

船舶曲がり外板の精度計測による技能の可視化システム

- 稗方和夫 (東大)
- 大和裕幸 (東大)
- 榎本昌一 (東大)
- 笈田佳彰 (東大)
- 古川慈之 (産総研)

目次

- 背景
- 目的
- 提案システム
- 検証実験
- ケーススタディ
- 結論

背景 ~ 曲がり外板とは ~

- 曲がり外板は船首や船尾に多くみられる。
- 船や位置によって**任意の形状**を持ち、大きく厚い。
- 船一隻に対して左右舷の2枚しか同じ形状の外板は存在しない。

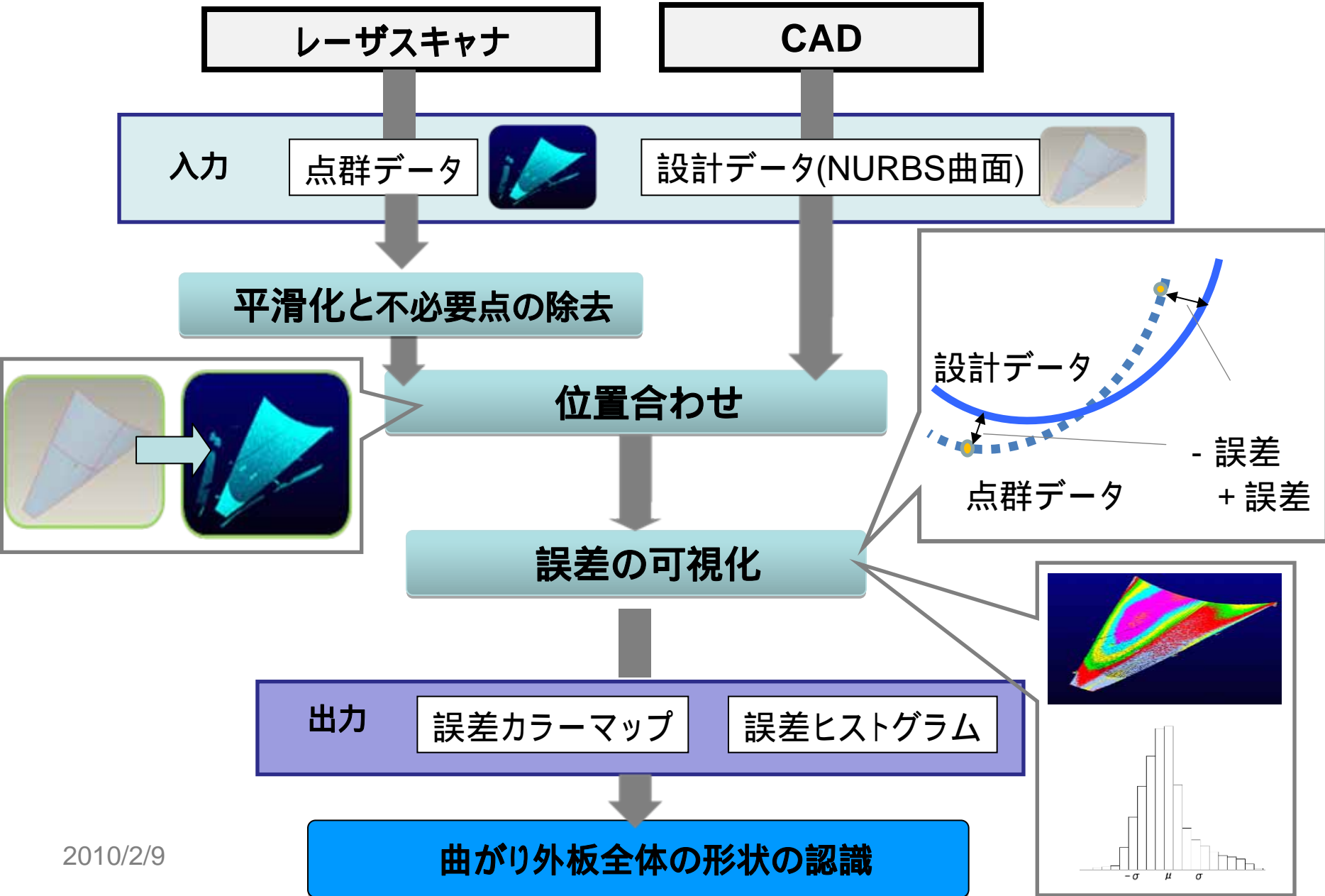


目的

- **曲がり外板表面全体の誤差を可視化するシステムの構築と検証**
- **実際の曲がり外板の工作上的特性の分析**
 - 木型では評価できない部分の形状を評価
 - 作業履歴と完成形状の関係の評価

提案システム

提案システム概要



曲がり外板A



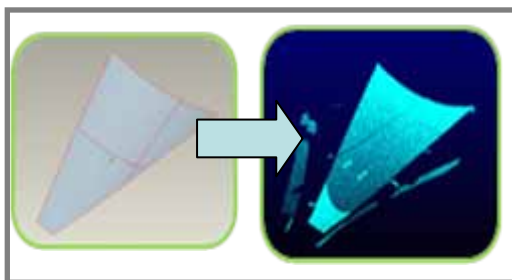
提案システム概要

レーザスキャナ

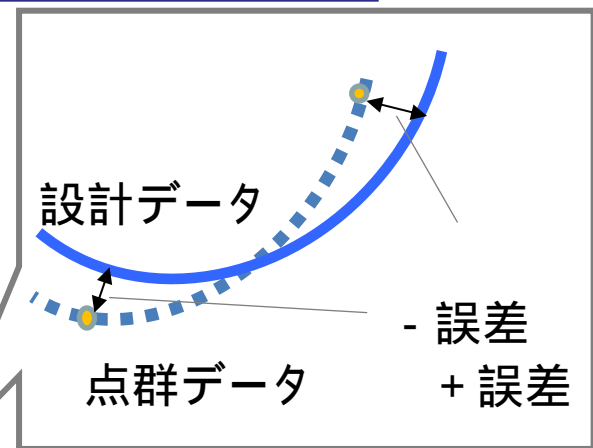
CAD



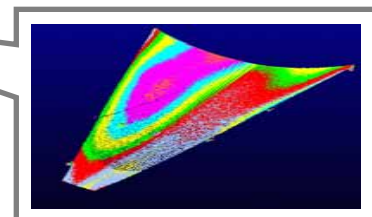
平滑化と不必要点の除去



位置合わせ



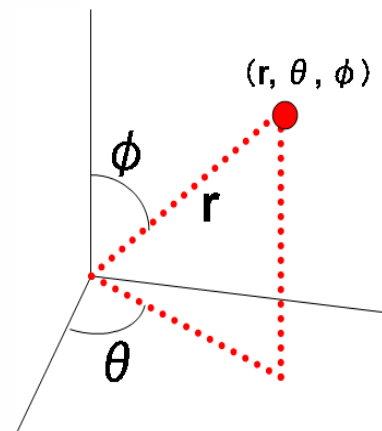
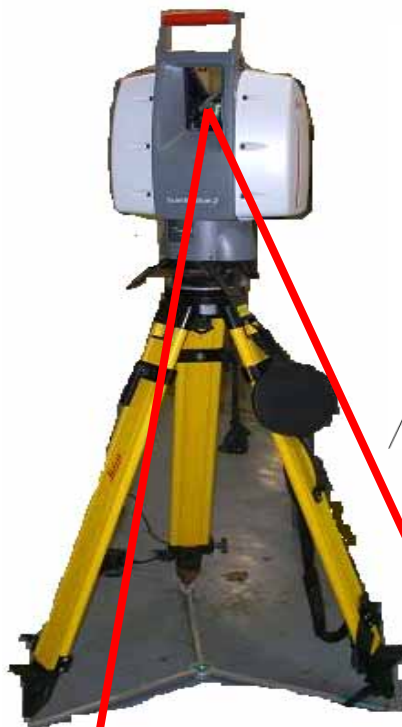
誤差の可視化



曲がり外板全体の形状の認識

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



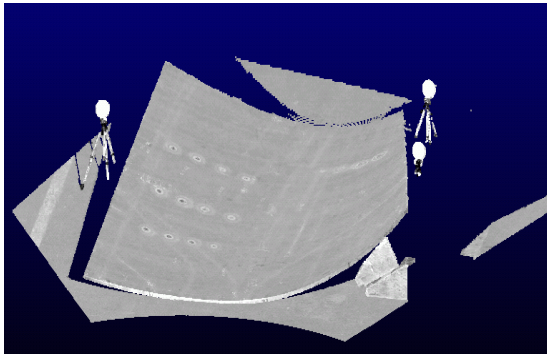
曲がり外板Aの計測

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



点群データ

- 基本的な点群のデータ構造

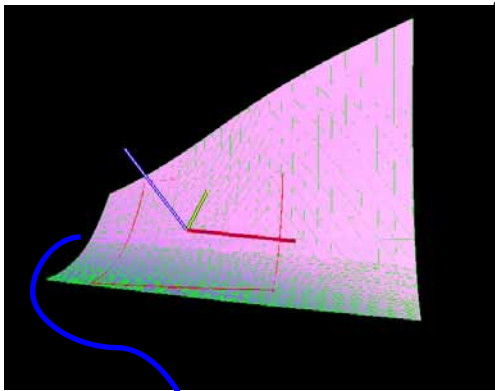


X	Y	Z	A	R	G	B
14083.3571765117	-2322.84877695493	849.63759043349	50	15	239	0
14084.1185559813	-2325.08497331368	852.03773862377	50	0	253	1
14085.3354202633	-2321.26865931808	847.27669727621	50	9	245	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮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

- 位置座標(XYZ) 反射強度(A) 輝度(RGB)
- Text形式

設計データ

• SATファイルのデータ構造



```
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
```

} ノットベクトル

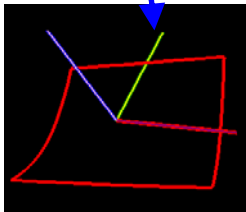
```
8.5580000220301304 -0.92409787947322908 0.750000036917360902 1
8.5580000220301304 -0.9808766428846194 0.88479110307986031 1
8.5580000220301304 -1.0691391369363783 1.1643095080388095 1
8.5580000220301304 -1.1520157021548232 1.5953959814328116 1
```

⋮

⋮

⋮

} 制御点



トリムカーブ

- 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

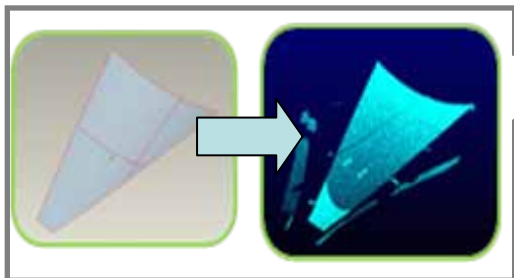
提案システム概要

レーザスキャナ

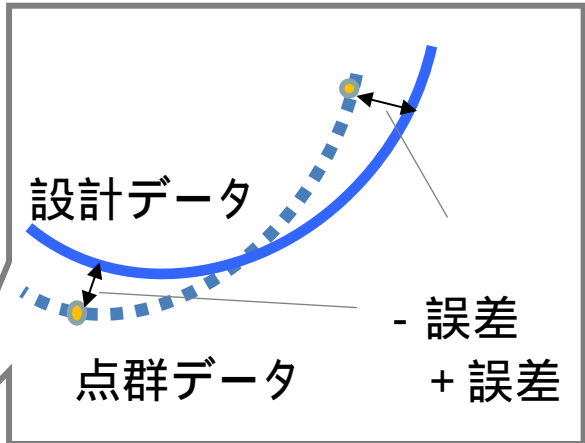
CAD



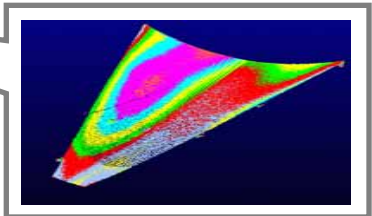
平滑化と不必要点の除去



位置合わせ



誤差の可視化



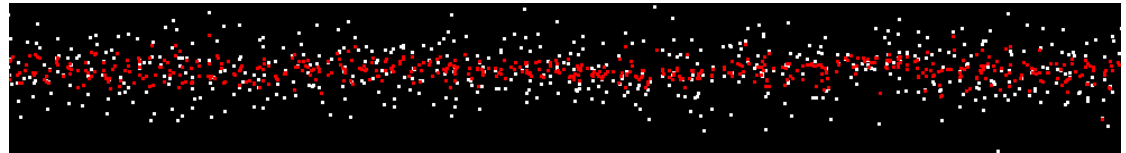
曲がり外板全体の形状の認識

平滑化と不必要点の除去

- 平滑化

- 基本的な移動最小二乗法(Basic Moving Least Square)

- 局所的な点群に対して、3次曲面を当てはめ、投影することで、点群に含まれるノイズを抑える。



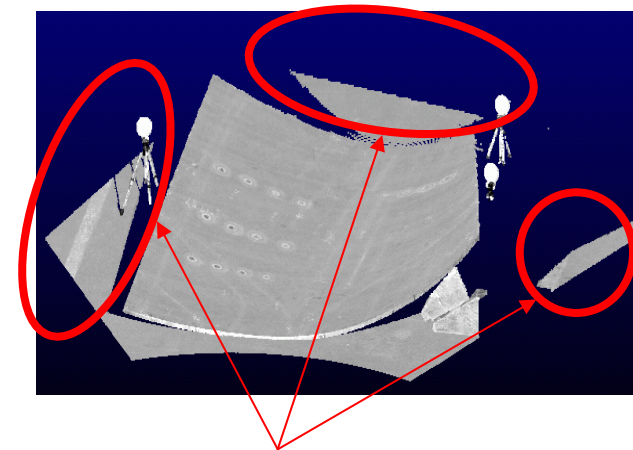
- 外れ値の除去

- Plane Criteria

- 局所的に平面フィッティングを行い、近傍点に比べ平面から遠いものを除去する。

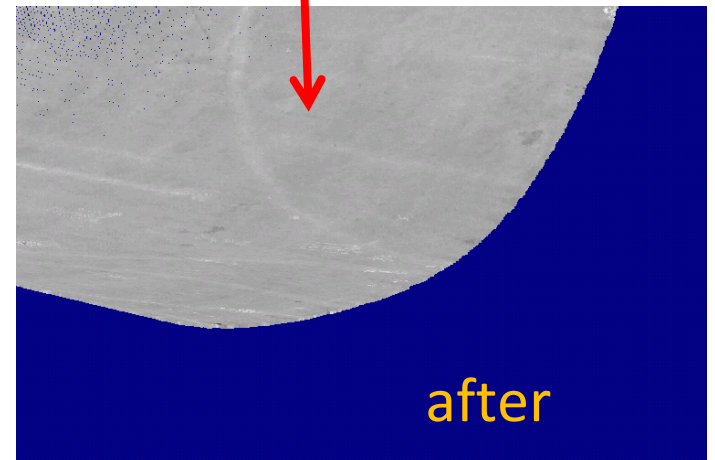
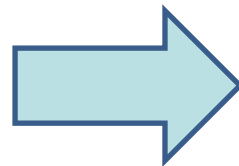
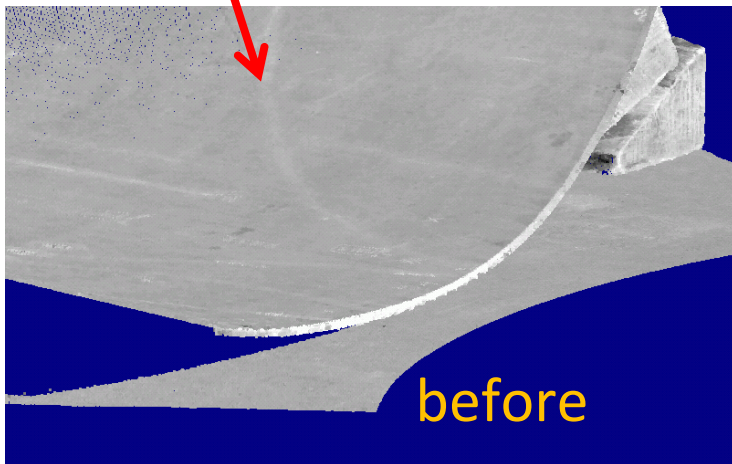
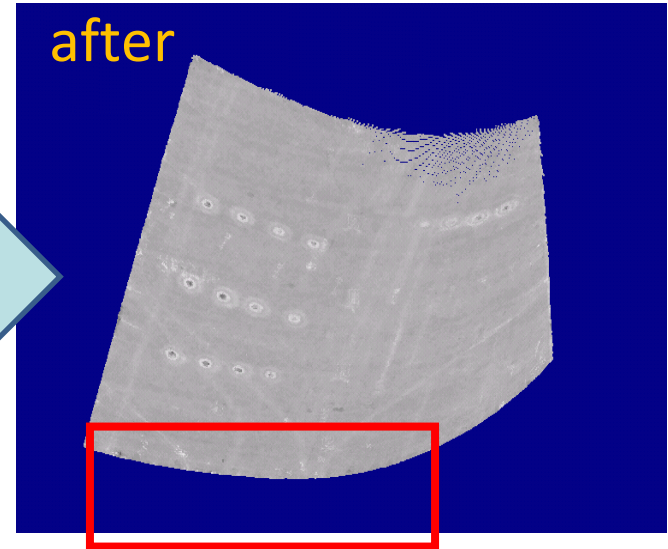
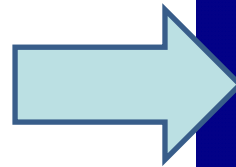
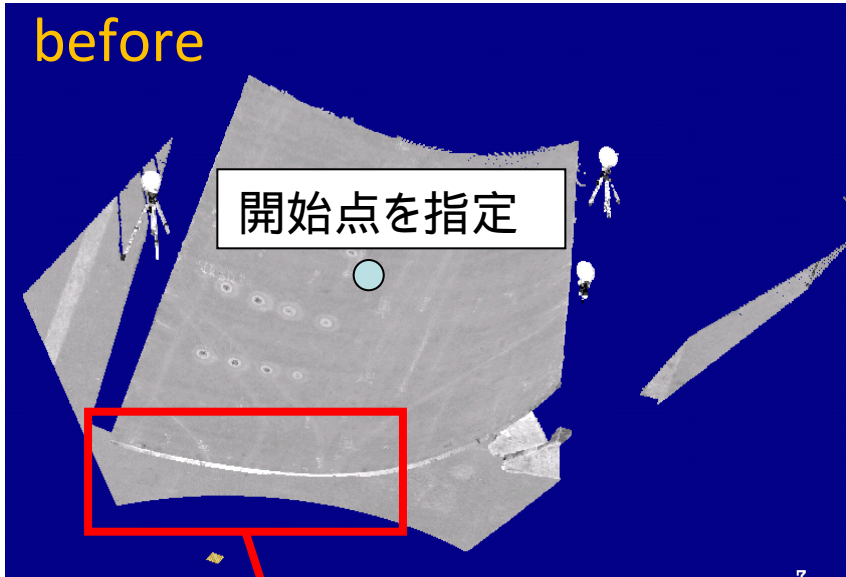
- 領域成長法(Region Growing Method)を用いて、外板である部分を抽出。

- 開始点の指定はインタラクティブな操作
- 近傍点を抽出し(K-NN)、法線ベクトルを比較することで、外板である部分を広げていく方法
- メッシュフリーで動くように実装

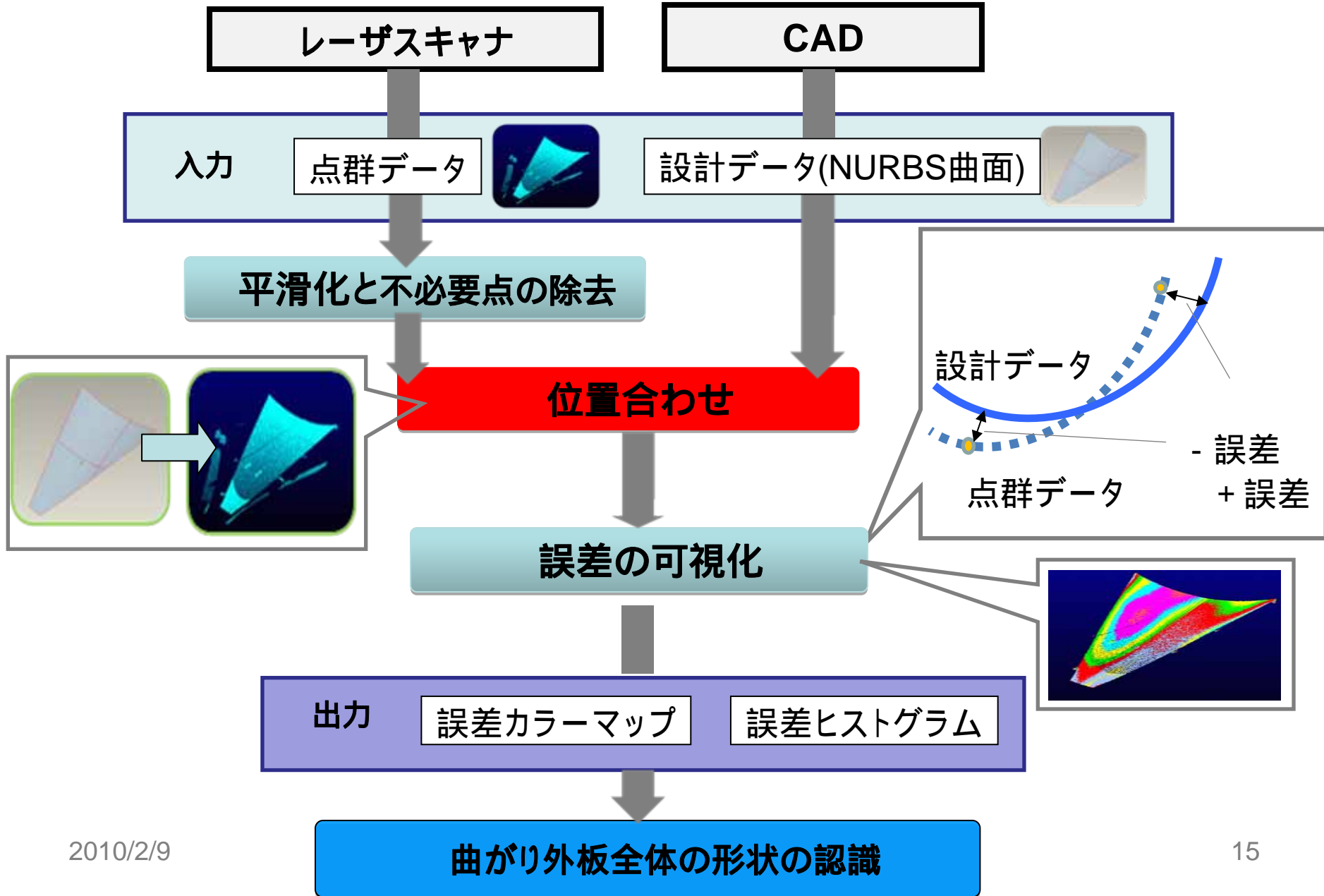


床などの不必要な点群

不必要点の除去

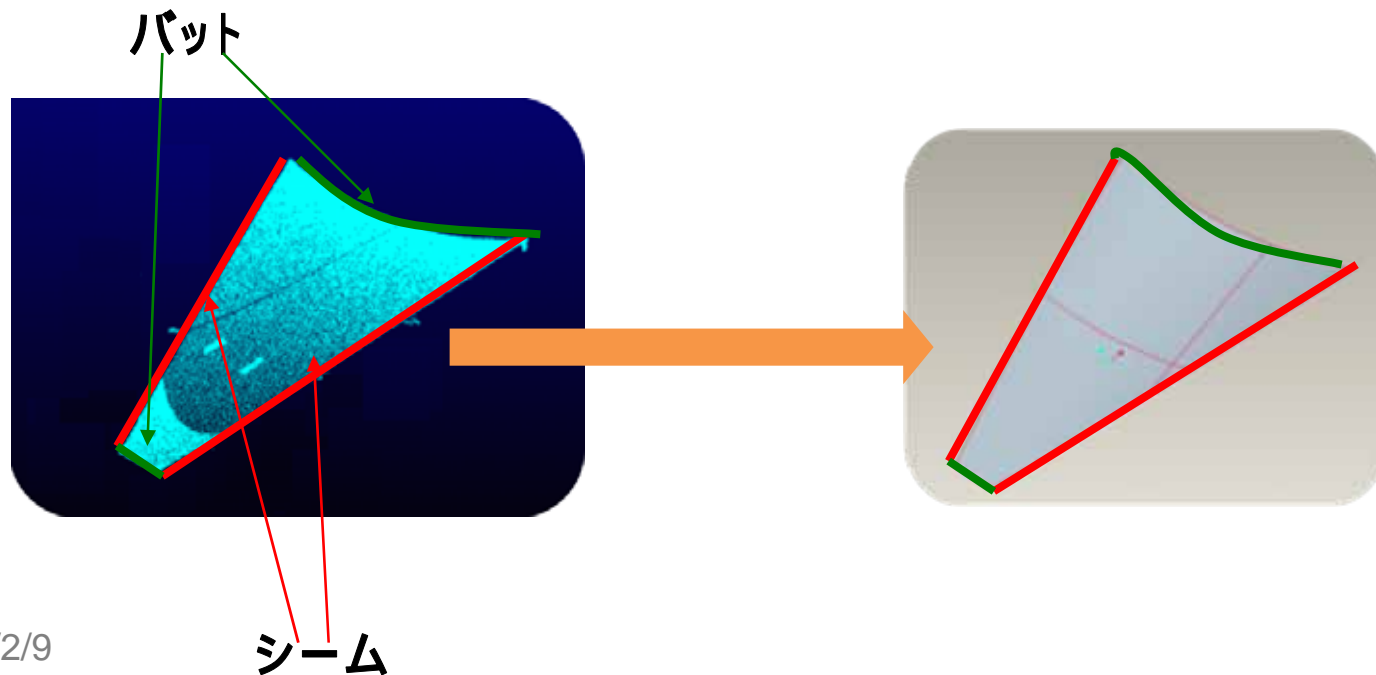


提案システム概要

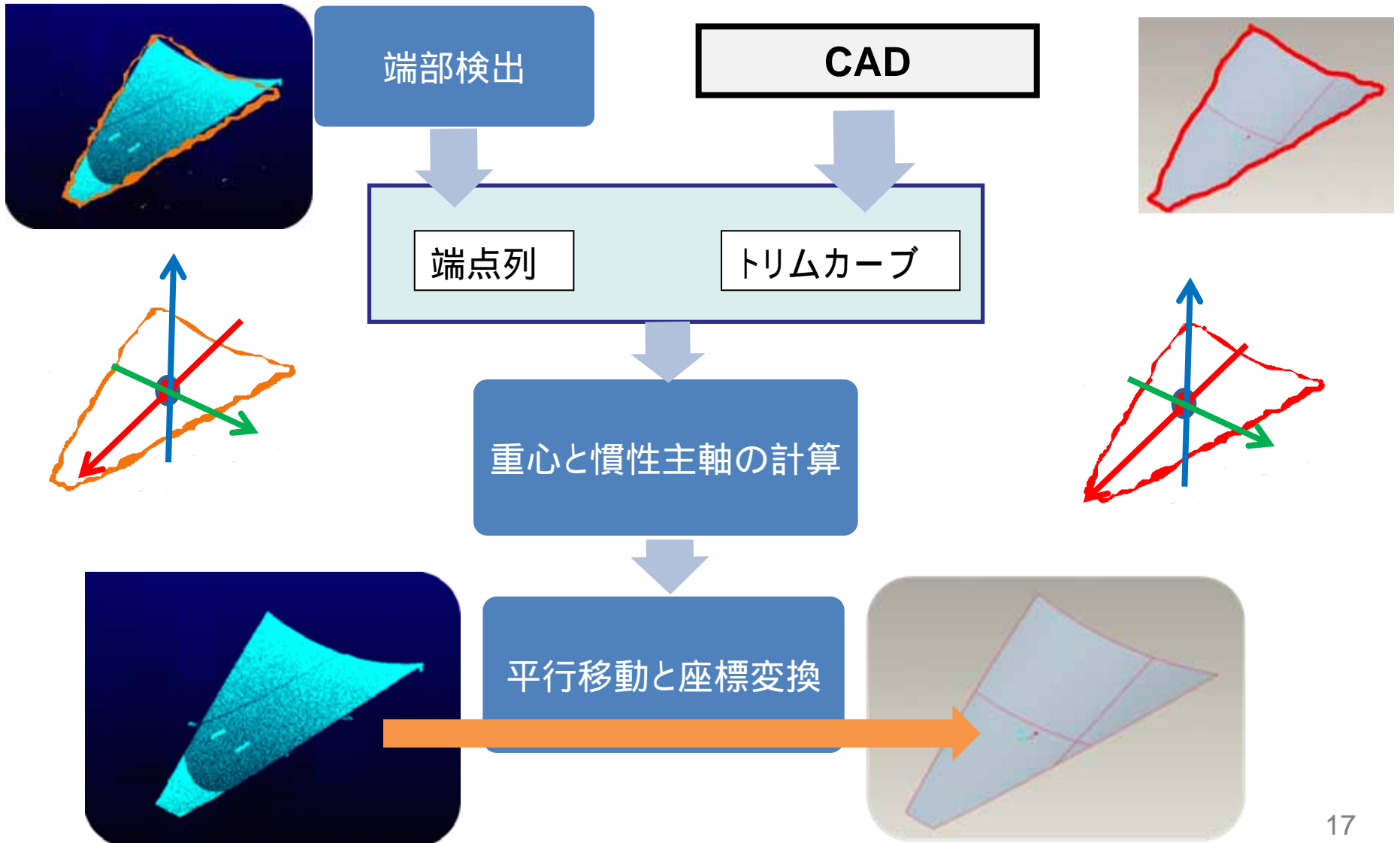


位置合わせ

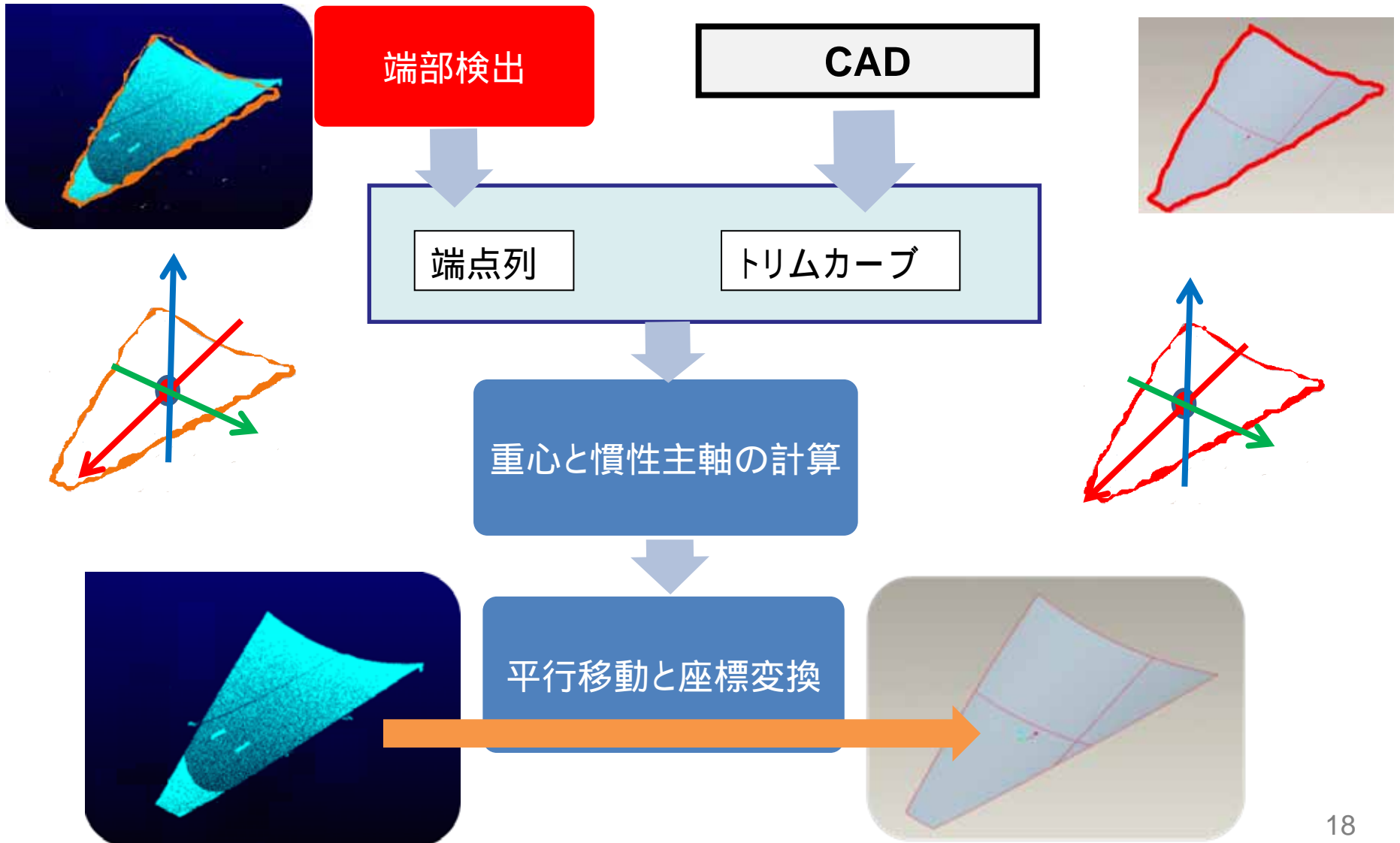
- 端部(シーム、バット)を基準とする。



端部を基準とした位置合わせ



端部を基準とした位置合わせ



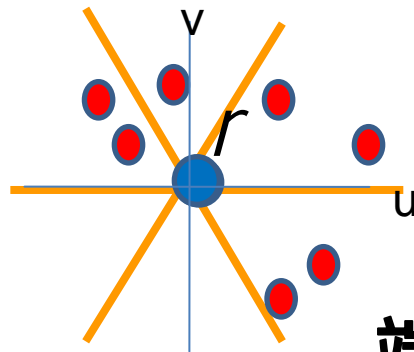
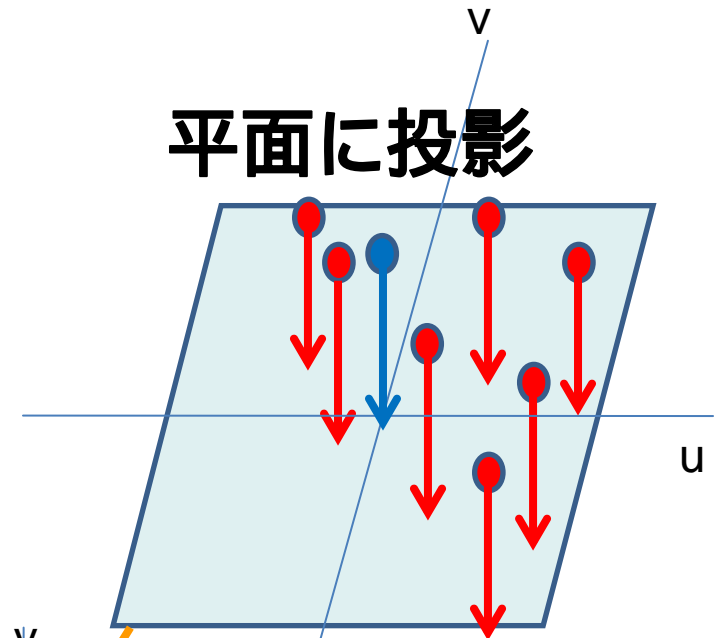
端部検出アルゴリズム

- 端部検出

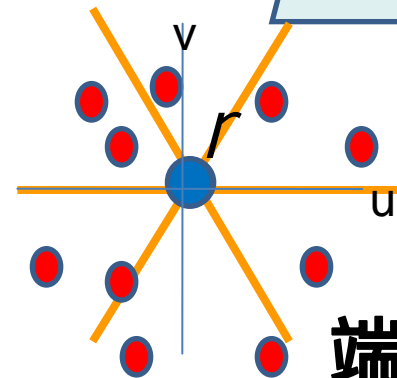
- すべての点について以下を行う

1. 近傍点を見つける(赤い点)
2. 平面に投影する。
3. 端部かどうかを判断する。

平面に投影

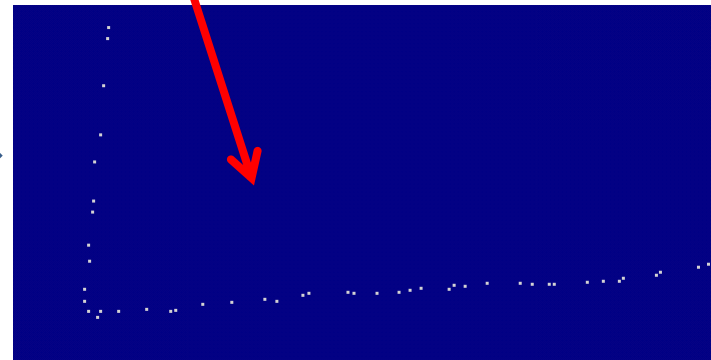
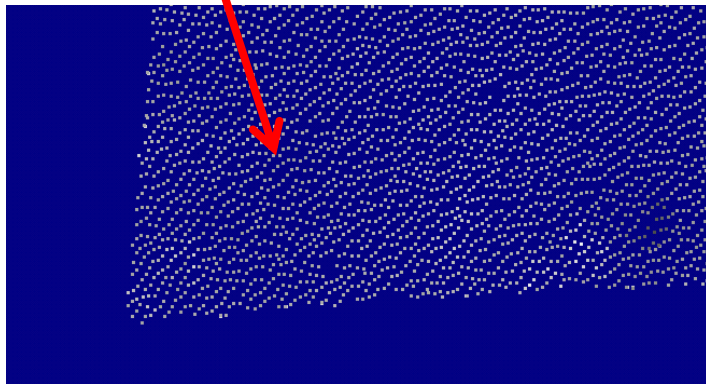
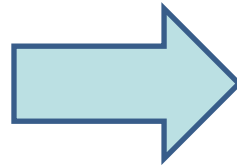
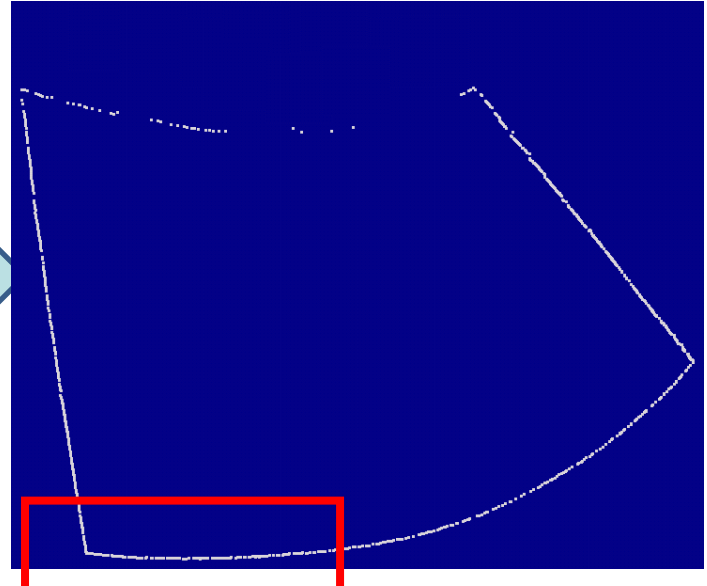
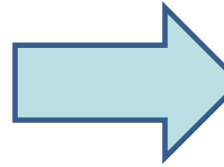
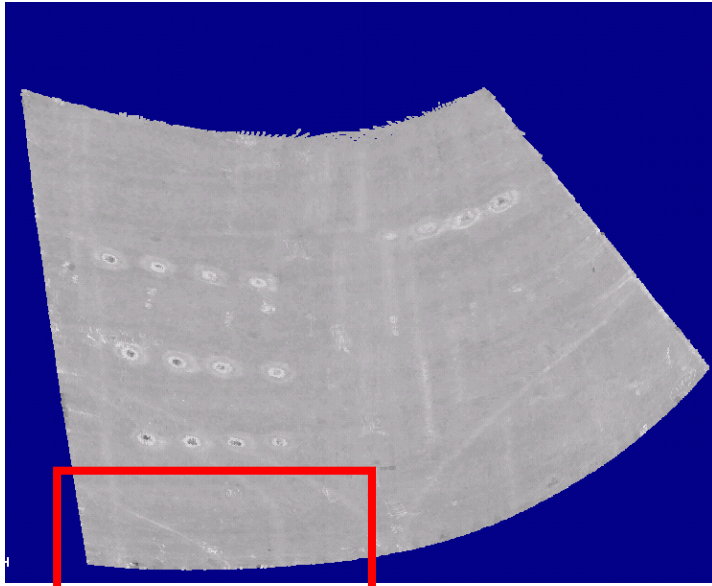


4領域以下
端部(エッジ)

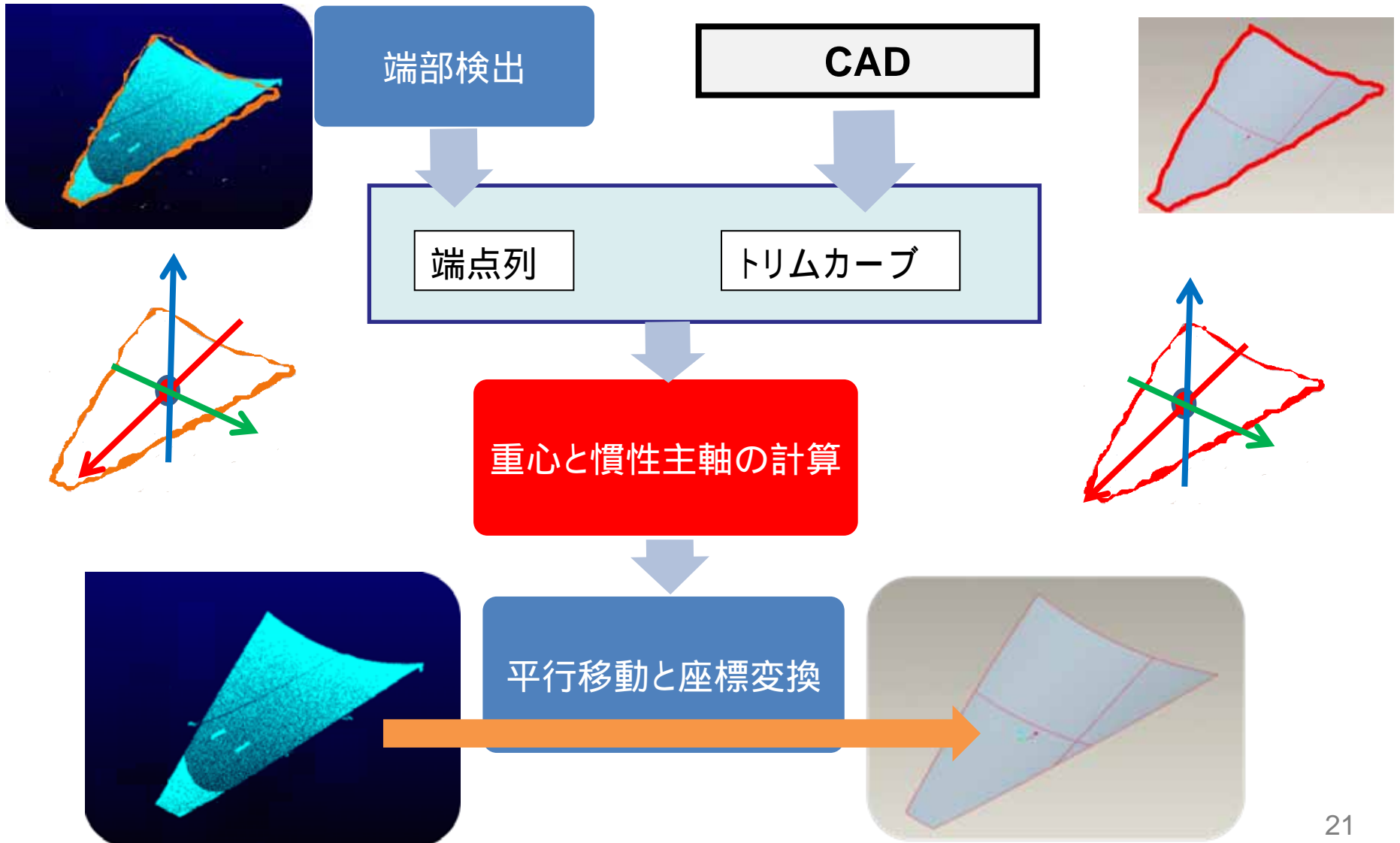


5領域以上
端部ではない

端部検出

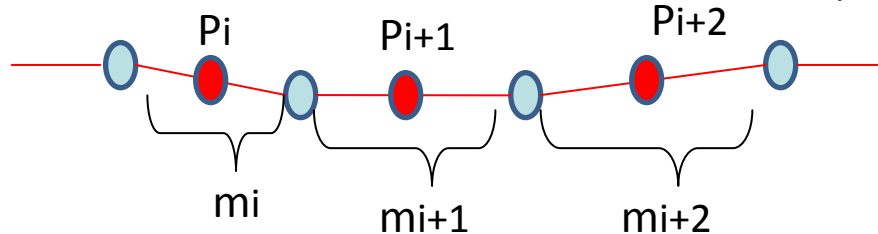


端部を基準とした位置合わせ



重心と慣性主軸の計算

- 隣接2点間の距離を重み m_i 、2点の midpoint を位置 P_i とする。
 - 点群の密度がスキャナからの距離によって変化するため均等な重みでは重心が密度が大きい方に引きずられる。

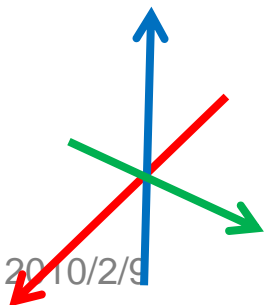


m_i : 2点間距離

P_i : 2点の midpoint

$$\mathbf{G} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} m_i \mathbf{P}$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{n-1} m_i \left(|\mathbf{P}_i|^2 - x_i^2 \right) & - \sum_{i=0}^{n-1} m_i x_i y_i & - \sum_{i=0}^{n-1} m_i x_i z_i \\ - \sum_{i=0}^{n-1} m_i x_i y_i & \sum_{i=0}^{n-1} m_i \left(|\mathbf{P}_i|^2 - y_i^2 \right) & - \sum_{i=0}^{n-1} m_i y_i z_i \\ - \sum_{i=0}^{n-1} m_i x_i z_i & - \sum_{i=0}^{n-1} m_i y_i z_i & \sum_{i=0}^{n-1} m_i \left(|\mathbf{P}_i|^2 - z_i^2 \right) \end{bmatrix}$$



平行移動と座標変換

- G_p : 点群の重心
- G_d : 設計データの重心
- $R_p=(e_1,e_2,e_3)$ e_i = 点群の固有ベクトル
- $R_d=(e_1,e_2,e_3)$ e_i = 設計データの固有ベクトル

点群を設計データに重ね合わせる方法

1. 全点に関して、点群の重心が原点になるように平行移動を行う。

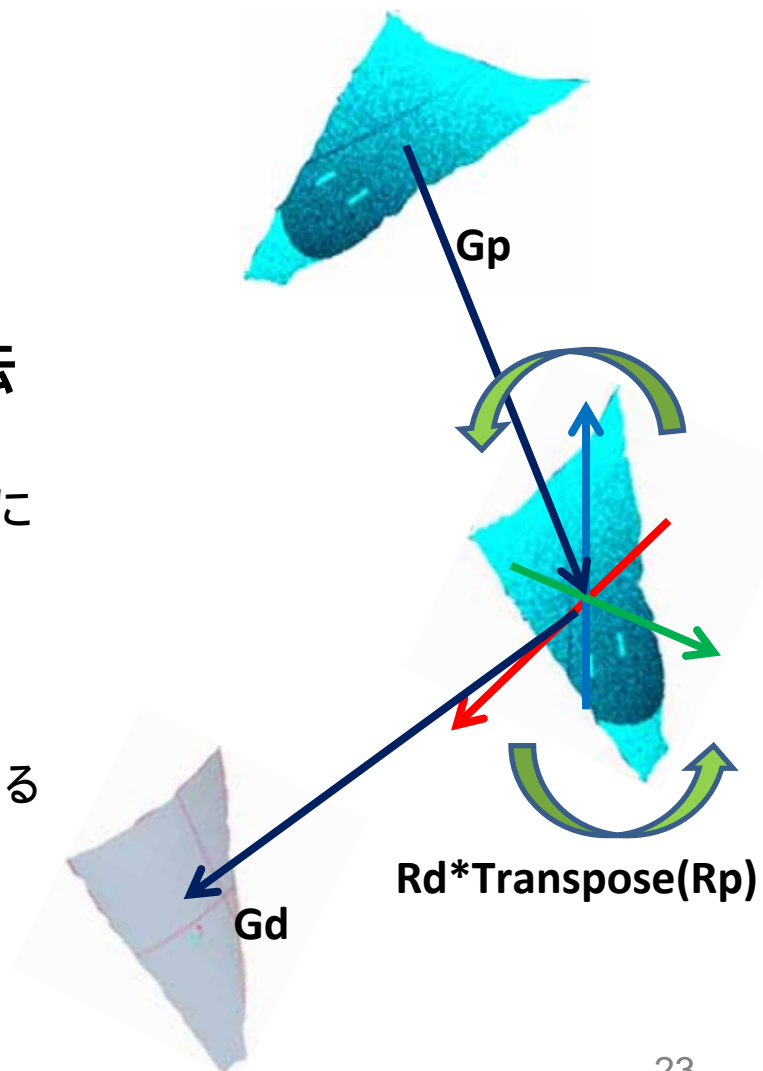
$$\text{Point} = \text{Point} - G_p$$

2. 全点に関して、座標変換(回転)を行う。

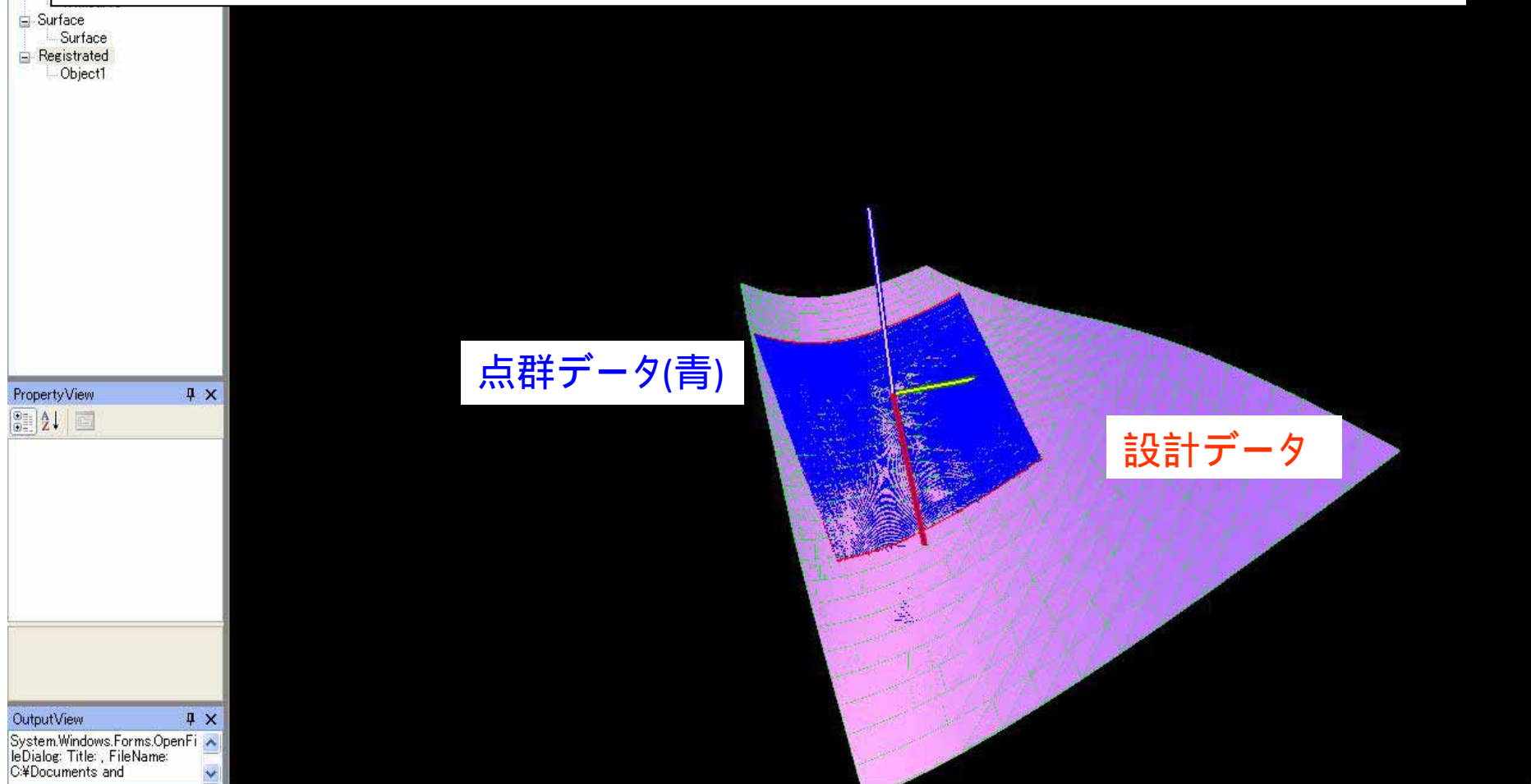
$$\text{Point}'' = R_d * \text{Transpose}(R_p) * \text{Point}$$

3. 全点に関して、原点が設計データの重心になるように平行移動を行う。

$$\text{Point}'' = \text{Point} + G_d$$



位置合わせ【結果】



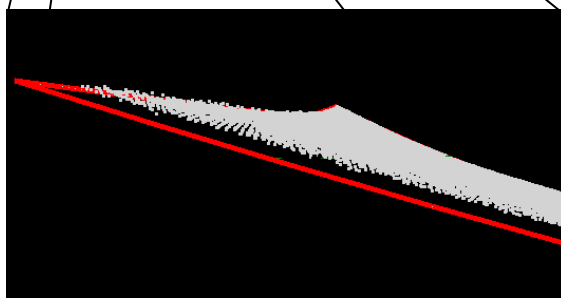
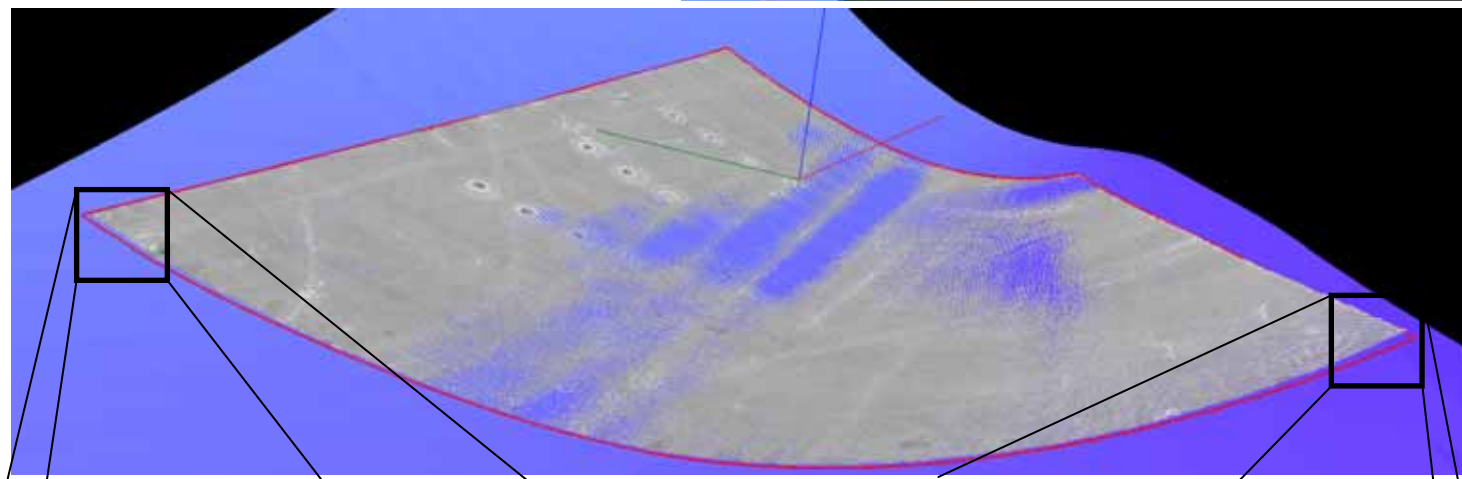
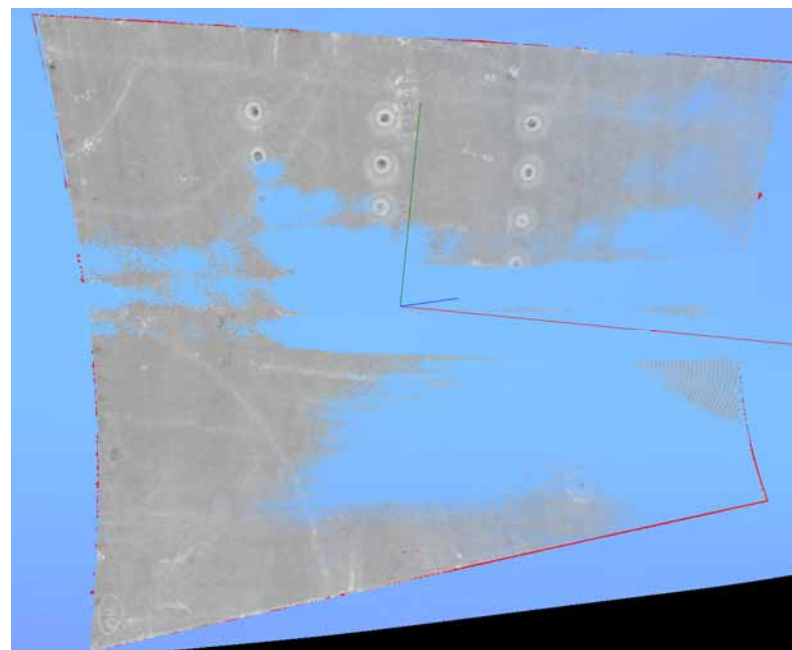
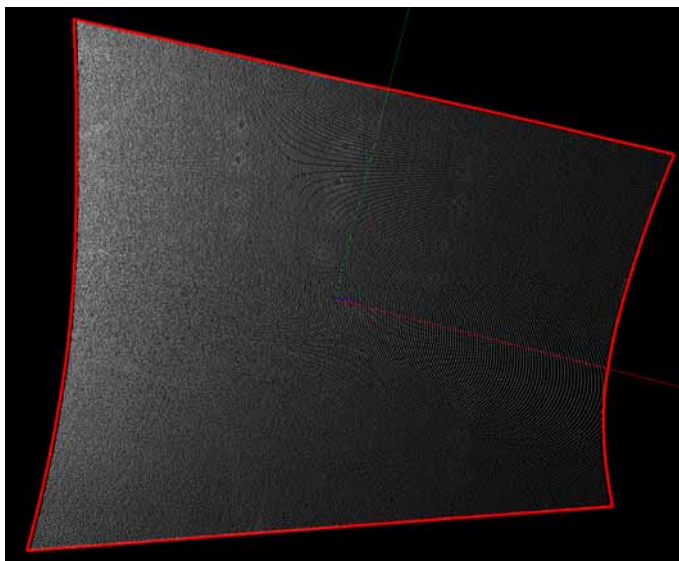
点群データ(青)

設計データ

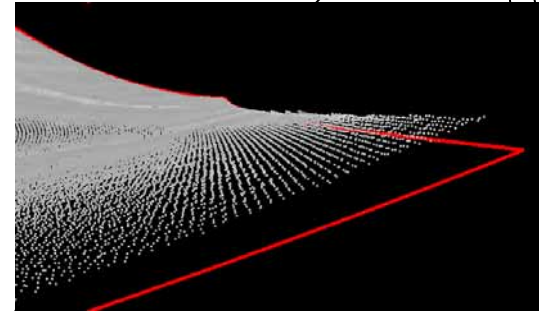
【結果】

：トリムカーブ

設計曲面を
外板1枚単位で切
り取るための曲線



ズームアップ



2010/2/9

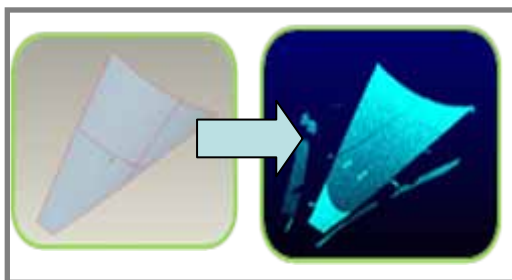
提案システム概要

レーザスキャナ

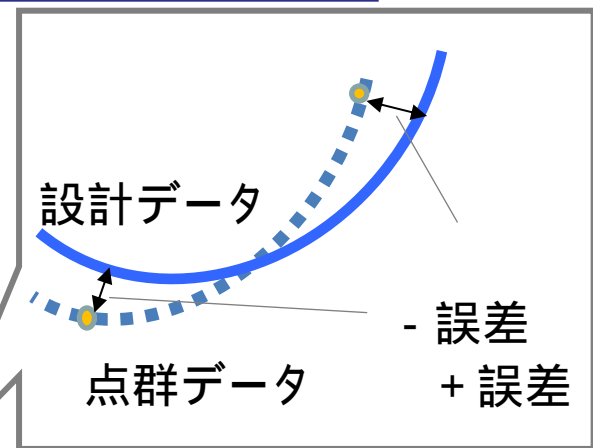
CAD



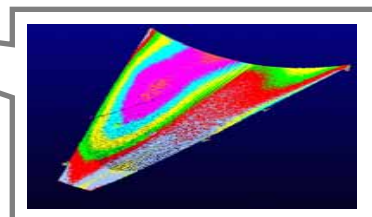
平滑化と不必要点の除去



位置合わせ



誤差の可視化



曲がり外板全体の形状の認識

誤差の可視化

誤差の計算

位置合わせされた状態の
点群データと設計データの
差異を計算する。



可視化

誤差の値に基づいて、ユーザが理
解しやすい形で出力する。

誤差の可視化

誤差の計算

位置合わせされた状態の
点群データと設計データの
差異を計算する。

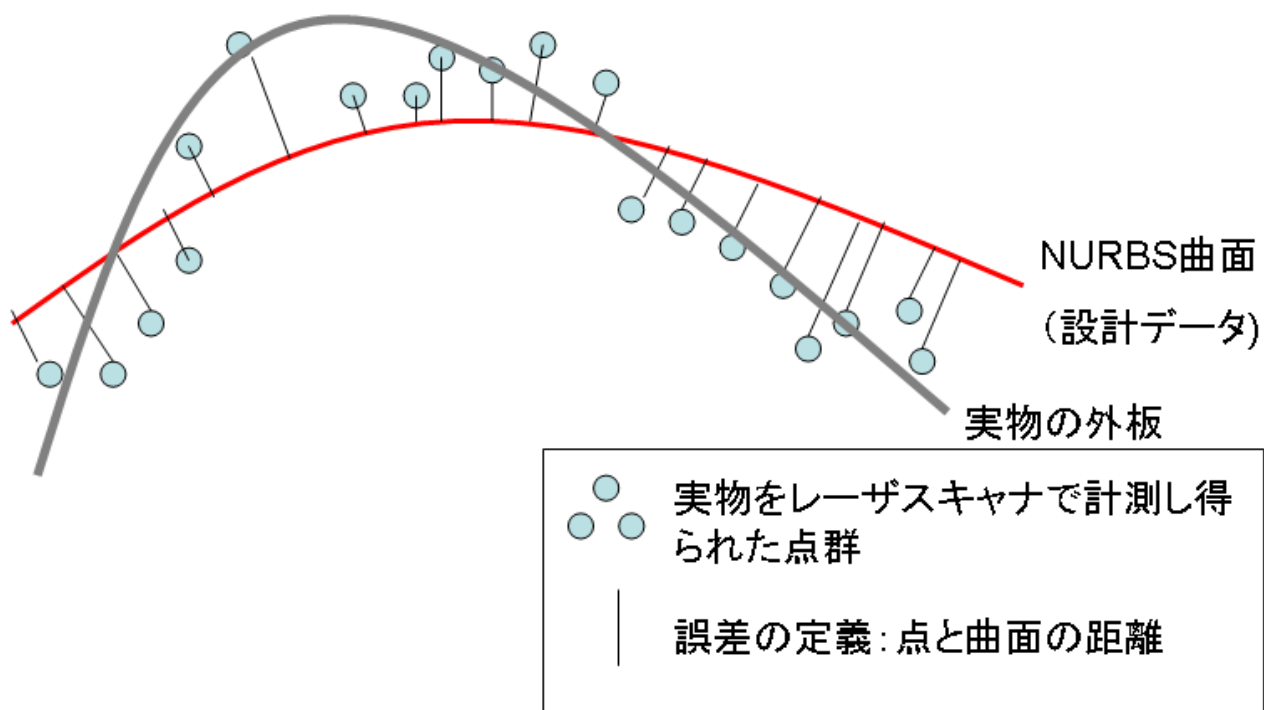


可視化

誤差の値に基づいて、ユーザが理
解しやすい形で出力する。

誤差計算

- 誤差の定義
 - 点とNURBS曲面の間の符号付き距離



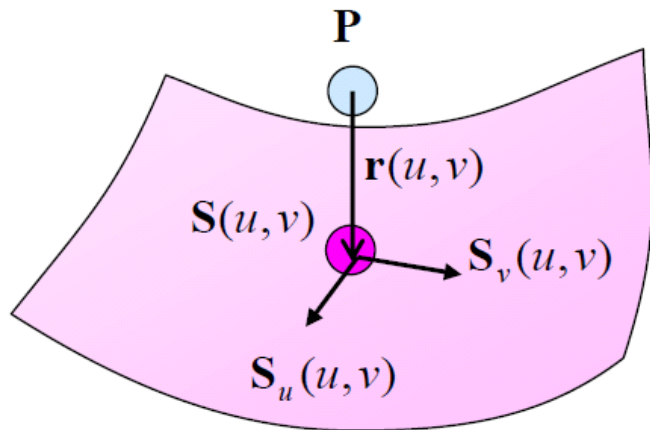
誤差の計算方法

点とNURBS曲面間の符号付距離の計算

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

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

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



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

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

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

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

- 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]

誤差の可視化

誤差の計算

位置合わせされた状態の
点群データと設計データの
差異を計算する。

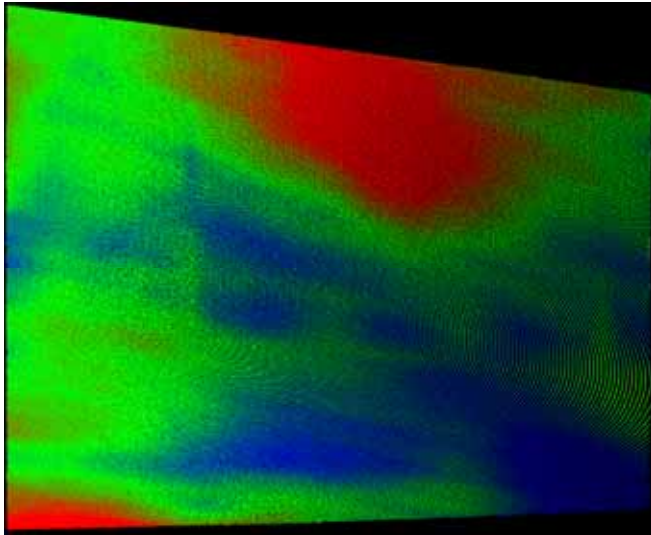


可視化

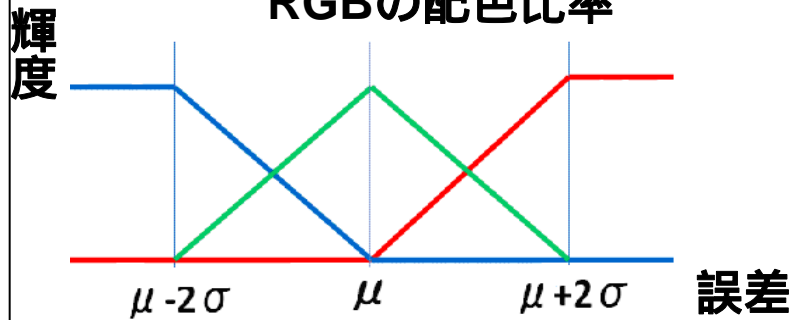
誤差の値に基づいて、ユーザが理
解しやすい形で出力する。

可視化

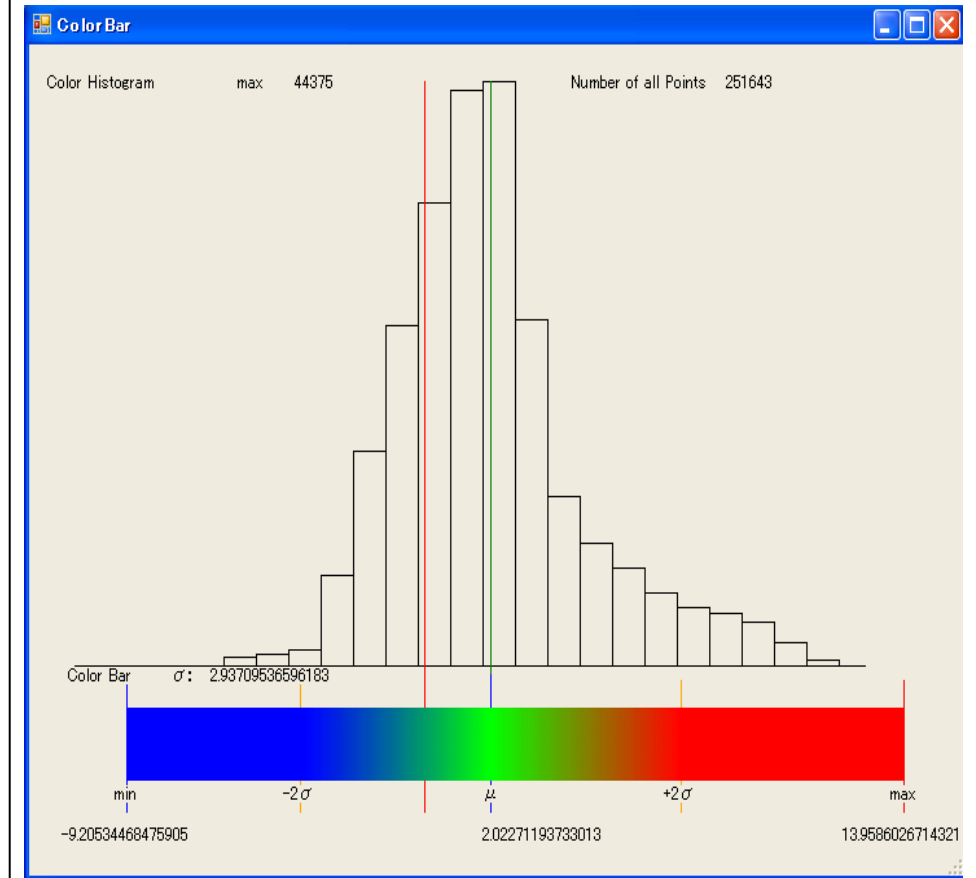
誤差カラーマップ



RGBの配色比率



誤差ヒストグラム表示



システムの検証

システムの検証

- 目的
 - システムが正しく誤差を検出しているか否かを検証する。
- 検証方法
 - 完全な平面だと信頼できる定盤と設計平面を、本システムを用いて評価し、誤差が1mm以下になることを確認すること。
 - 実際の曲がり外板で100%完璧にできているものなど存在しない。
 - 端点列を得られれば、位置合わせできるため、問題の難易度は定盤でも曲がり外板でも変わらない。

検証実験方法

*寸法はleicaのレーザ距離計で測定

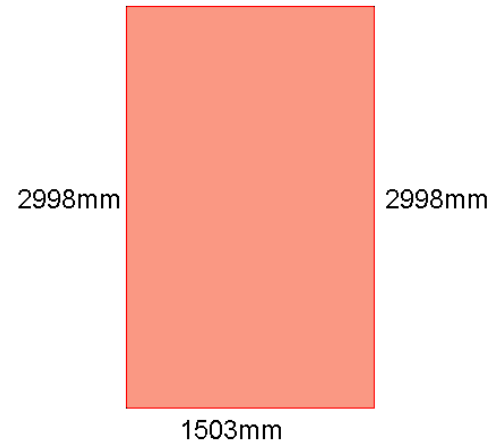


レーザスキャナの仕様

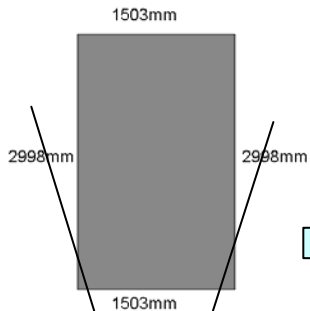
System Performance	
Accuracy of single measurement	
Position*	6 mm
Distance*	4 mm
Angle (horizontal/vertical)	60 μrad / 60 μrad (12" / 12")

Laser Scanning System	
Type	Pulsed; proprietary microchip
Color	Green, wavelength = 532 nm
Laser Class	3R (IEC 60825-1)
Range	300 m @ 90%; 134 m @ 18% albedo (minimum range 0.1 m)
Scan rate	Up to 50,000 points/sec, maximum instantaneous rate
Scan resolution	
Spot size	From 0 - 50 m: 4.5 mm (FWHM-based); 7 mm (Gaussian-based)
Point spacing	Fully selectable horizontal and vertical; < 1 mm minimum spacing, through full range; single point dwell capacity
Field-of-View	
Horizontal	360° (maximum)
Vertical	270° (maximum)
Aiming/Sighting	Parallax-free, integrated zoom video

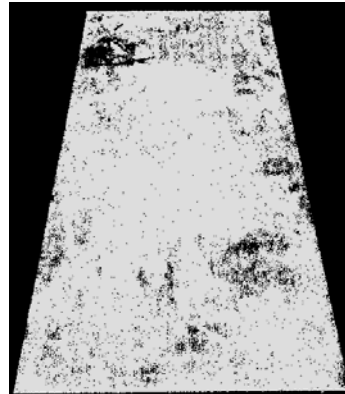
定盤の寸法*から作った設計データ
1503mm



工学部3号館地下にある定盤



点群データ



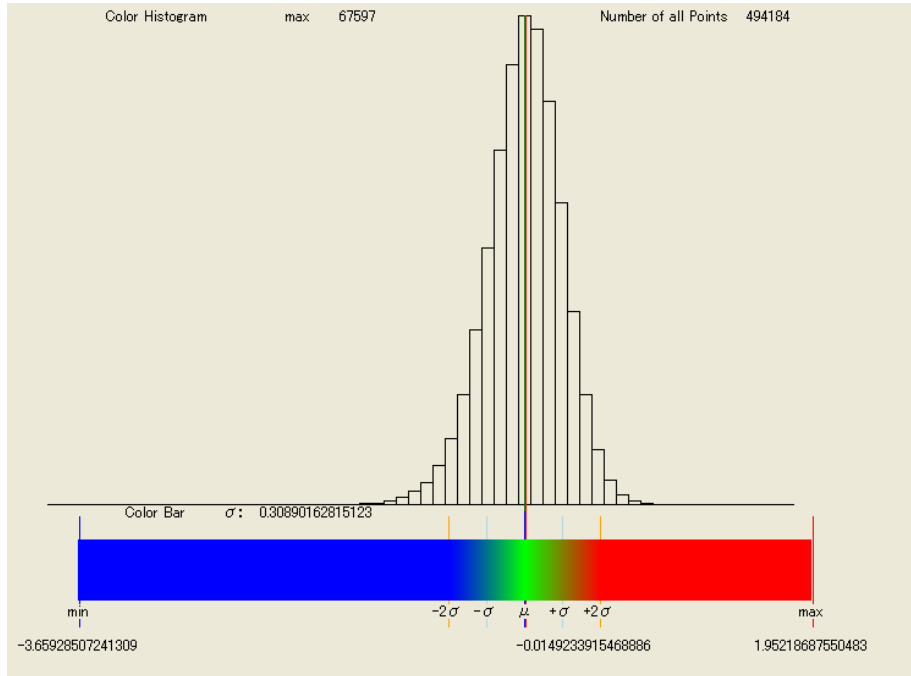
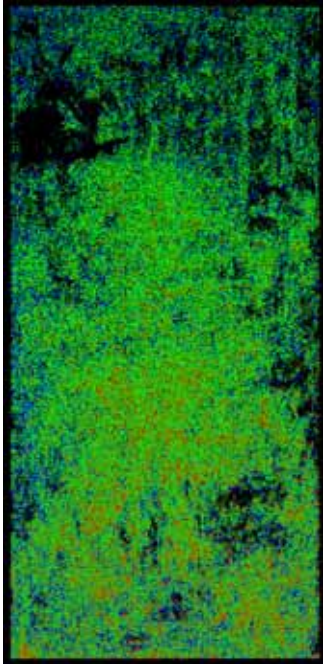
計測

誤差の計算、可視化

レーザスキャナの位置

検証実験結果

グラデーション表示



点数	494184点
(正)最大誤差	1.95mm
(負)最大誤差	-3.66mm
誤差平均	-0.015mm
標準偏差	0.31mm

3 信頼区間(99.7%の計測点)が
-0.95mm~0.93mmに入る。

システムを用いたケーススタディ

計測対象

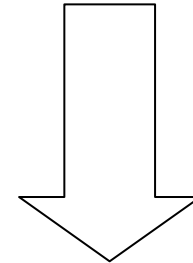
- 計測レーザースキャナ FARO Photon80
- 測距精度: 1 : $\pm 2\text{mm}@25\text{m}$
- 測定速度: 120,000 (points/sec)



計測方法



- 職人が完成したと判断した状態にし、計測する。



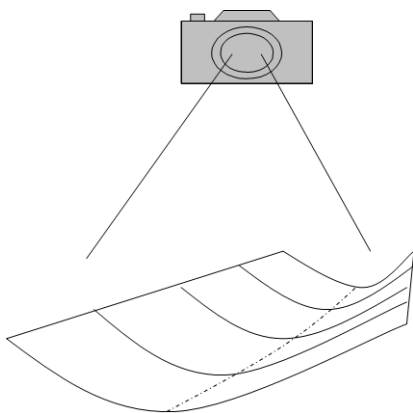
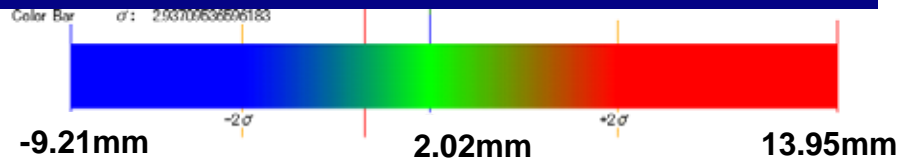
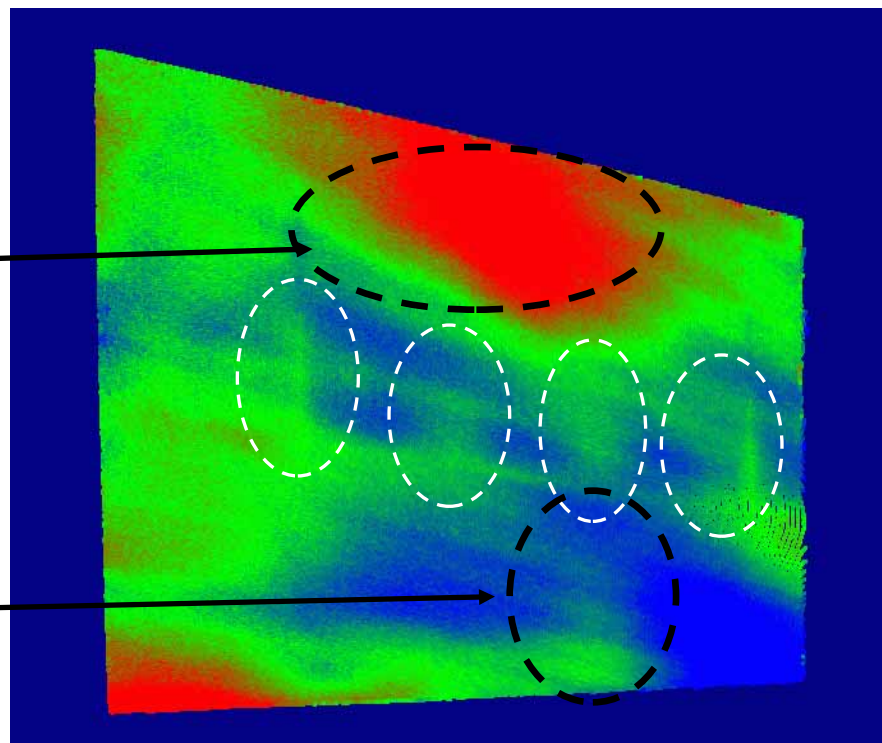
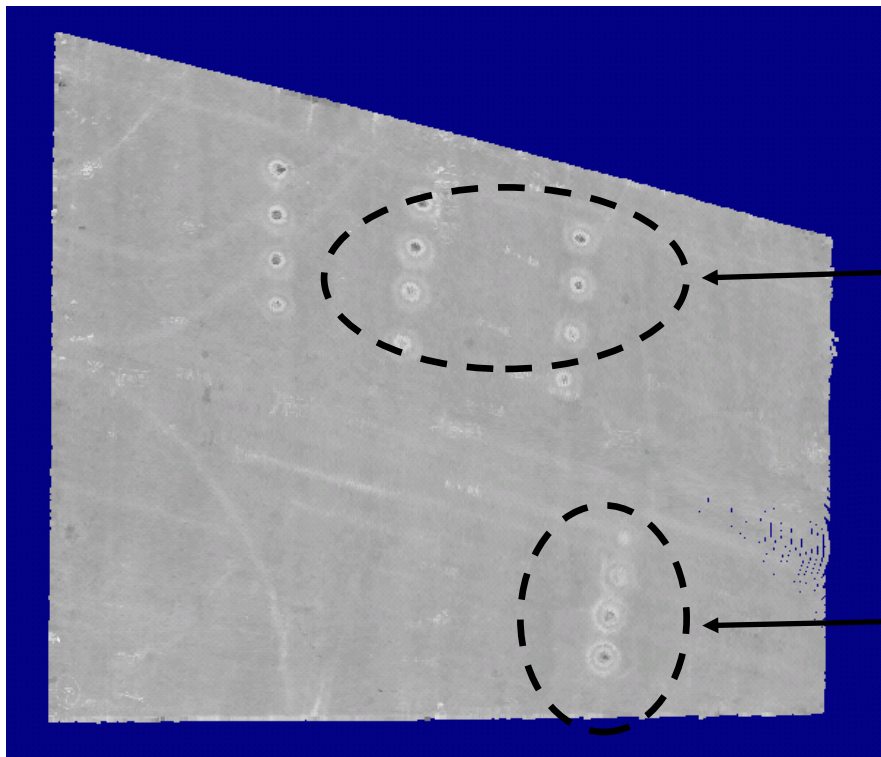
- 完璧に工作されていれば、設計データとぴたりと合致する。



曲がり外板の形状の検討

元の外板

誤差カラーマップ(グラデーション表示)

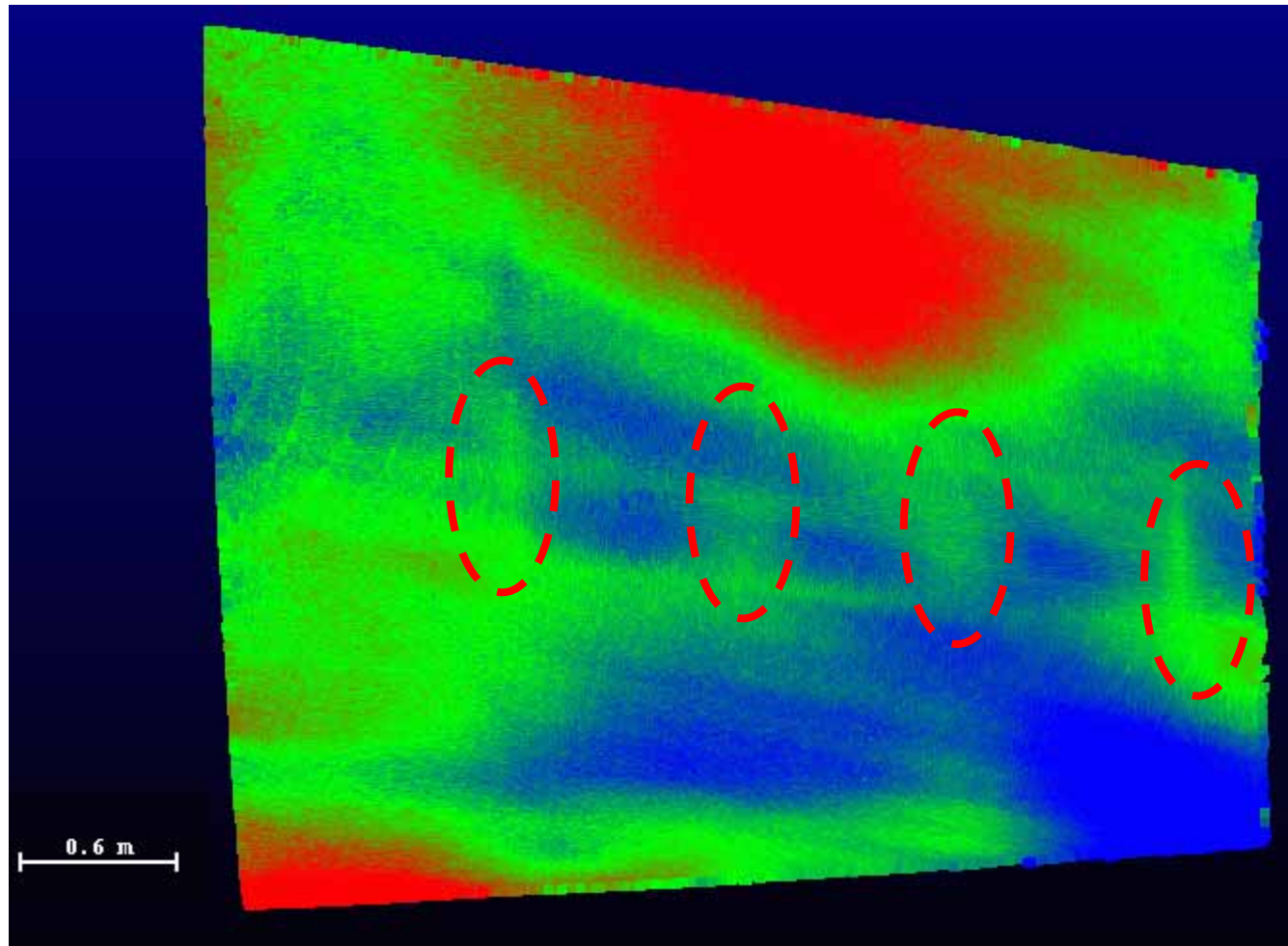


以下の2つの項目について考察する

緑の規則的な縦の線

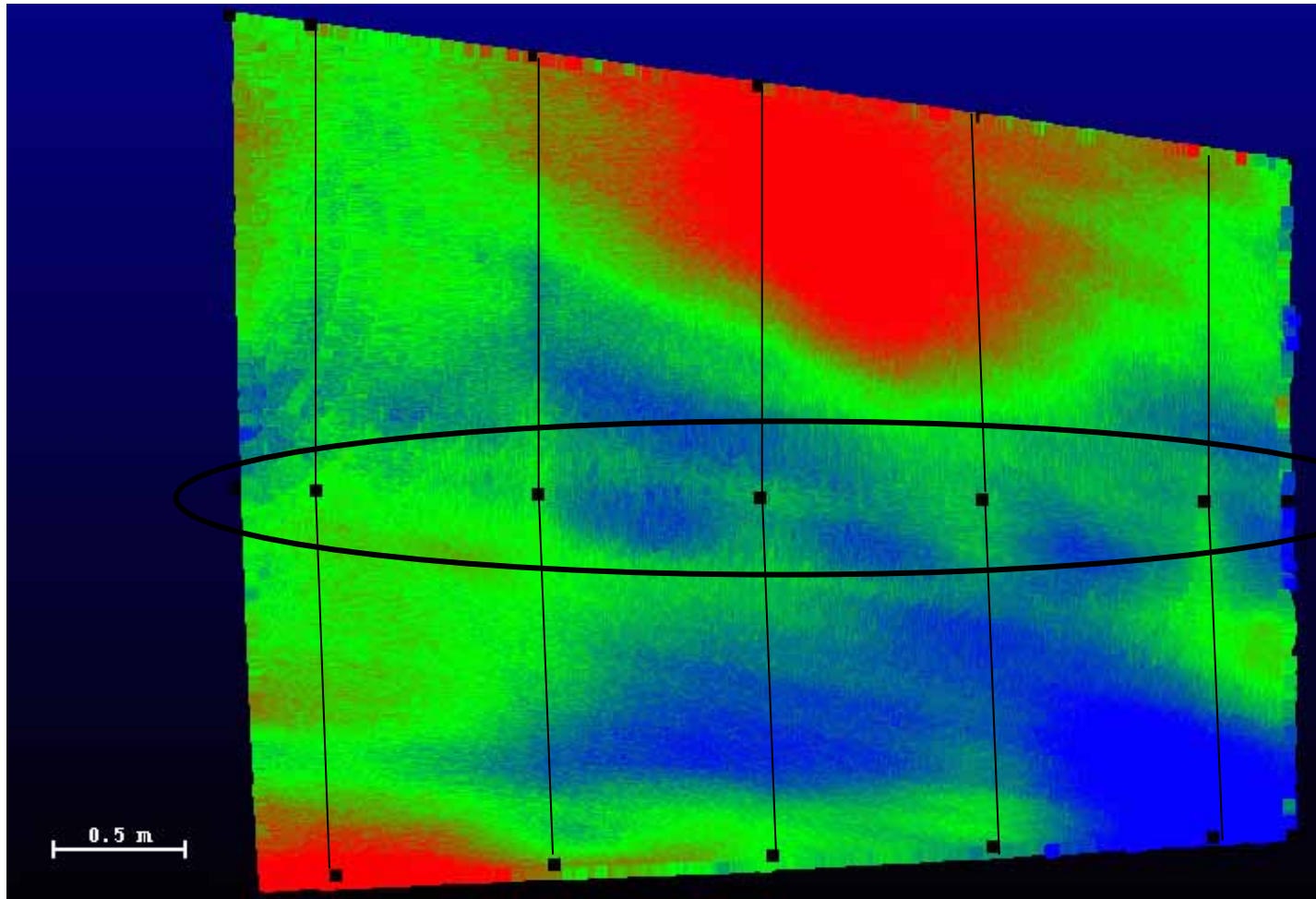
焼き位置と曲がり外板の完成形状

緑の規則的な縦の線



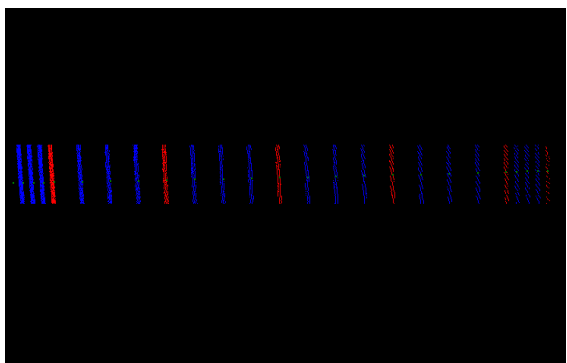
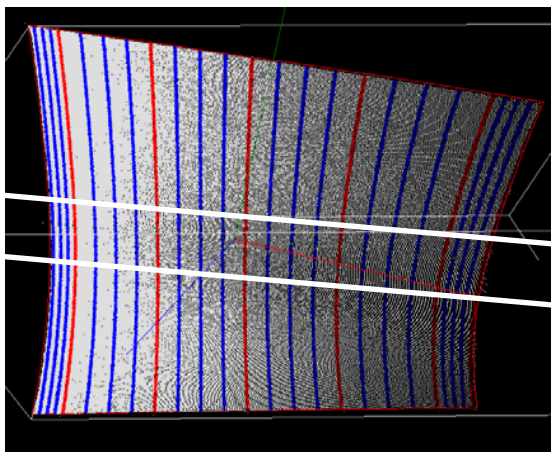
- 縦に入っている緑のライン

緑の規則的な縦の線

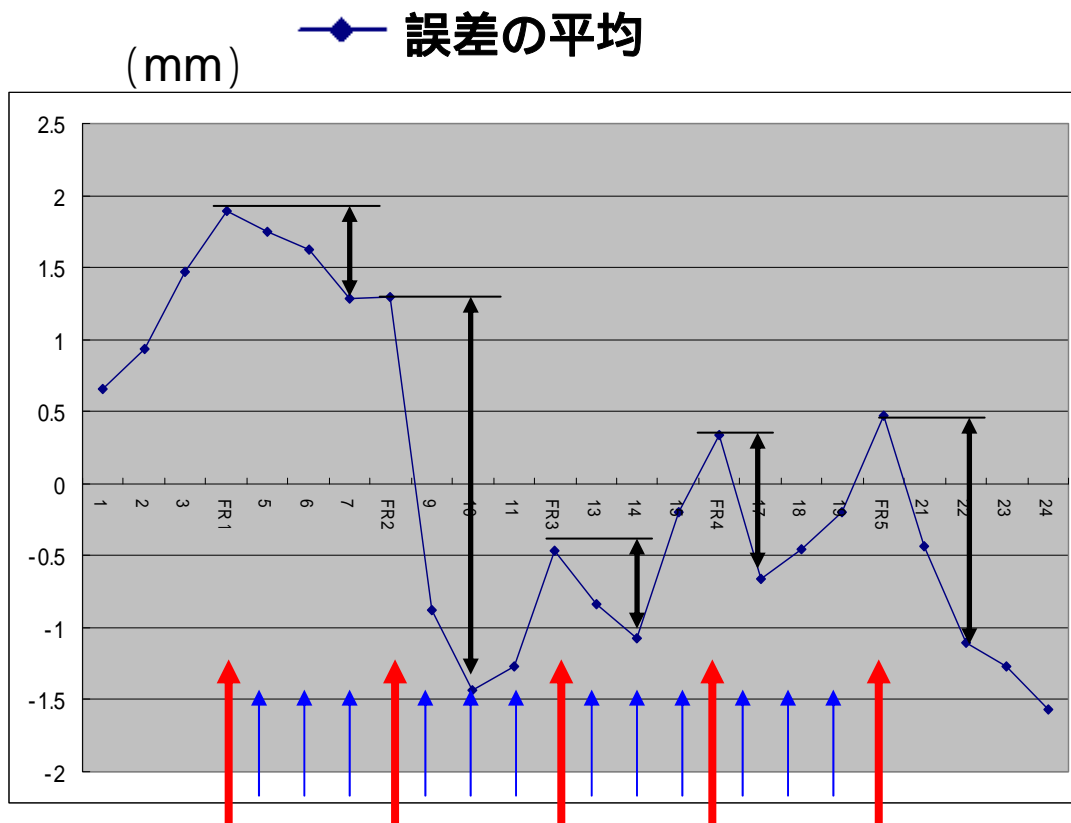


- 黒い線がフレーム(木型)の位置
- 木型を置かれた部分はその近辺より盛りあがっている。

見通し線上の誤差の定量的評価

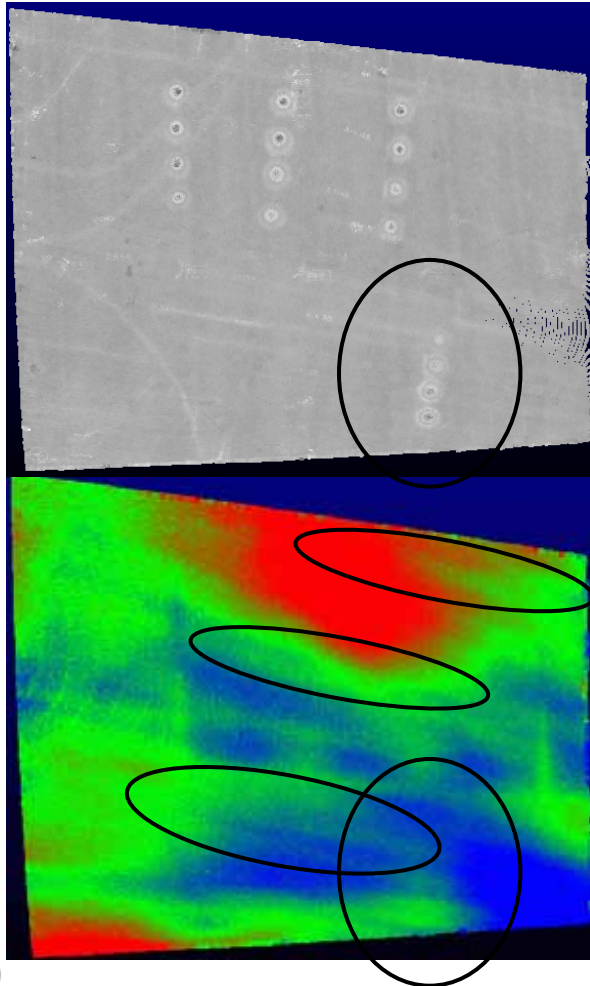


- | : 木型の位置
- | : 木型の間の位置



最大で2mmの高低差が存在する

焼き位置との比較

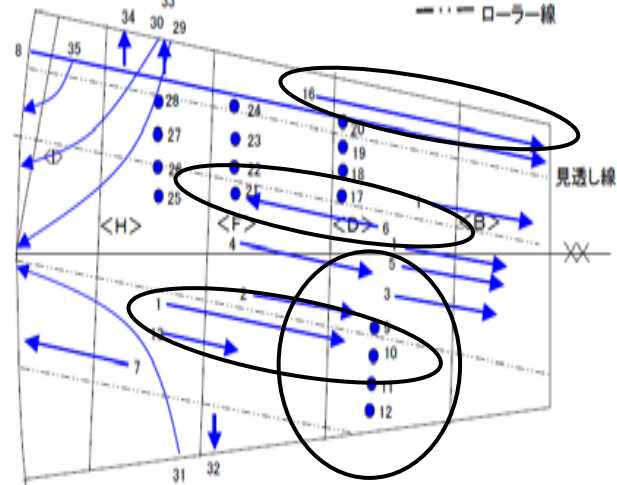


57 DBAC A1MS

9/9 13:15~16:15 阿部さん
焼いた箇所 35

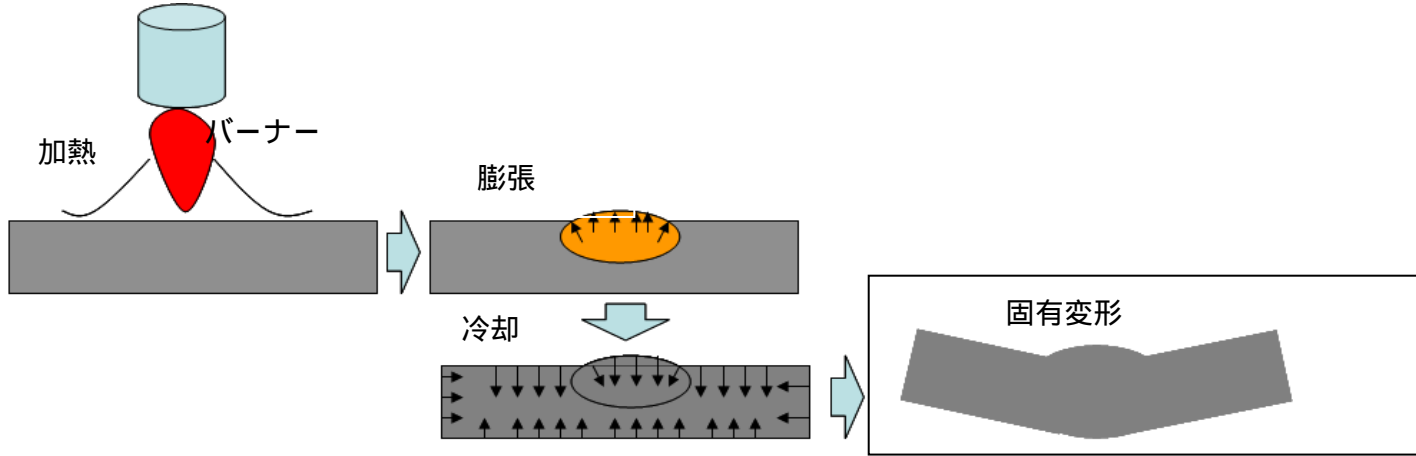
<上>

→ 線状加熱
● 点焼き
↺ 絞り
↑ 裏を焼く
--- ローラー線

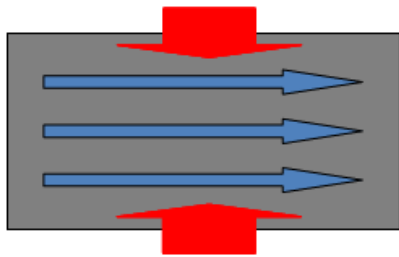


焼き位置との比較

角変形の定性的なメカニズム

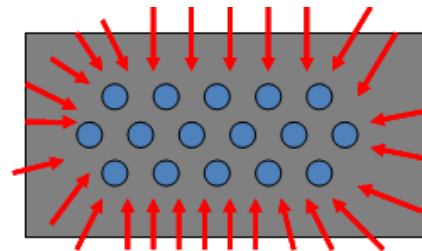
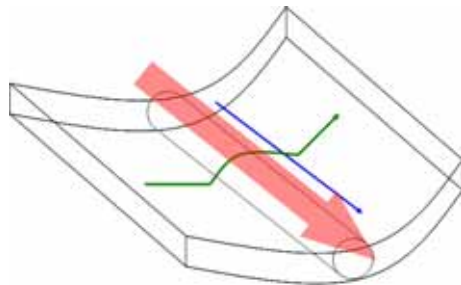


撓鉄に用いられる焼きの種類



線状加熱(線焼き)

* 線焼き部分に沿って角変形が起きる。



点焼き

* 点焼き部分が盛り上がる。

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。
- 本システムを用いて定盤を評価する検証実験により正確に評価できることを示した。
- 木型では精度評価できなかった曲がり外板の面全体を本システムによって評価し、知見を得た。
 - 計測対象とする曲がり外板では、木型の位置と木型間の位置には高低差が見られた。
 - 焼き位置と外板形状の関係性が見られた。

ご清聴ありがとうございました。