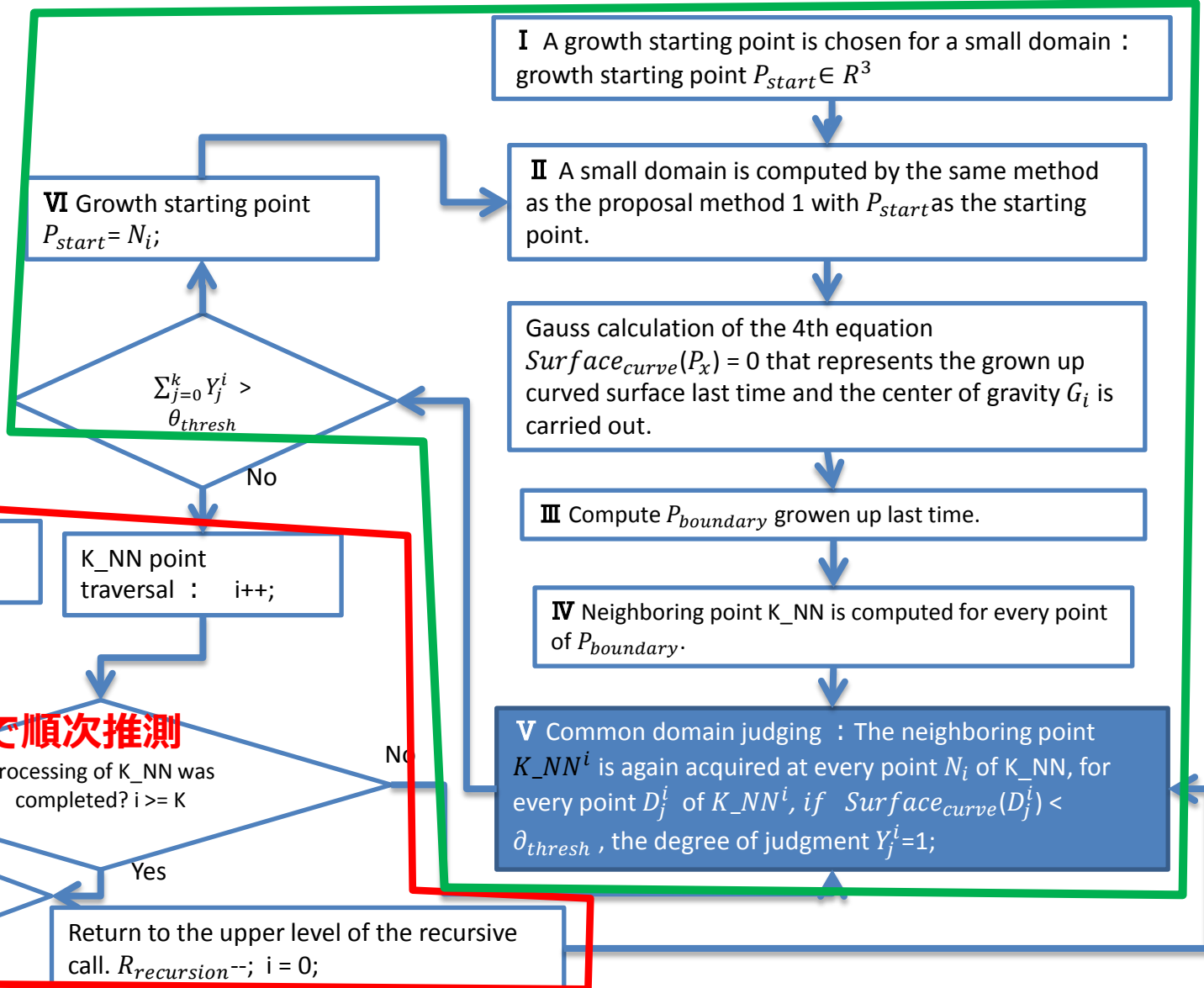
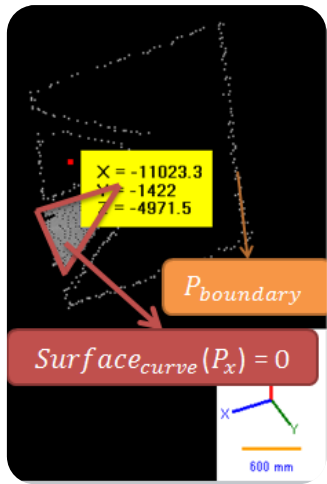


2. 法線の比較



3. 可能な限り領域を拡大

単独開始点による複数エリアの領域成長



再帰で順次推測

The obtained domain is unified and outputted.

K_NN point traversal : i++;

Processing of K_NN was completed? i >= K

Is there any upper level of the recursive call?

Return to the upper level of the recursive call. R_recursion--; i = 0;

I A growth starting point is chosen for a small domain : growth starting point $P_{start} \in R^3$

II A small domain is computed by the same method as the proposal method 1 with P_{start} as the starting point.

Gauss calculation of the 4th equation $Surface_{curve}(P_x) = 0$ that represents the grown up curved surface last time and the center of gravity G_i is carried out.

III Compute $P_{boundary}$ grown up last time.

IV Neighboring point K_NN is computed for every point of $P_{boundary}$.

V Common domain judging : The neighboring point K_{NN}^i is again acquired at every point N_i of K_NN, for every point D_j^i of K_{NN}^i , if $Surface_{curve}(D_j^i) < \partial_{thresh}$, the degree of judgment $Y_j^i = 1$;

VI Growth starting point $P_{start} = N_i$;

$$\sum_{j=0}^k Y_j^i > \partial_{thresh}$$

No

No

Yes

No

単独開始点による複数エリアの 領域成長のプロセス



I Chose an arbitrary point $P_{start} \in R^3$ (R^3 is a set of the point of a shell).



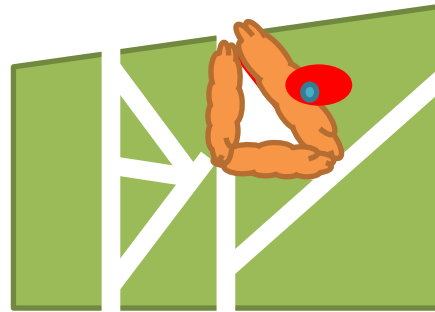
II Detect the curved surface equation $Surface_{curve}(P_x)$ of a small zone by plane fitting.



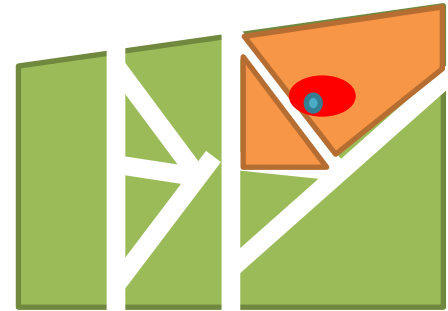
III Find the edge $P_{boundary}$ of the detected small domain.



IV Search for the point K_{NN} for every point of edge.

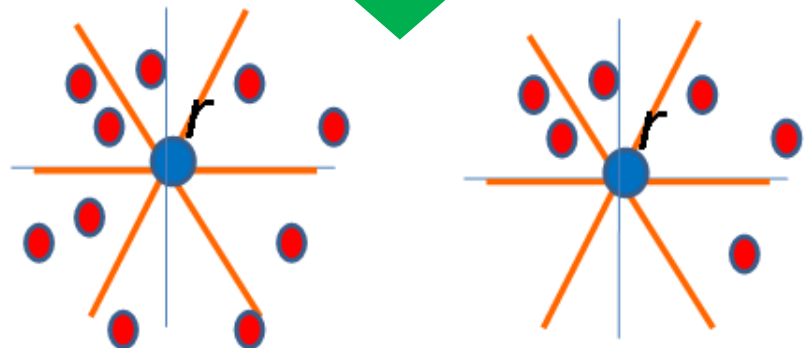
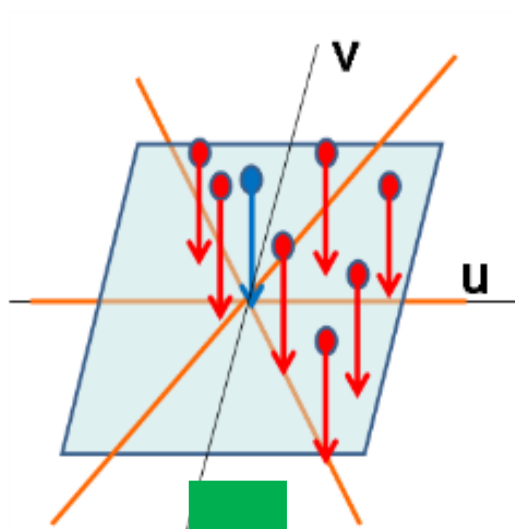


V Search for the neighborhood point K_{NN}^i (red range) and N_i (blue point) of K_{NN} , and perform 4th curved surface fitting.

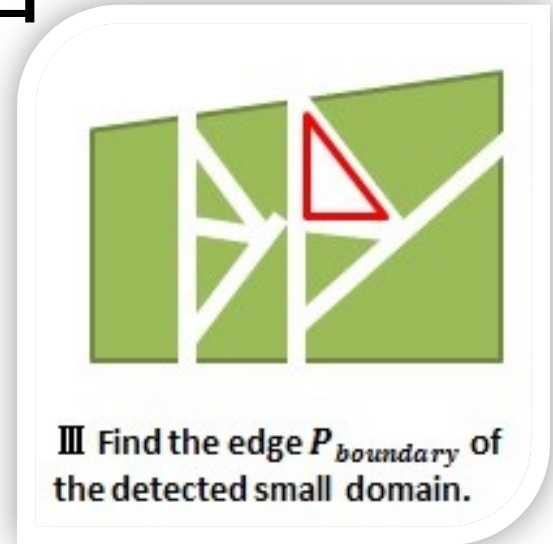


VI When K_{NN}^i fills $Surface_{curve}(P_x)$, the process from II is overlapped with N_i as the starting point.

エッジ検出

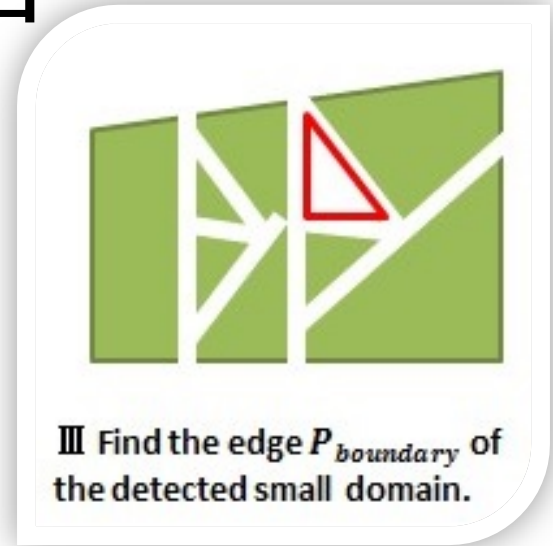
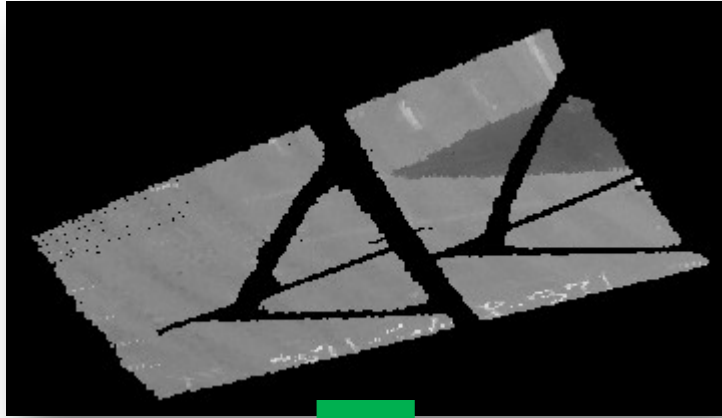


端部ではない 端部(エッジ)



- 端部検出
 - すべての点について以下を行う
 1. 近傍点を見つける(赤い点)
 2. 平面に投影する。
 3. エッジ：4領域以下にしか含まれていない

エッジ検出



- 端部検出
 - すべての点について以下を行う
 1. 近傍点を見つける(赤い点)
 2. 平面に投影する。
 3. エッジ：4領域以下にしか含まれていない
 - ◆ 毎回成長してきた小さい曲面のエッジ確認する。

曲面フィッティング

$$Surface_{curve}(P_x) = 0$$

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

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

$$\frac{\partial Q}{\partial c_{i,j-i}} < \partial_{thresh}$$

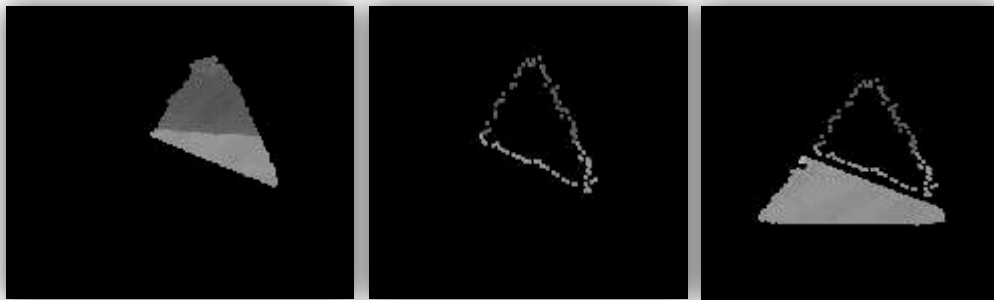


▼ Search for the neighborhood point K_NN^i (red range) and N_i (blue point) of K_NN , and perform 4th curved surface fitting.

1. エッジの近傍点算出
2. 共通領域判定を行う
 - 4次方程式により精度の高い四次曲面フィッティングを適用

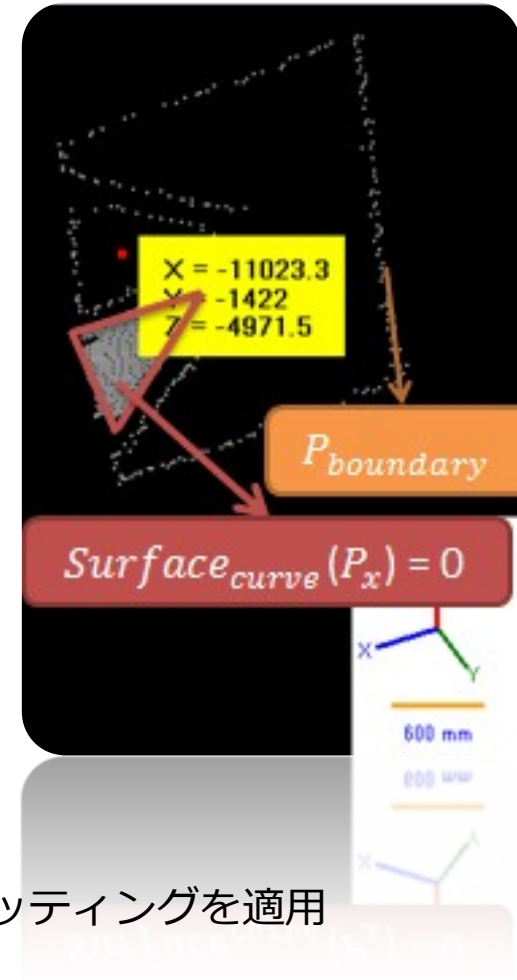
曲面フィッティング

$$\sum_{k=1}^N \left\{ \left[z_k - \sum_{j=4}^0 \left(\sum_{i=j}^0 c_{ij} x_k^i y_k^{j-i} \right) \right] x_k^l y_k^{j-l} \right\} < \theta_{\text{thresh}}$$

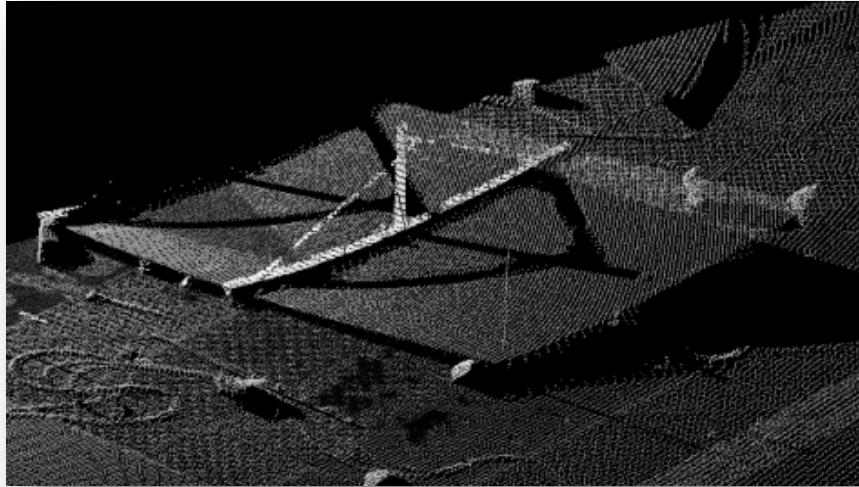


共通領域判定を行う

- 4次方程式により精度の高い四次曲面フィッティングを適用



ケーススタディによる評価



外板概要

1. 木型をあてがってから計測した
2. 点の数は定盤を含め30万を超える
3. 障害物により分割されている領域が比較的が多い

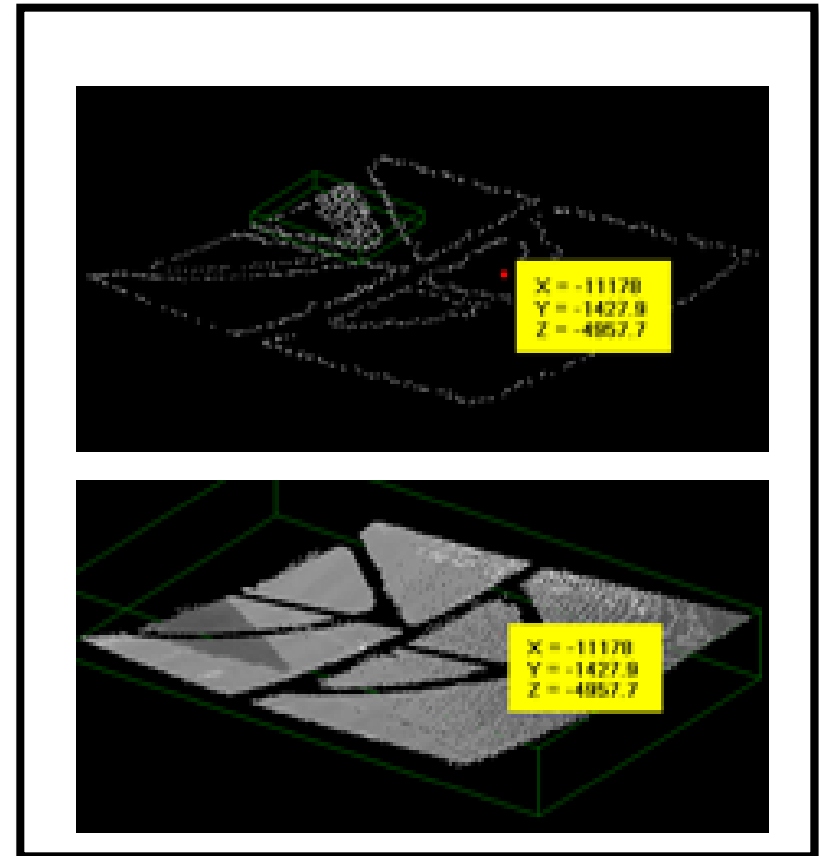
ケーススタディによる評価

- 処理結果

1. 処理時間：64秒
2. 障害物除去：自動

- 分析

- 毎回のエッジ検出の時間として8万点のデータに約10秒かかる。



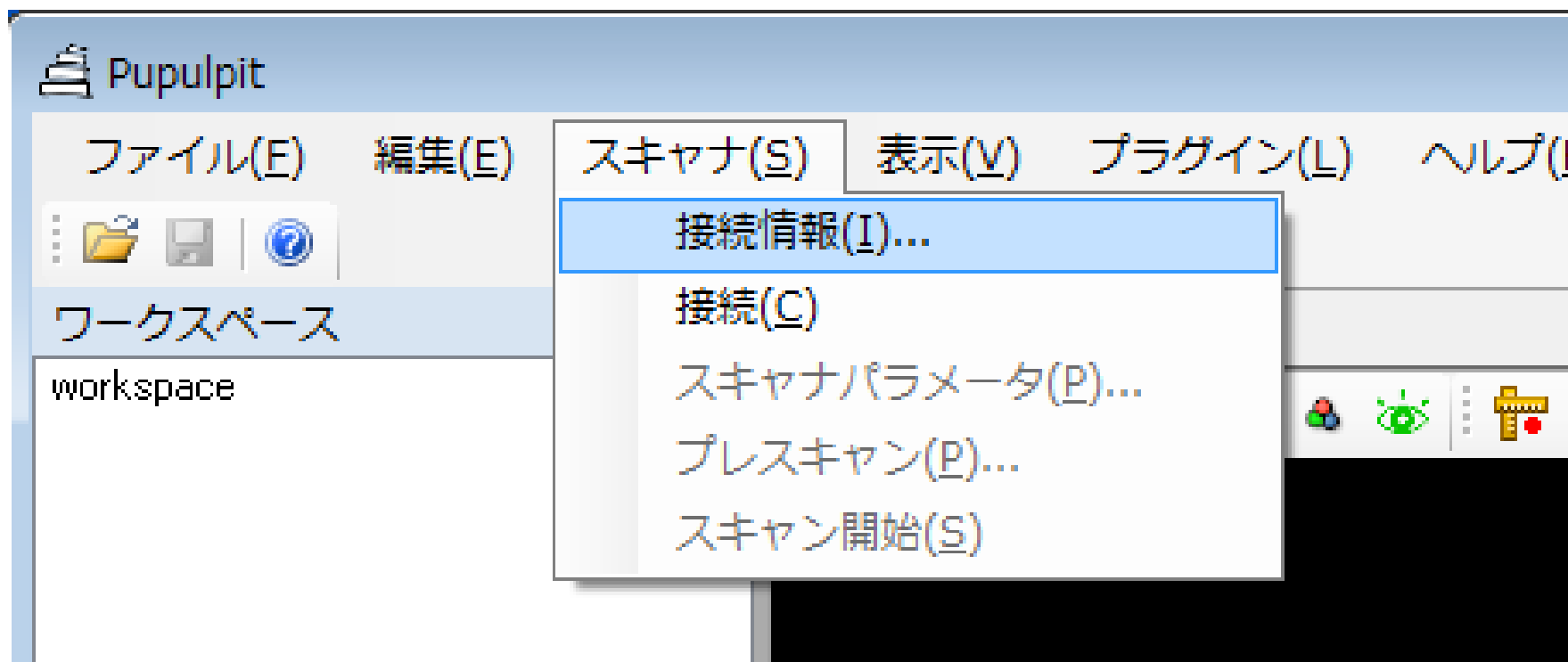
詳細情報

(レーザスキャナの制御機能の開発)

レーザスキャナ制御機能

- FARO社が提供するSDK(ソフトウェア開発キット)を利用して実現
- ププルピットのメニューに組み込んで利用
- 従来は、計測にはFARO Scene、解析にはププルピットという2つのソフトウェアが必要であったが、ププルピットに統合することでの効率化

レーザスキャナ制御機能 メニュー

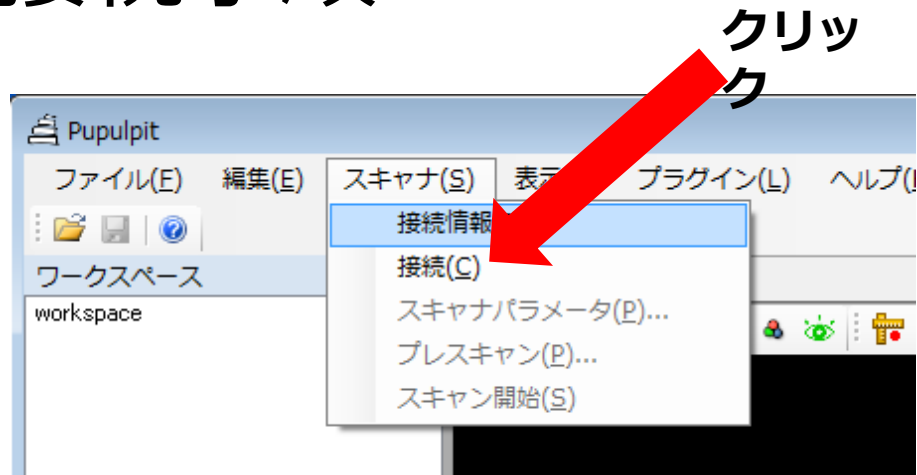


レーザスキャナ制御機能 接続方法

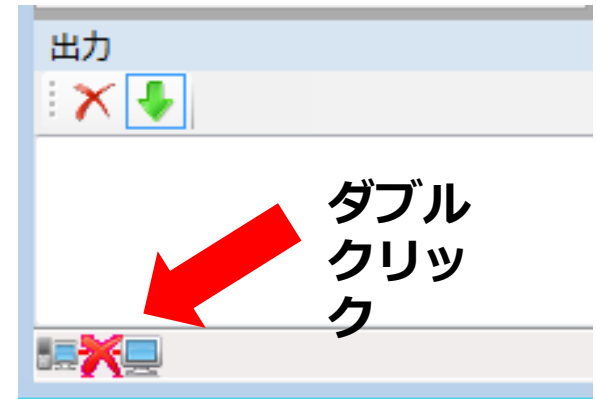
スキャナ指定

IPアドレス:

接続手順



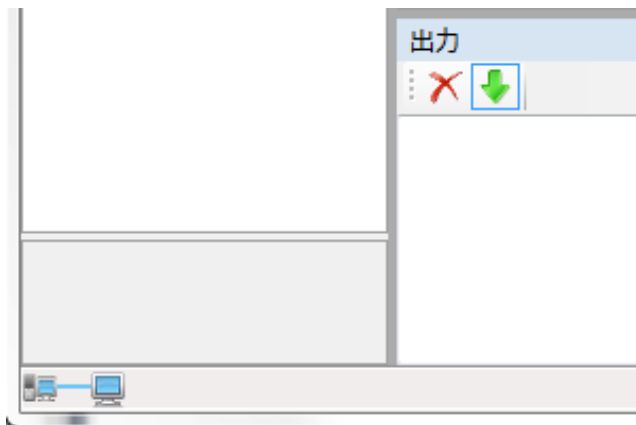
または



メニューの「接続 (C)」を選択

または

ステータスバーのアイコンをダブルクリックでスキャナと接続



接続成功後はアイコンが変化

レーザスキャナパラメータの設定

スキャナパラメータ

スキャン領域 保管

角度領域

垂直 []: 74.7 ~ 13.9

水平 []: 84.3 ~ 225.1

分解能

低 高

1/32

デフォルト設定

OK Cancel

スキャン範囲(水平・垂直角度) と
分解能を設定

スキャナパラメータ

スキャン領域 保管

ファイル基本名: myScanFile

スキャン番号: 120

保存場所: C:\ScanData 参照...

空き容量: 53187.00 [MB]

OK Cancel

ファイル基本名、スキャン番号、
データの保存場所(ローカル)を設定

プレスキャンと計測手順



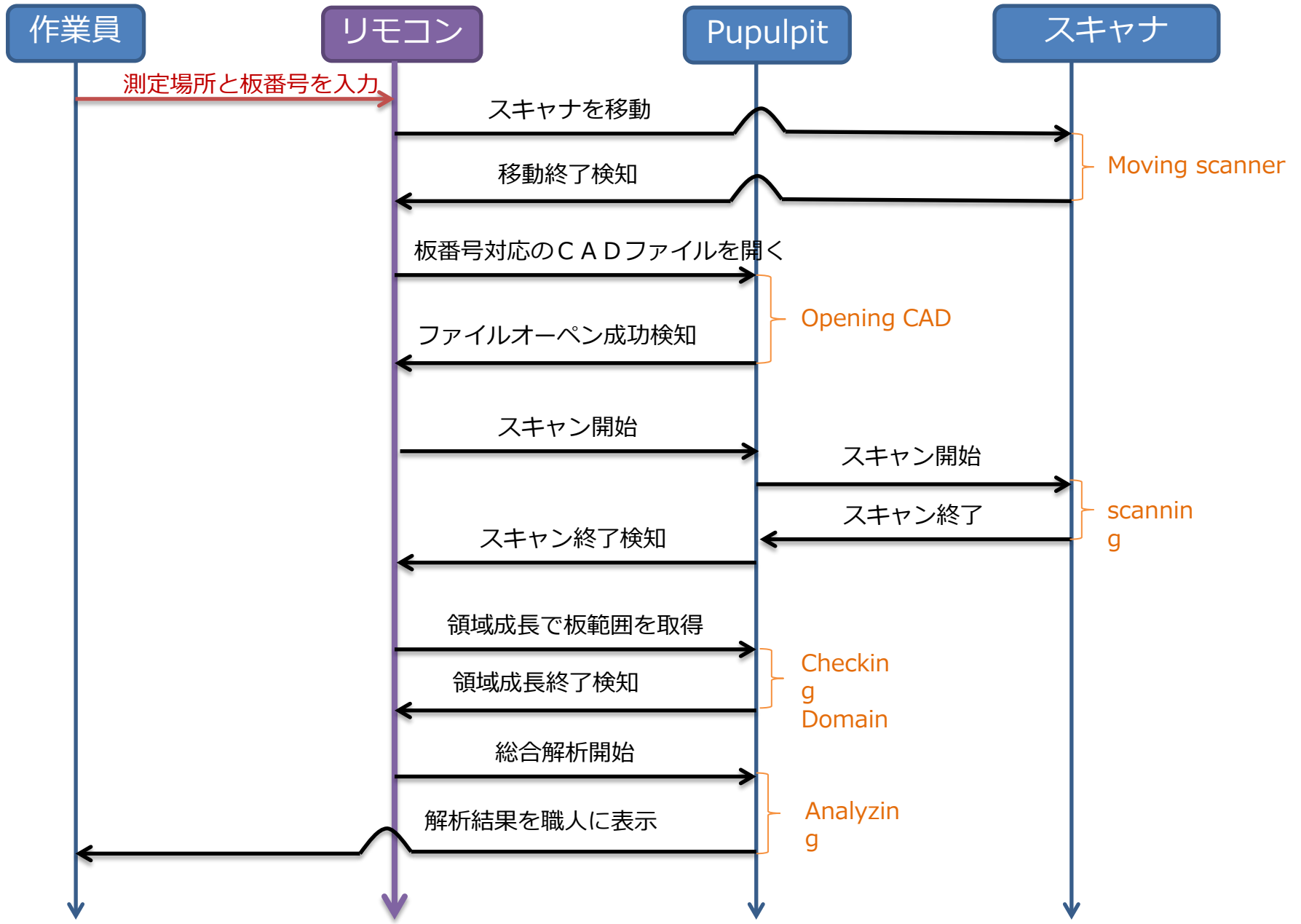
パラメータの変更： 選択範囲を反映した形でスキャナパラメータダイアログを表示

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

詳細情報

(計測から解析までの全自動化)



詳細情報

(計測結果の評価)

報告内容

- ・ レーザスキャナ駆動システムの概要および計測の流れ
- ・ システム導入による社内での効果
- ・ 曲がり形状ごとの計測結果の傾向、加工の進め方の特徴
- ・ 課題1 —現場の作業者に最適な許容値の再設定—
- ・ 課題2 —自動化に向けて

報告内容

- ・ レーザスキャナ駆動システムの概要および計測の流れ
- ・ システム導入による社内での効果
- ・ 曲がり形状ごとの計測結果の傾向、加工の進め方の特徴
- ・ 課題1 —現場の作業者に最適な許容値の再設定—
- ・ 課題2 —自動化に向けて

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



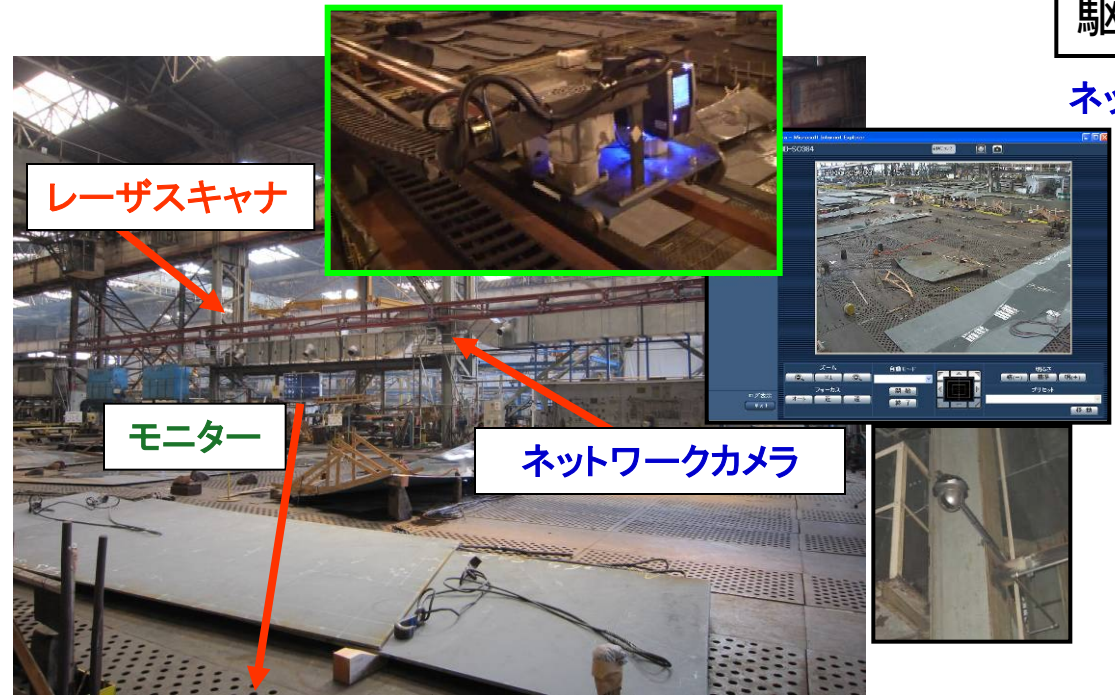
曲がり形状を計測



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



レーザスキャナ

モニター

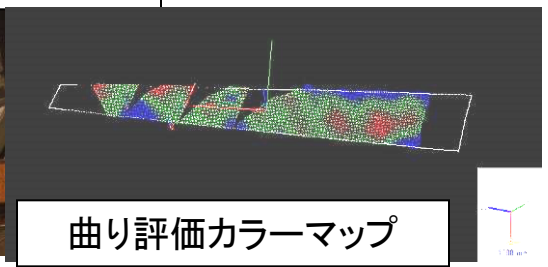
ネットワークカメラ

モニターにPC画面を
表示



ヒストグラムにより目標まであと何mm程度か確認

点群により曲がりの過不足位置を確認



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

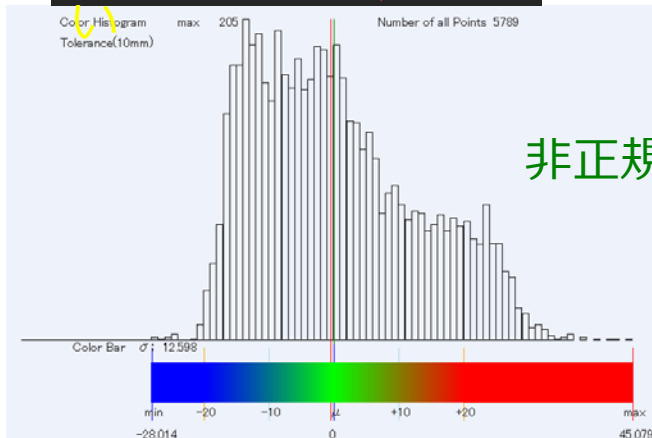
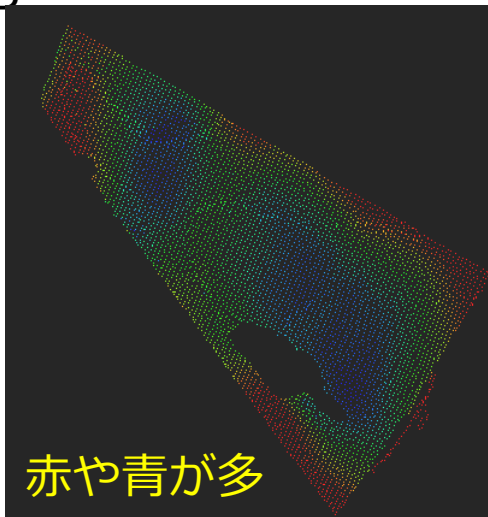
⇒リアルタイム作業指示のためのバックデータ蓄積

報告内容

- ・ レーザスキャナ駆動システムの概要および計測の流れ
- ・ システム導入による社内での効果
- ・ 曲がり形状ごとの計測結果の傾向、加工の進め方の特徴
- ・ 課題1 —現場の作業者に最適な許容値の再設定—
- ・ 課題2 —自動化に向けて

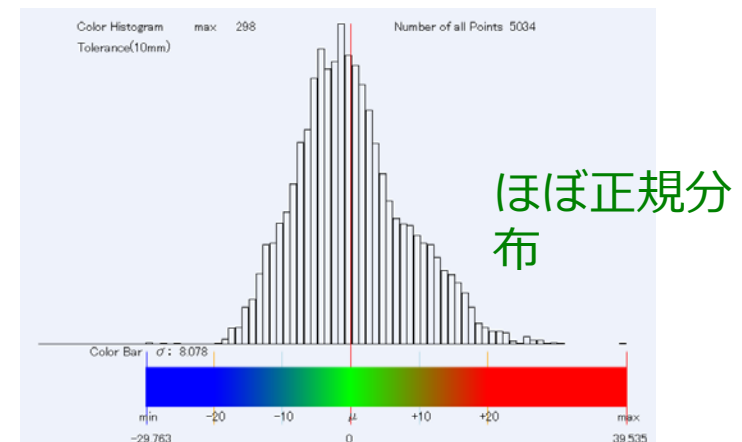
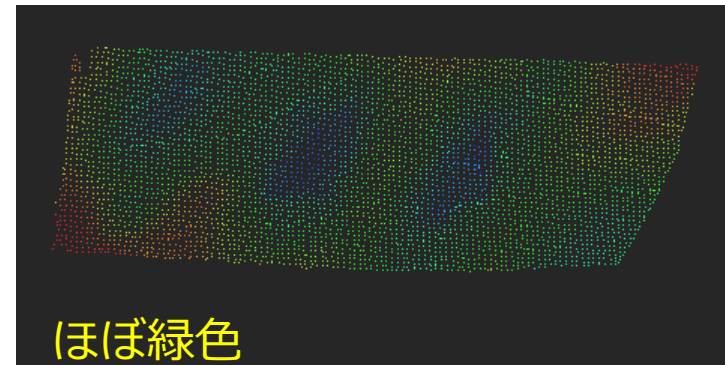
レーザスキャナ適用による効果

導入当初の仕上がり具合 G2 SC2
HA1LP



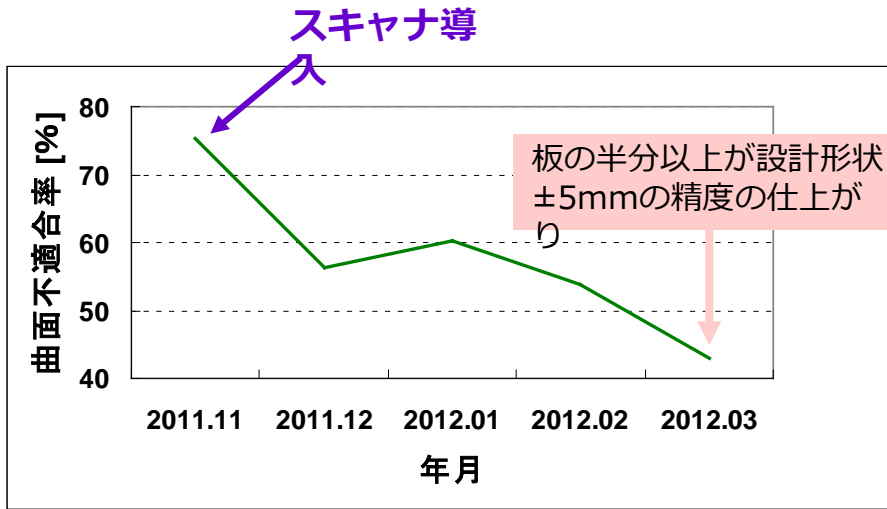
緑色の範囲：設計値 ± 10 mm
以内

現在の仕上がり具合
G3 SB2 G2LAS

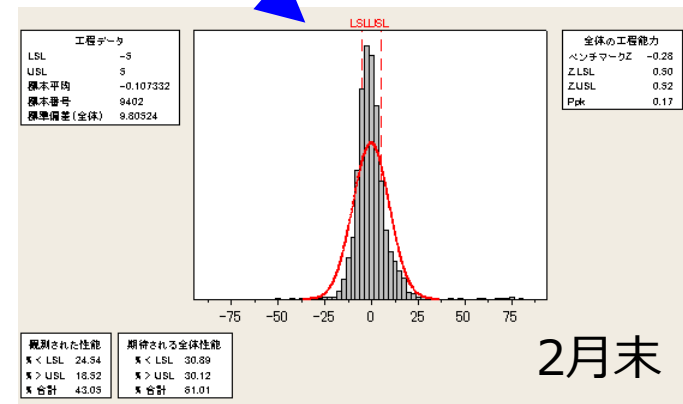
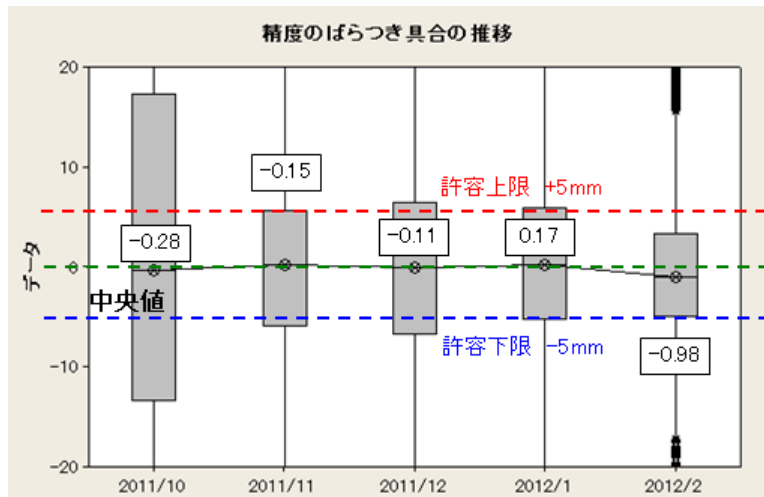
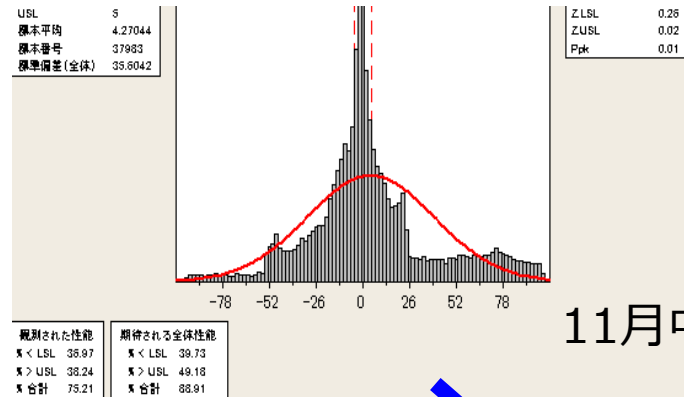


スキャン結果を現場が確認することで、精度の改善効果が得

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：
仕上がり設計値±5mm以内に収まらない範囲の割合



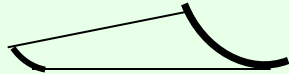
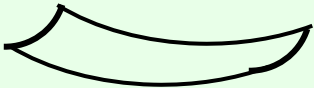
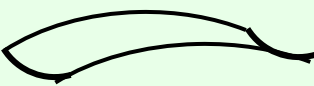

大炉仕上がり形状が大幅に改善した

報告内容

- レーザスキャナ駆動システムの概要および計測の流れ
- システム導入による社内での効果
- 曲がり形状ごとの計測結果の傾向、加工の進め方の特徴
- 課題1 —現場の作業者に最適な許容値の再設定—
- 課題2 —自動化に向けて

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
ラッパ型	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	

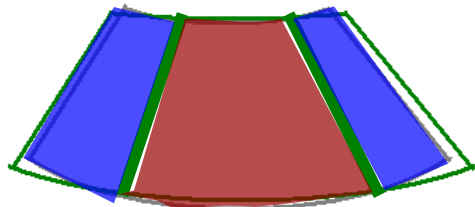
板ごとに焼き方・仕上がりの傾向を捉え、標準化を進めていく。

ラッパ型の場合

#75 SB1
F1FP



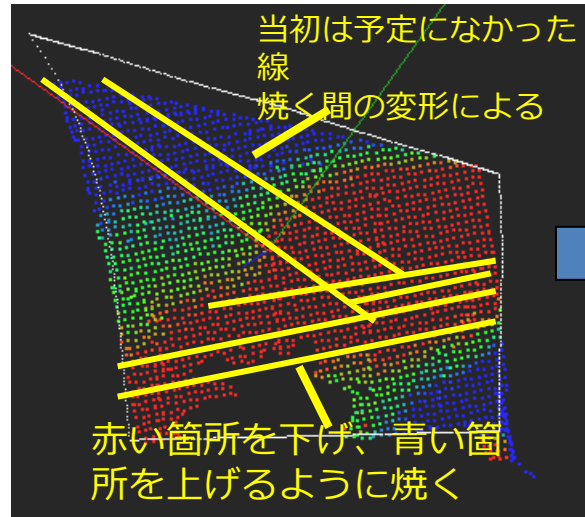
焼きやすいよう、少し曲がりを含めにプレス



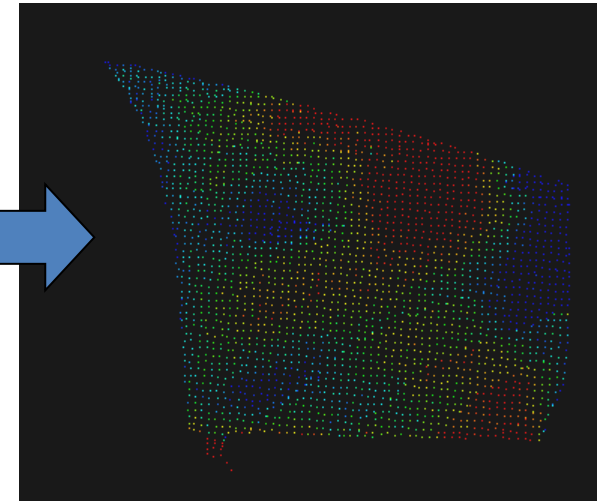
— 設計値 — 計測値



プレス後



焼き曲げ後

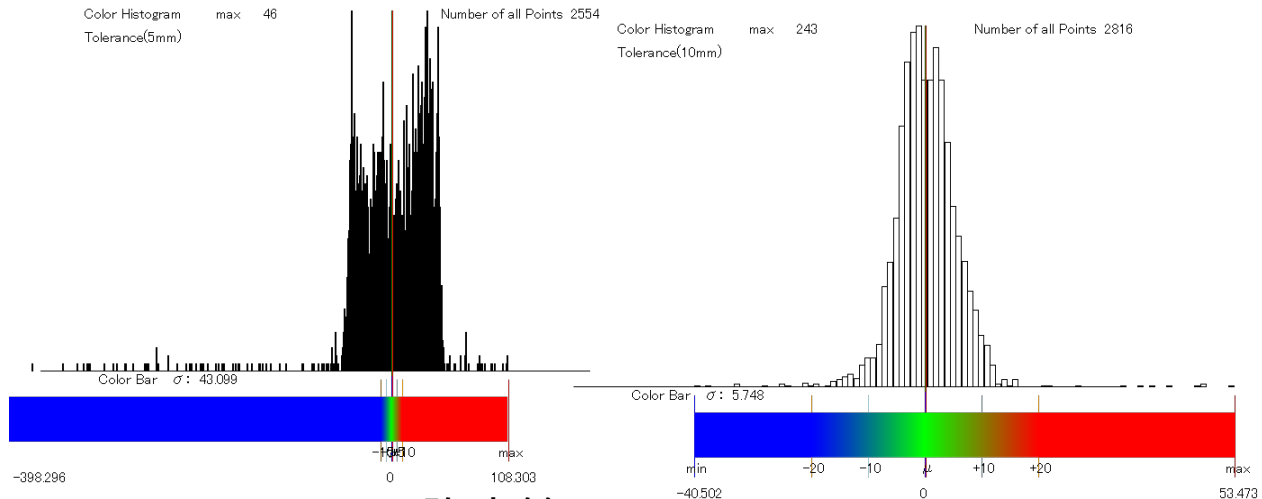


Color Histogram max: 46
Tolerance(5mm)

Number of all Points 2554

Color Histogram max: 243
Tolerance(10mm)

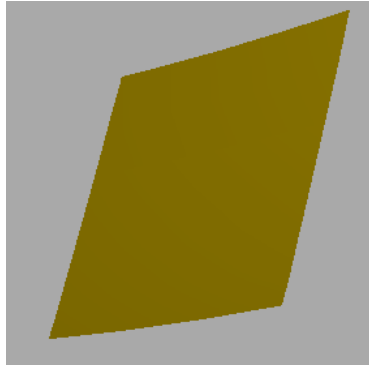
Number of all Points 2816



許容範囲：

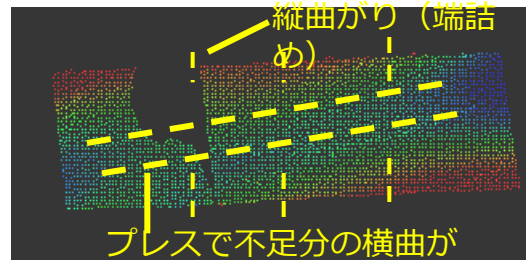
椀型の場合

75 SL3 J3PA

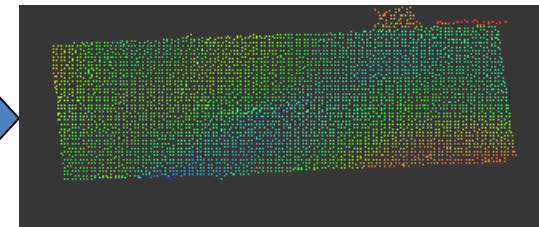


プレス後

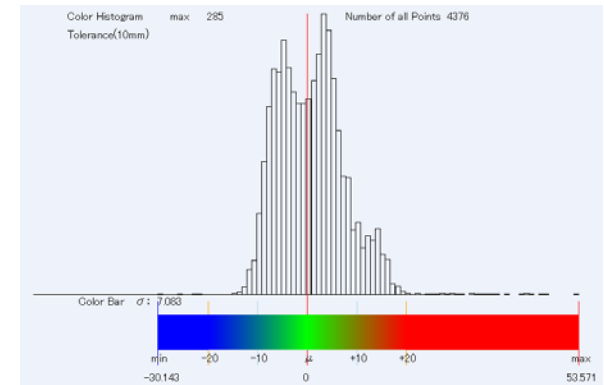
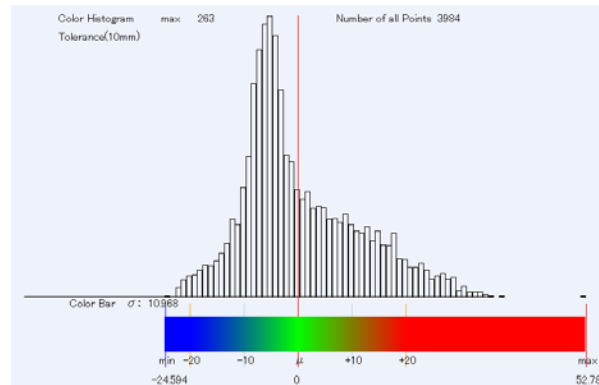
実際は大きな縦曲がりを持つ椀型の板はないため、左下のモデルと若干異なる



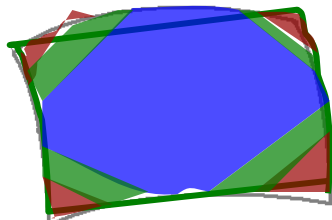
焼き曲げ後



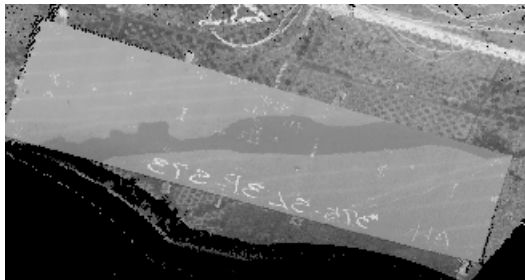
※不具合修正のため裏返した際のデータ。点線は裏側を焼くという意味



横曲がりほぼプレス、縦曲がり焼きのみ



設計値 計測値



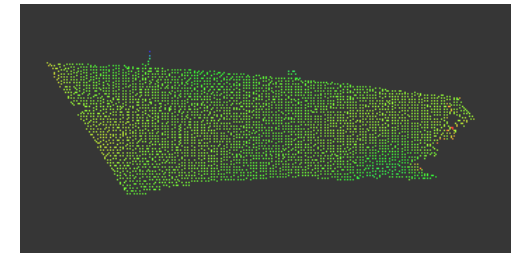
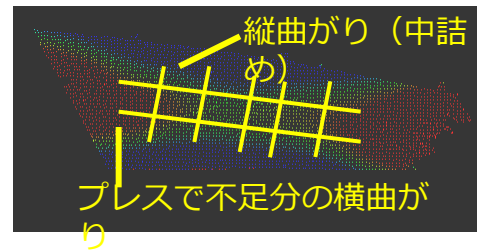
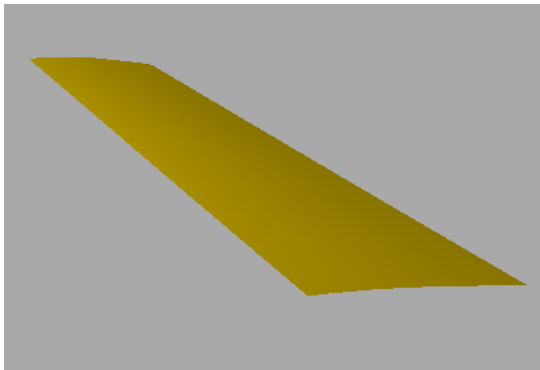
許容範囲 :

鞍型の場合

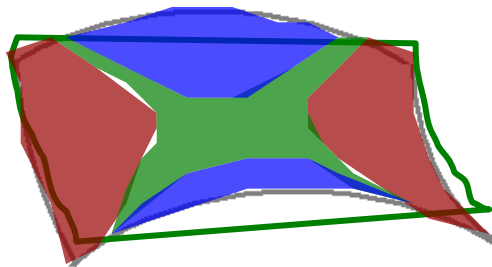
#66 SB2 G2UAP

プレス後

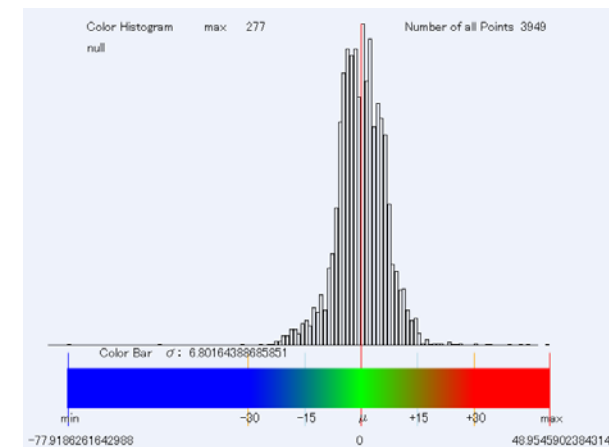
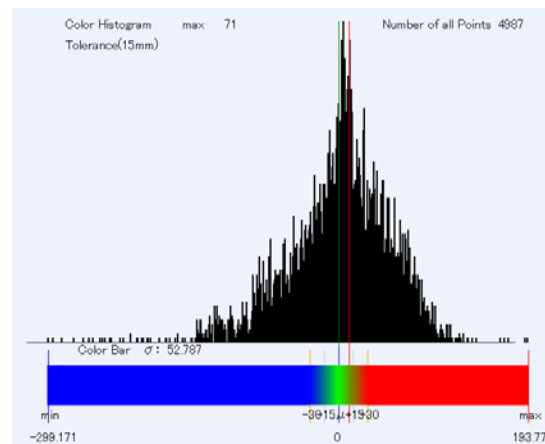
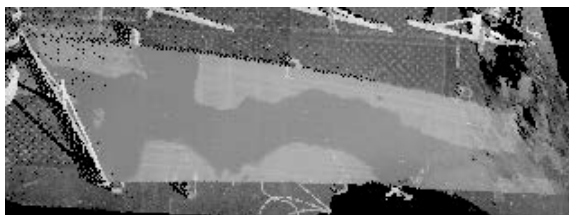
焼き曲げ後



横曲がりほぼプレス、縦曲がり焼きのみ

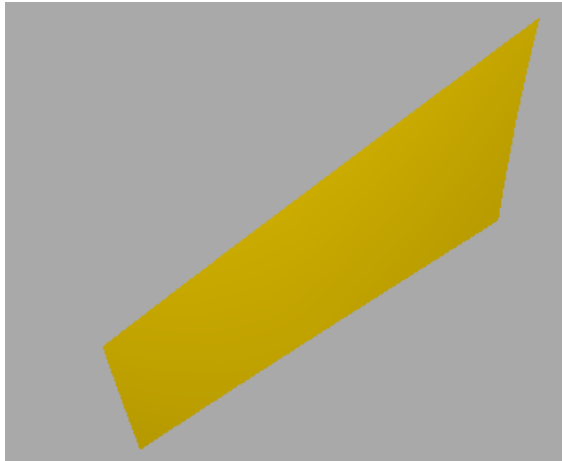


— 設計値 — 計測値



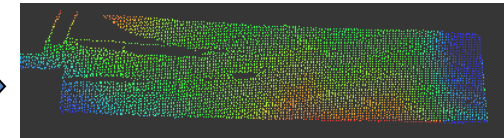
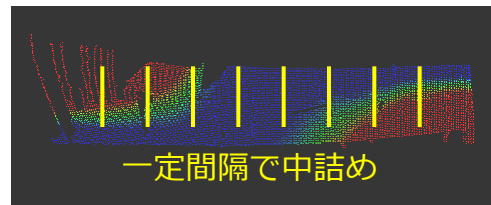
許容範囲：

捻れ型の場合

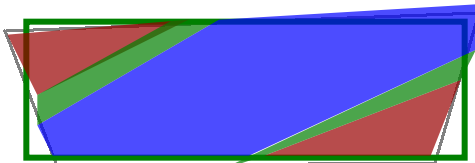


プレス後

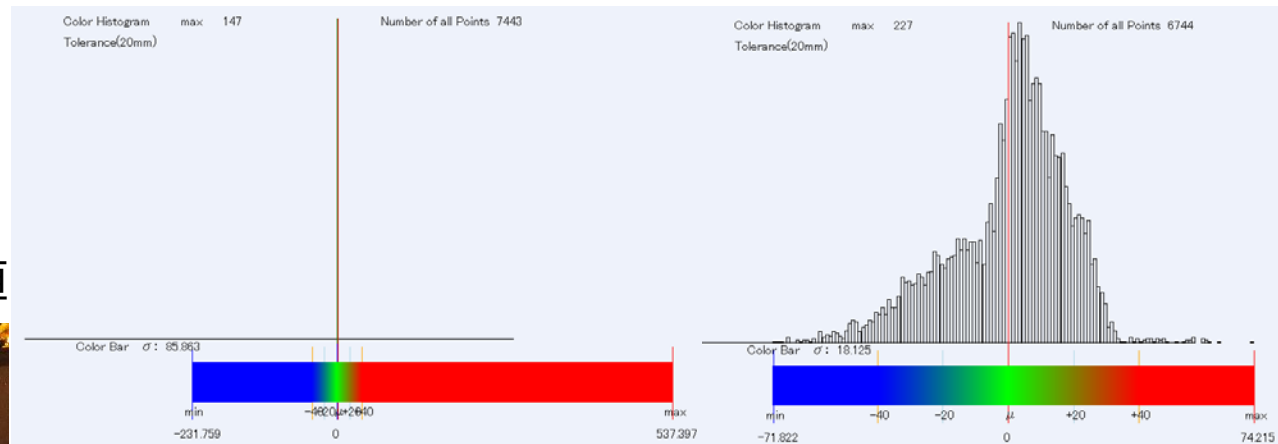
焼き曲げ後



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

許容範囲：

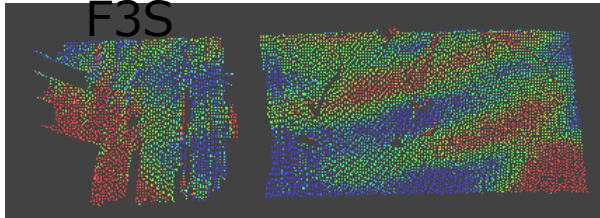
報告内容

- ・ レーザスキャナ駆動システムの概要および計測の流れ
- ・ システム導入による社内での効果
- ・ 曲がり形状ごとの計測結果の傾向、加工の進め方の特徴
- ・ **課題1** —現場の作業者に最適な許容値の再設定—
- ・ **課題2** —自動化に向けて

現場への反映時の課題

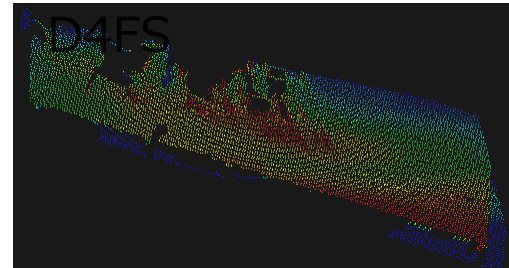
#75 SB3

F3S



#75 S4L

D4FS



Color Histogram max 959
Tolerance(10mm) Number of all Points 10272

Color Histogram max 340
Tolerance(15mm) Number of all Points 7728

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性あり

広範囲が許容
±10mm(り
(緑の範囲になる
)

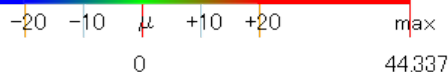
→直す箇所が明白

(赤や青が多い)

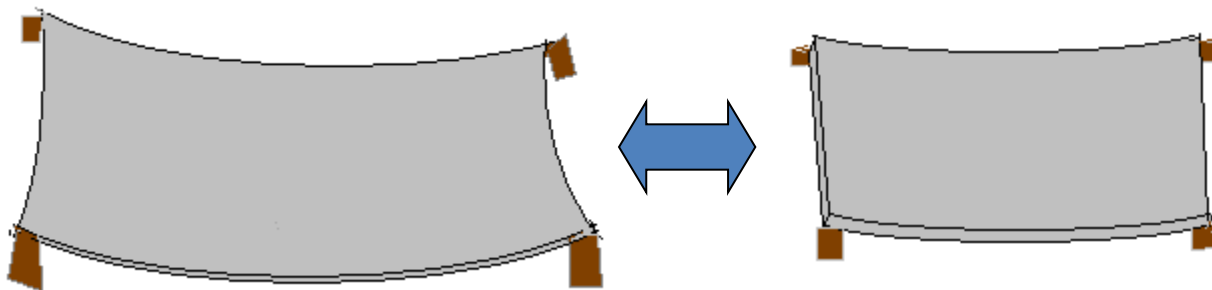
→直す箇所が不明

Color Bar σ : 5.409

Color Bar σ : 20.022



基準の決定



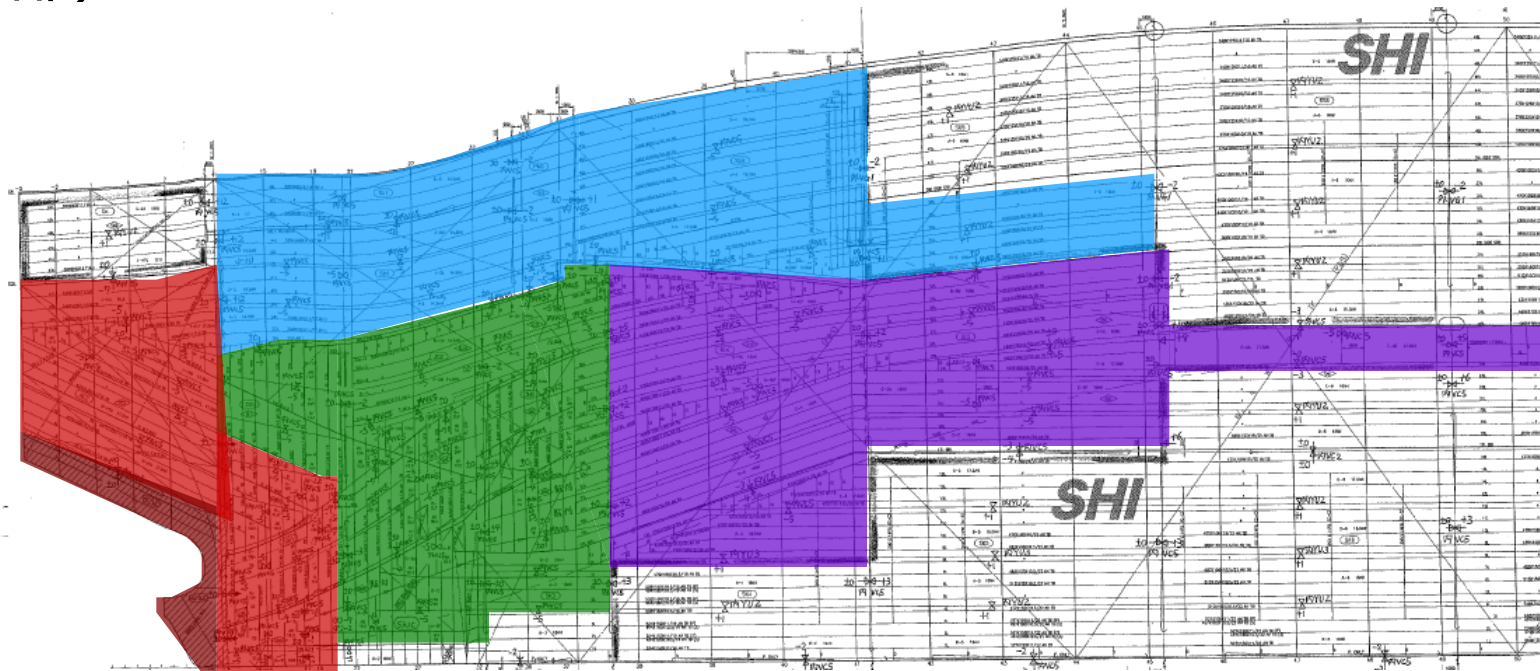
自重たわみの観点から
許容値（設計値±何
mmまで緑色とする
か）
を決定






船尾舵周辺、
ラダーホーン

板幅\板厚	~15mm	15~20mm	20~25mm	35mm~
~1000mm	なし	10mm	10mm	5mm
1000~ 3000mm	20mm	15mm 曲がり小:20mm	10mm	5mm
3000mm~	30mm	30mm	なし	なし

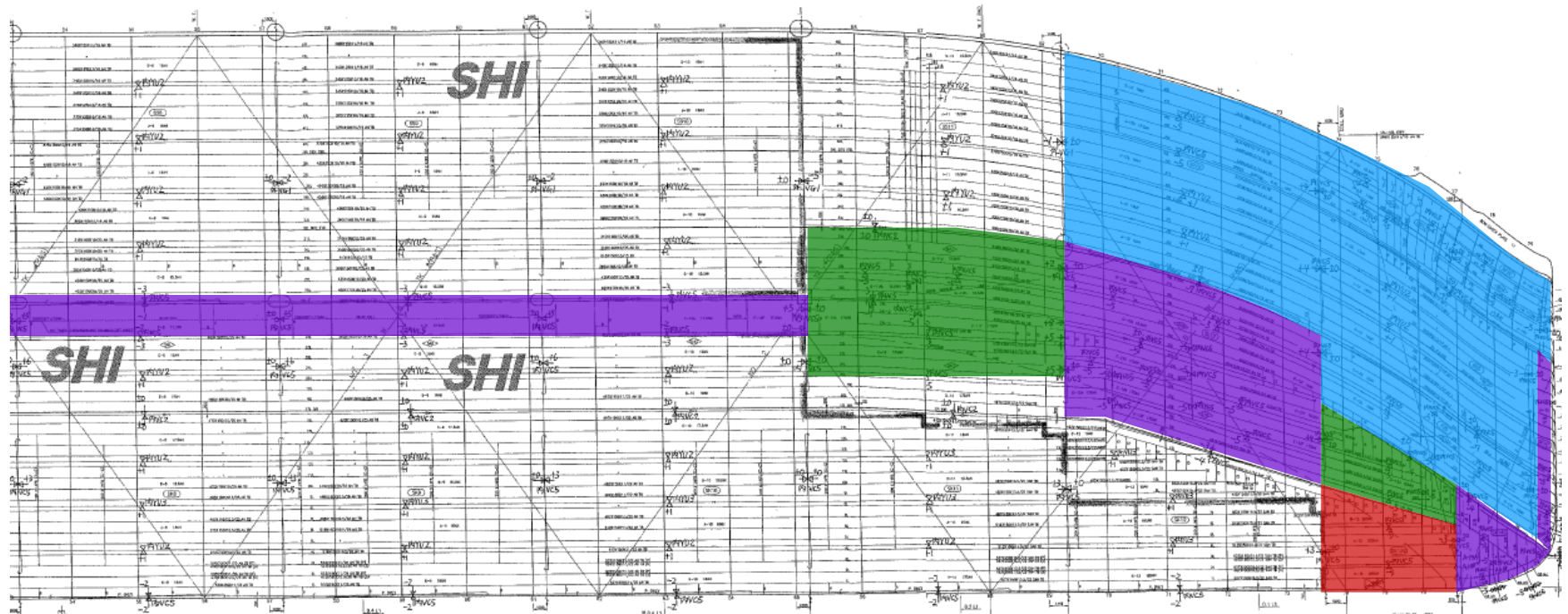
側外板

新型船における焼き曲げの設計値との差異の許容値（船尾部）



	±5mm		±15m		±30m
			m		m
	±10m		±20m		
	m		m		

新型船における焼き曲げの設計値との差異の許容値（船首部）



±5mm



±15m
m



±30m
m



±10m
m



±20m
m

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
自重たわみが小さくても、20mm以上の許容値となる板
- 存在
- 点群表示の限界が

→木型を廃止して、完全に計測システムを使用して仕上げる
には
バーチャル木型の導入などが必要

- ・ 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？

報告内容

- ・ レーザスキャナ駆動システムの概要および計測の流れ
- ・ システム導入による社内での効果
- ・ 曲がり形状ごとの計測結果の傾向、加工の進め方の特徴
- ・ 課題1 —現場の作業者に最適な許容値の再設定—
- ・ 課題2 —自動化に向けて

現在の作業内容

- ・レーザスキャナの駆動装置をPCで操作できるように・・・3/19週実施
- ・装置の制御、計測、データの現場への反映を一括して行うPCの導入・・・済
- ・新型船の設計データ作成、計測・・・実施中

今後の作業内容

- ・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
- ・曲面不適合率（合格率）の表示
- ・バーチャル木型の導入
 - ※現在の木型に代わる役割。捻れ、曲がりとも合わせるのに必要
- ・プレス後形状の設計データ化
 - ※プレス後形状もコントロールすることで、毎回同じ加工で済む→大幅な時間短縮

将来像（次年度上期まで）

カテゴリ	項目	担当	2012 3月	2012 4月	2012 5月	2012 6月	2012 7月	2012 8月	2012 9月
プレス工程革新	プレス形状 スキャン測定	SHI-ME	G3測定試行		固定設備化インフラ設計				設置 ★
	プレス形状評価用データ作成	東京大学(ノウハウ) →SHI-ME (作成、デバッグ)	設計データ Surface化		評価・分析		評価結果が不適切な場合は SHI-MEでデバッグ、再評価		
大炉工程革新	スキャンデータと 加熱データ相関分析	SHI-ME	新型船でのデータ収 集						
	レーザースキャン評価 自動化PGM開発	東京大学 (NK)	PGM設計		新型船3隻での相関分析・加工パターン抽出		現場実験		
	レーザースキャン評価 バーチャル木型モデル開 発	東京大学 (NK)	★ 共同研究 完了報告	木型モデル作成・照合アルゴリズム考 案					
	設計照合データ フレームラインデータ追加	SHI-ME	G3フレームラ インデータ作成		データ送付				

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 PROJECT