

# 3次元計測とモデル化技術 の動向

東京大学大学院工学系研究科  
増田 宏（准教授）

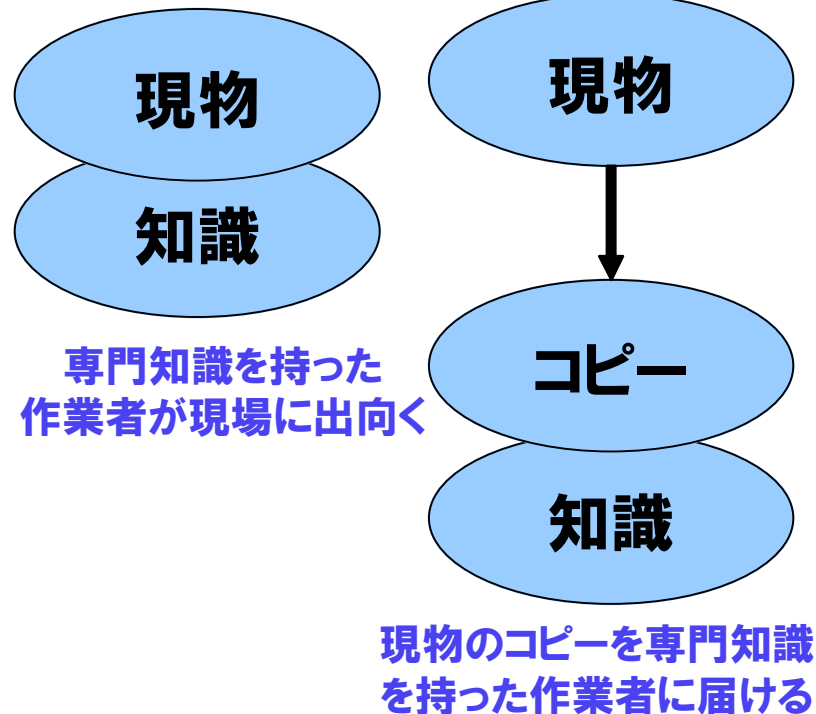
# 本講演の内容

1. **現物のデジタル化の利点**
2. **点群を用いた3Dモデル作成技術の概観.**
3. **点群計測に基づく設備モデリングの可能性.**

# 現物のデジタル化の利点

# デジタルシミュレーションの利点

- **実物による作業の問題点**
  - 作業場所の制約
    - 海外プラントや海上プラント
  - プランニングの精度
    - 設備や生産ラインの干渉
    - 作業手順の手戻り
- **モデルによる作業の検討.**
  - モデルベース・メンテナンス
  - 災害時の修復検討.
  - 生産ライン・シミュレーション.



# 大型設備の3Dデータ

- **設備の3Dデータがない**
  - **メンテナンスが必要なプラントは古い**
- **図面と現物が異なる**
  - **現場合わせが少なくない。**

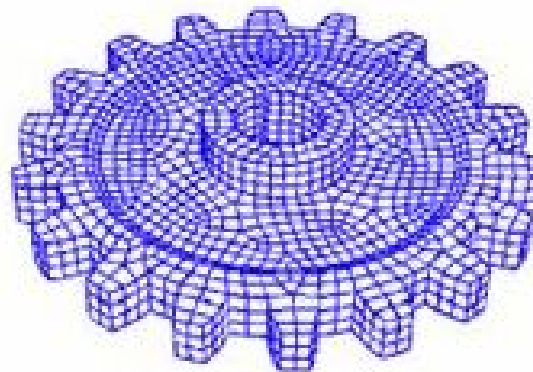
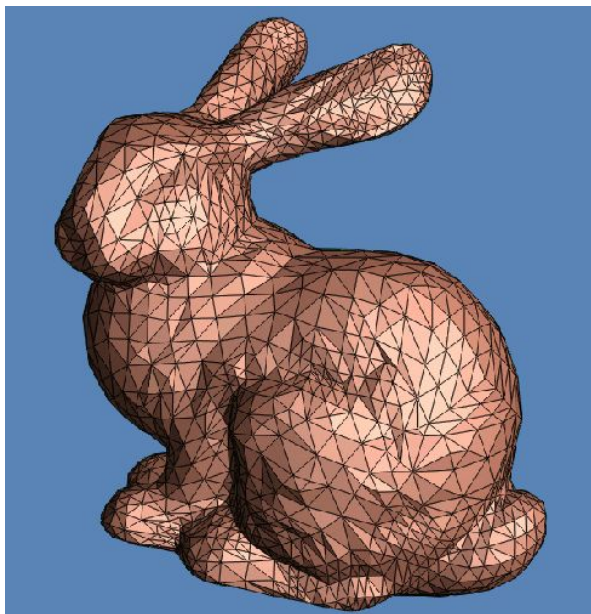


現物の計測による3Dモデルの作成が効率的。

# 点群を用いた 3Dモデル作成技術の概観

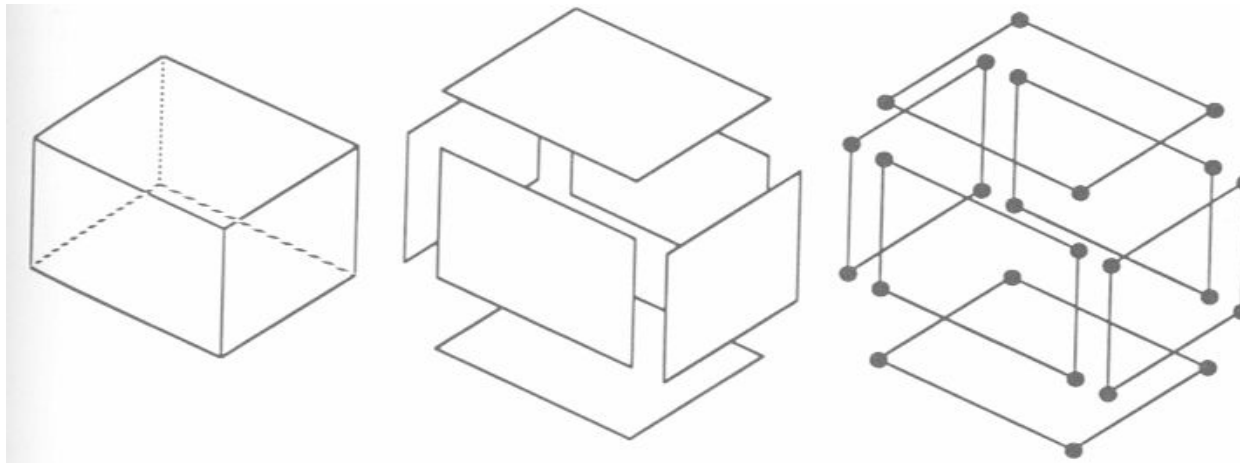
# 3Dモデルの基礎： メッシュモデル

- **物体表面を三角形や四角形の集まりで表現.**



# 3Dモデルの基礎： ソリッドモデル

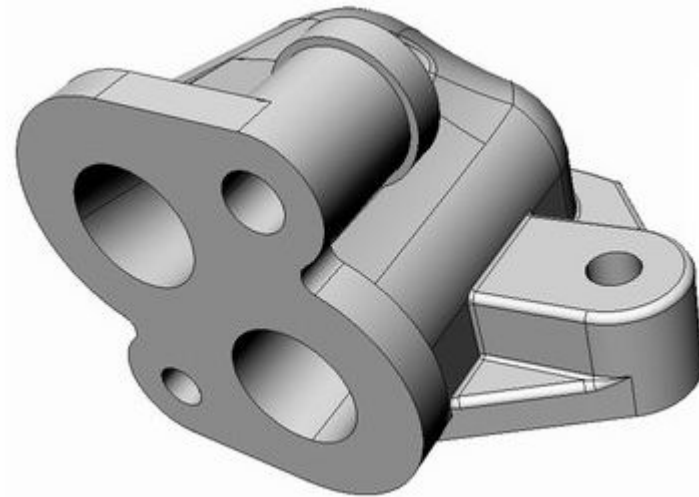
- **立体 = 面 + 稜線 + 頂点**
  - 面, 稜線, 頂点の接合情報がデータとして記述されている.
  - ほとんどのCADシステムはこの表現を採用.





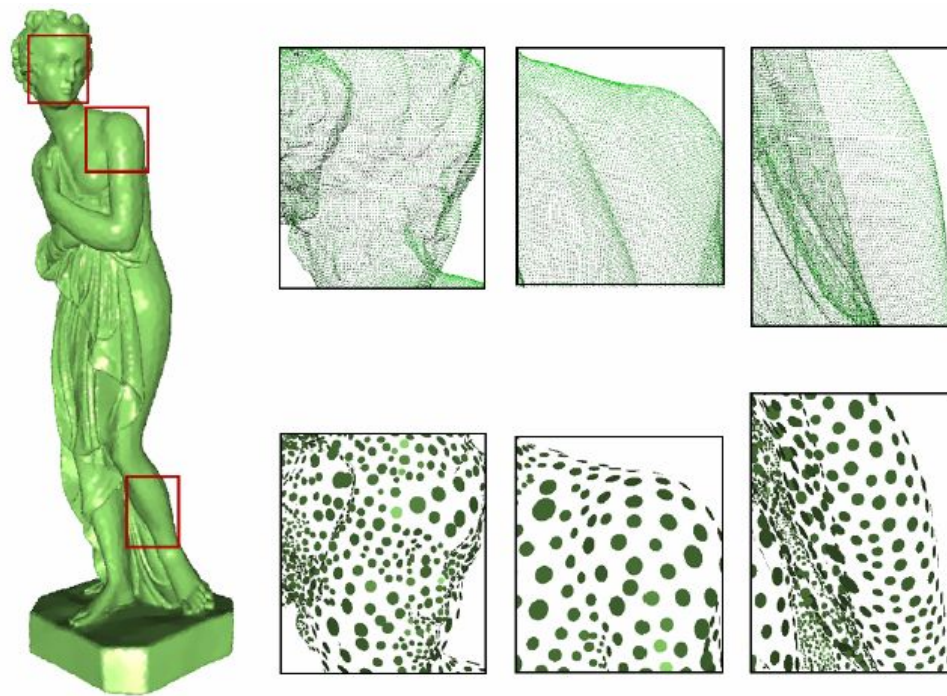
# 3Dモデルの基礎： 曲面モデル

- **曲面モデルは，曲面を張り合わせて作られる。**
  - 個々の曲面を，曲面パッチと呼ぶ。
  - 曲面 = {円柱，円錐，球面，..., 自由曲面}



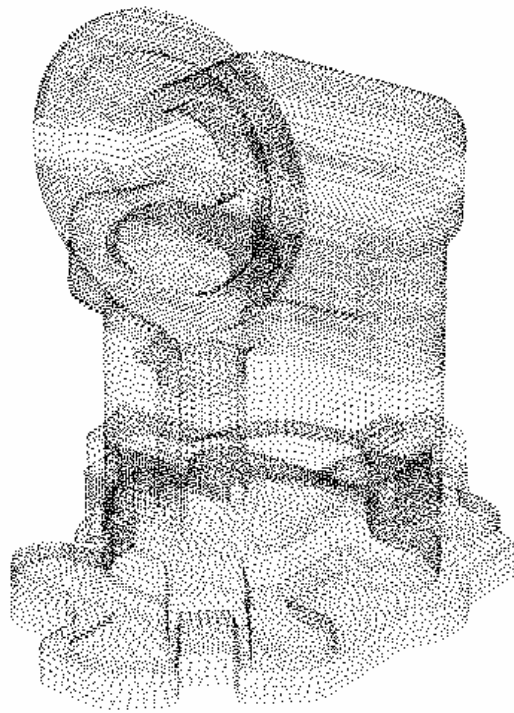
# 3Dモデルの基礎： ポイントベースモデル

- 点の集合によって3Dモデルを表現し，表示する.



# 点群からの3Dモデル作成

- 多数の計測点を入力として、3Dモデルを作成する。



# 計測方法

物体表面上の点の3次元座標を計測する。

- **三角測量**

- 大型の計測は苦手

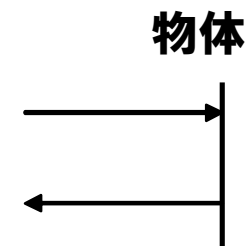
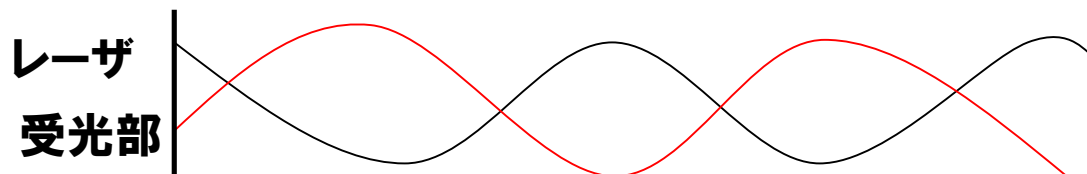
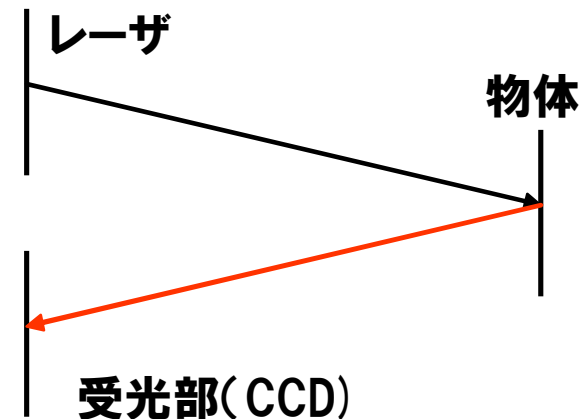


- **位相差**

- 高精度の計測は苦手

- **時間差**

- 短時間での計測は苦手



# 設備計測

## 写真測量 写真合成による3次元データの取得

長所: 測りたい箇所が確実に計測できる。

短所: 写真の合成とモデリング作業に時間がかかる

## 点群測量 レーザースキャナで3次元の点群データを取得

長所: 短時間で膨大な計測点が得られる。

短所: 比較的精度が低い。自動化ツールが未整備。

# 計測方法のまとめ

	精度	計測点の 個数	計測時間	モデリング	現状は？
三角測量	大規模計測 は制約大	多い	小型:自動 中型:人手 大型: ?	小型向け商 用ツール	計測× 処理○
位相差	誤差・ノイズ が大きい	非常に多 い	自動 スキャン	ツールが未 熟	計測○ 処理△
時間差	精度がよい	少ない	大量点取得 に時間.	困難	計測×
写真測量	ほどほどの精 度	写真の画 素に対応	写真撮影の 手間	手間が大き い. 自動化 が困難.	計測○ 処理○

# 必要な知識はどこにあるか？

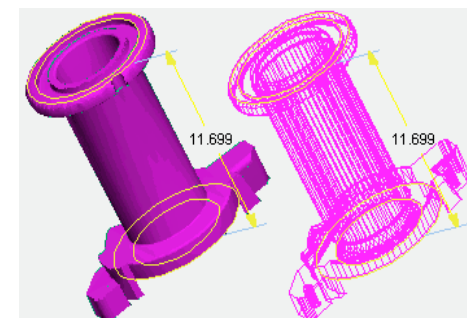
## 点群計測が活用されてきた分野

### 必要な知識はどこにあるか？

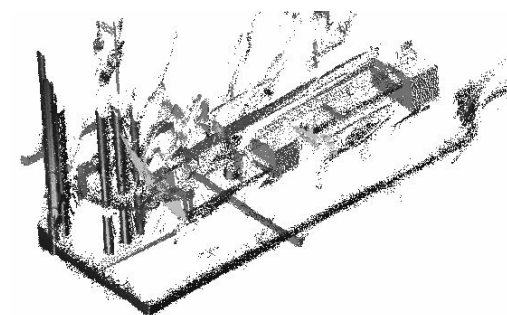
- **機械系CAD**
  - Reverse Engineering
  - 盛んに研究が行われてきた。（機械系, 情報科学系）
- **映像製作（コンピュータグラフィックス）**
  - As-Built や Reverse Engineering という用語を使うことは少ない
  - 非常に盛んに研究が続けられている。（情報科学系）
- **大型構造物のモデリング**
  - As-Built Modeling
  - 学術研究は比較的少ない。

# 3D計測に基づく3Dモデル生成

- **単品部品のモデリング**
  - 三角測量など.
  - 物体表面を満遍なく計測.
  - 計測誤差:  $\pm 0.1\text{mm}$ 程度
  - 自動化ツールが存在
    - シャープエッジや曲面パッチは手動
- **大型プラントのモデリング**
  - 連続Waveレーザ方式など
  - 計測誤差:  $\pm 3\sim 5\text{mm}$ 程度
  - 自動化ツールはまだ未成熟.
    - 人手による長時間のモデリング作業



~10cm

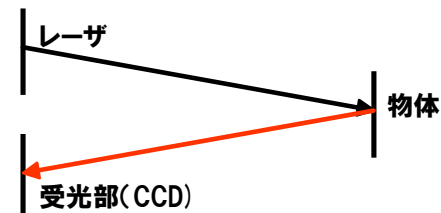


~10m



# 設備計測は技術的に何が違うのか

- **機械系CAD, CG : 共通のツールが利用可能.**
  - **点の個数**
    - 数百万点以下のことが多い.
  - **点群精度**
    - 三角測量に基づくことが多く, 計測誤差は小さく抑えられている.
    - CAD応用では, 計測機器メーカーが精度向上に力を入れている.
  - **密な点群**
    - 計測点が密にサンプリングされている.
- **設備計測**
  - **計測点の個数**
    - 数千万から数億点 ⇒ Out-of-Core 技術や64ビット化.
  - **点群精度**
    - 絶対誤差が大きい.
  - **点の粗密**
    - 遠くのものほどサンプリング間隔がまばら
    - 長さが10倍になれば, 面積密度は100分の1

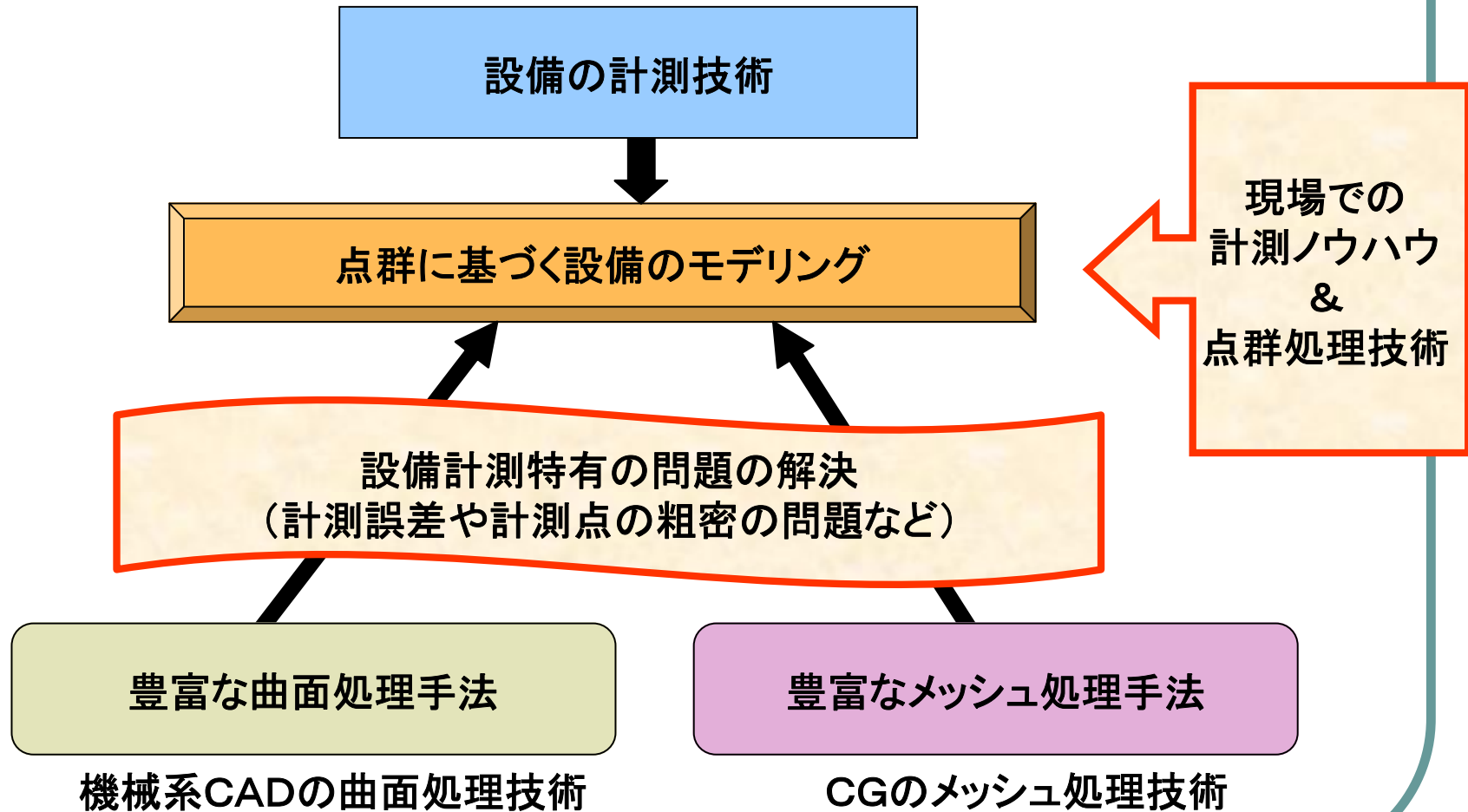


現状では, 機械系CADやCGの商用ツールを,  
設備計測にそのまま利用するのは難しい.

# 各応用分野の特徴

	呼び方	特徴	利用目的	対象物のサイズと精度	何が難しいか
プラント計測	As-Built Modeling	<b>標準部品</b> が多い。構造物の構成や位置の把握など。	現状確認のためのモデル作成。干渉チェックなど。	サイズ： 10m ~ 精度：3~5 mm	大型機器の計測スキル。大規模点群の処理技術。
機械系CAD	Reverse Engineering	<b>滑らかな自由曲面</b> が多い。微分連続性が求められる。	CADやCAEの入力データ。	サイズ： 数cm~2m 精度： 非常に高い	曲面の種類に応じたセグメンテーションが難しい。
映像製作	Mesh Analysis など	メッシュモデルを作成する。自然物など、 <b>不規則な形状</b> 。	映像製作のためのコンテンツ作成	サイズ： 数cm~2m 精度：現物と多少違っていてもよい。	メッシュモデルの操作技術(近年の研究成果により、かなり成熟)

# 設備モデリングのトータルなソリューション

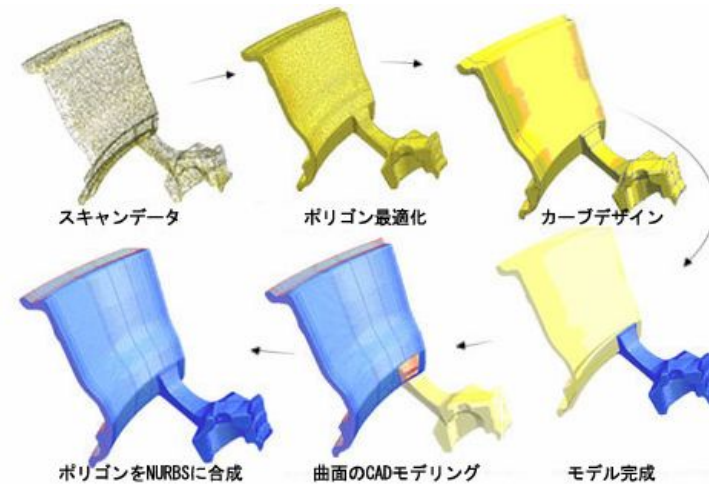


異なる領域の知識やスキルを融合する。

# 点群計測に基づく 設備モデリングの可能性

# 典型的なモデル化の手順 (機械系CADの場合)

- **データ計測**
  - Laser scanner などを用いる.
- **前処理**
  - ノイズ除去など
- **メッシュモデルの生成**
  - 点群をメッシュモデルに変換する.
- **セグメンテーション**
  - 点群を曲面の種類に応じて分類する.
- **曲面当てはめ**
  - 精度が重要.
- **CADモデルの生成**
  - CAD システムで読み込める形式に変換



(Rapidform HPより)

# 設備計測に基づくモデリングの可能性

- **この手順は、設備データのモデリングでも有効か？**

⇒ **ノイズは適切に除去できるのか？**

⇒ **点群からメッシュは作成できるのか？**

⇒ **自動セグメンテーションは可能なのか？**

⇒ **曲面当てはめによって、必要な精度は得られるのか？**

## **【問題】**

**超大量点群 vs. 大きな誤差と大量のノイズ**

# 計測装置

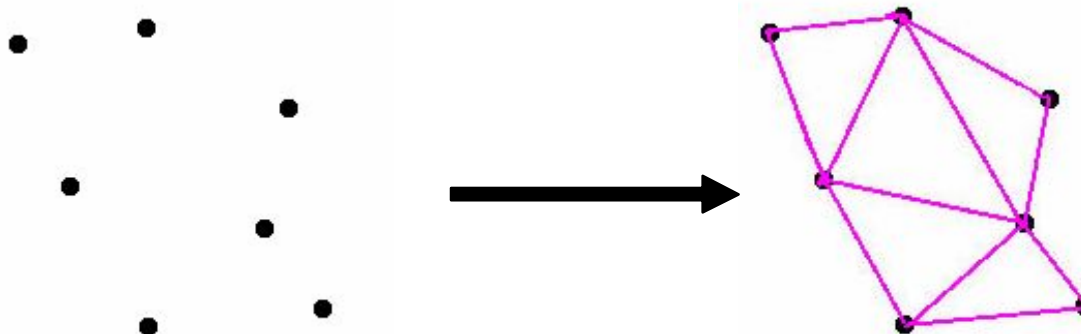
- **計測範囲**
  - 53m
- **計測時間**
  - 2億点を約6分
- **方式**
  - 連続waveレーザ方式



Z+F社

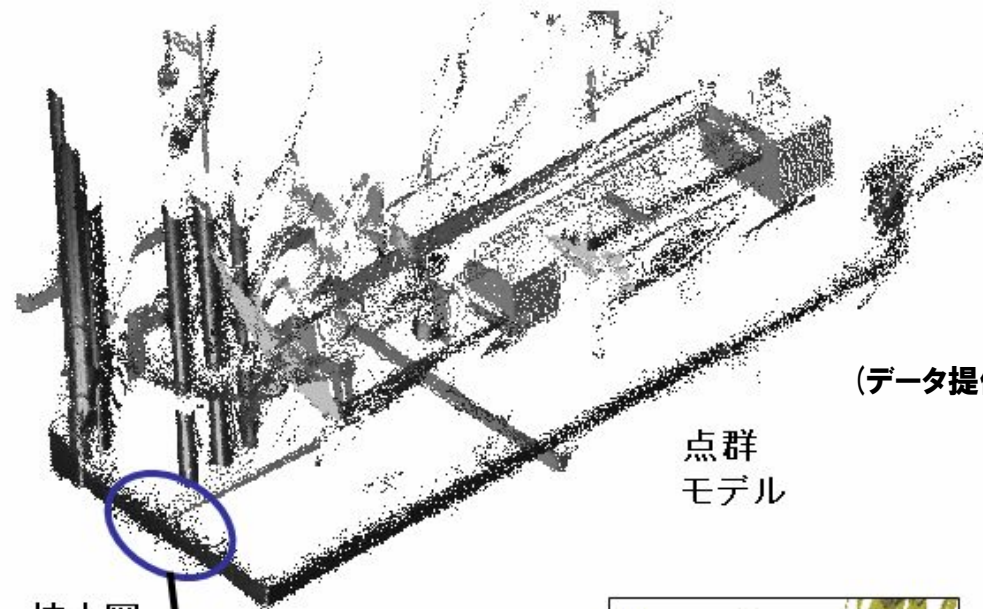
# メッシュ生成手法

- **なぜメッシュモデルを作成するのか？**
  - 点群 ⇒ 面の集合
  - 近くにある点ができる。
- **3次元の点群の Delaunay 三角形分割**
  - 点群が高精度で十分に密であれば、何の問題もない。
  - ノイズが大きいと、どの点が近いのかの判断を間違える。





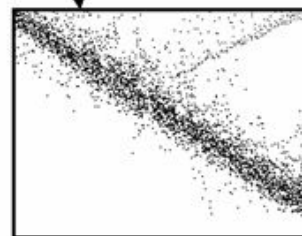
# 大型設備のレーザスキャンデータ



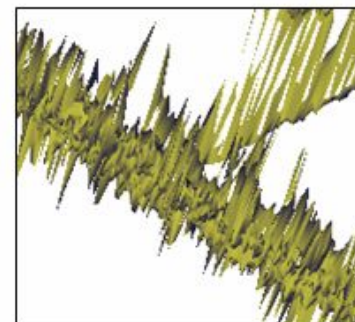
(データ提供: 辰星技研)

点群  
モデル

拡大図



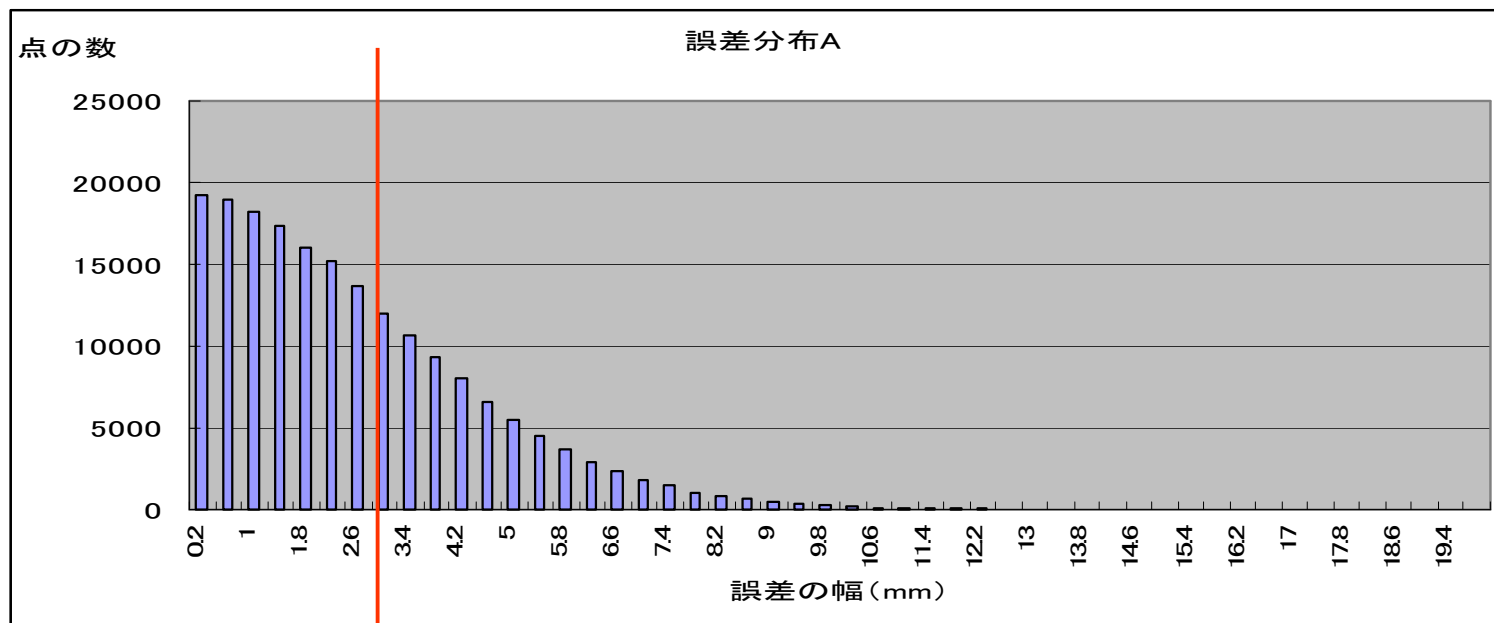
メッシュ化



**ノイズの比率が大きい**

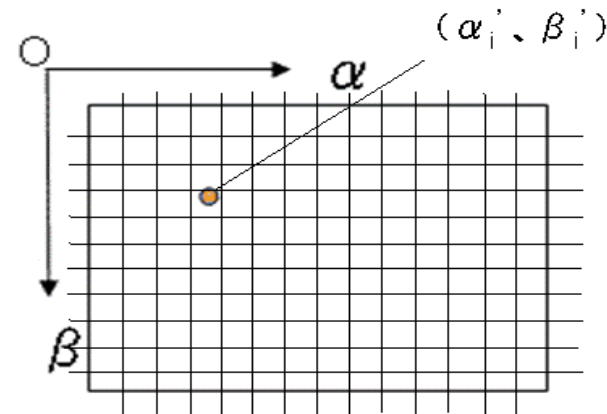
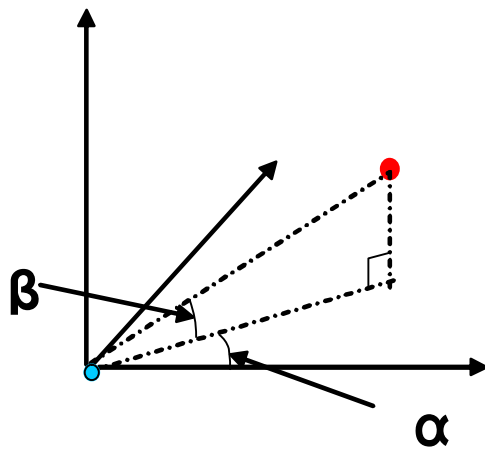
# 計測装置の誤差

- 誤差がある幅で分布する。



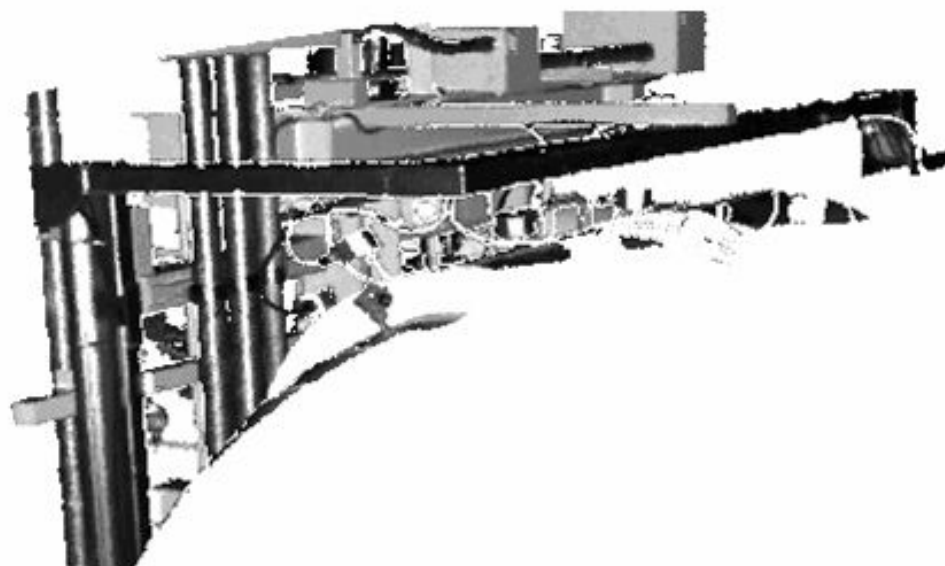
# スキャンデータの特徴

- 3次元座標( $x$ 、 $y$ 、 $z$ )は、極座標( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $d$ )で記述できる。
  - レーザ光の照射角度( $\alpha$ 、 $\beta$ )は機械的に決まり、精度は高い。
  - 奥行き  $d$  は反射波から決まり、精度は低い。



# 二次元平面への投影

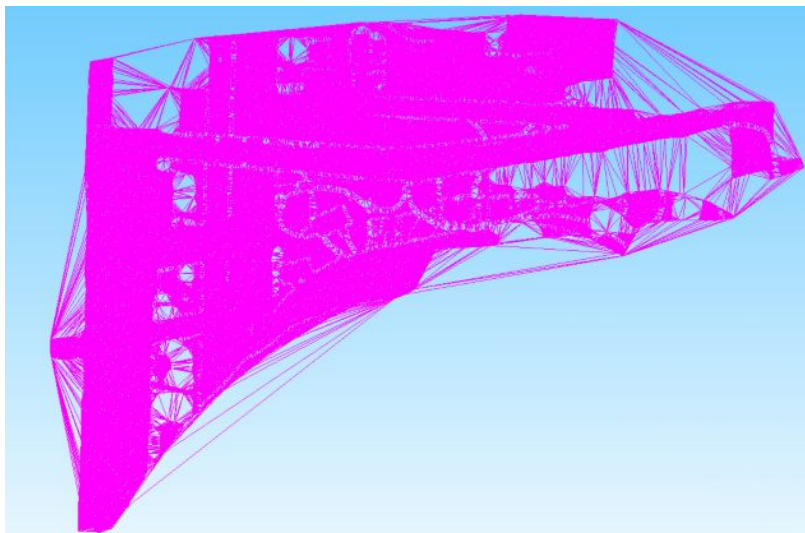
- 精度の高い( $\alpha, \beta$ )平面に投影して考える.



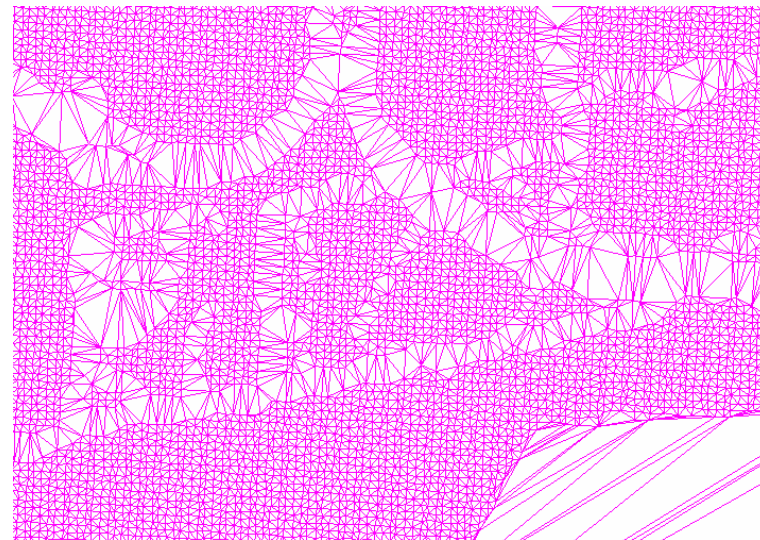
二次元平面への投影

# メッシュの作成

- $(\alpha, \beta)$  の精度は高く, 十分密  
⇒ 投影面上で二次元の Delaunay 分割



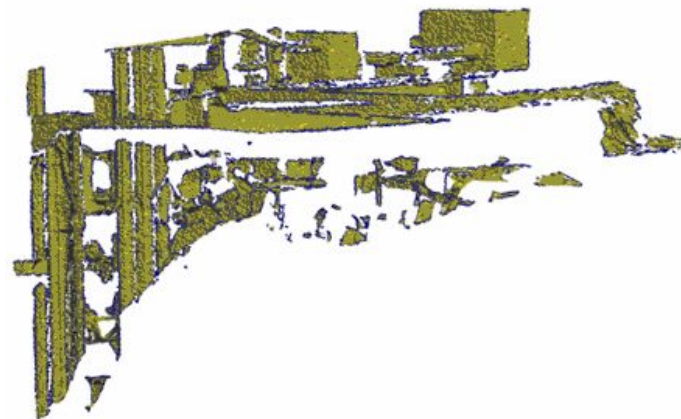
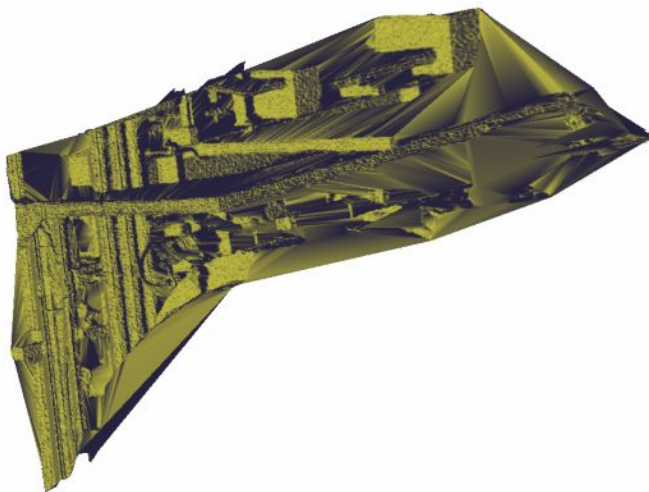
平面上でのメッシュ



拡大図

# 平面から空間へ

- 奥行き情報を復元して、3次元でのメッシュを作成



# 結論1

- **メッシュ生成は可能である.**
- **ノイズ除去は可能である.**
  - **ただし,  $(\alpha, \beta)$ 平面への投影図で考える.**
- **奥行き方向の精度はよくないので注意が必要.**

# 曲面当てはめの精度

- **要求精度を 3mm~5mm とする.**
- **配管の径を知りたい**
  - **点群にもっとよく当てはまる円柱を計算する.**
- **問題**
- **計測点を用いて, 曲面式がこの精度で算出できるか?**



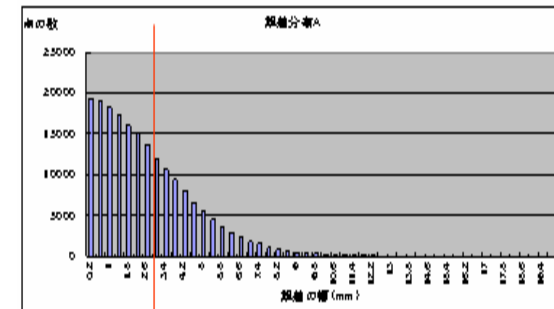
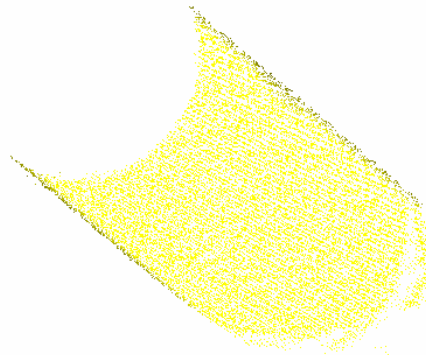
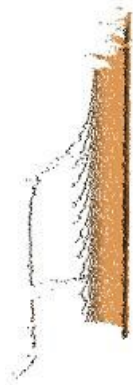
# 検証に使用した例

- 25,703点
- 円柱の半径140.0mm
- 計測原点からの距離6.45m



# サンプリングによるノイズ除去

- **統計的な偏りを利用してノイズを除去する。**
  - ランダムな点を選び、曲面式を計算する。
  - 多数回繰り返して、多数の点が十分近くある曲面式を採用する。



25,703点 → 21,931点 (約15%を除去)

# 当てはめ誤差

- 円筒への最小二乗当てはめ
  - 半径が大きくなり、解は収束せず
- サンプルングによる当てはめ
  - 実際の半径が140.0mmに対して、134.4mm (約1分)
- 組み合わせた手法
  - 半径138.0mm (誤差2mm)



## 結論2

- **多数のノイズ含む場合であっても，設備計測で必要とされる精度：3～5mmを達成できる。**
  - **ただし，ノイズの個数が非常に多いので，十分な配慮が必要。**

# 設備計測に基づくモデリングの可能性

- **前処理**

⇒ ノイズは適切に除去できるのか？ **Yes**

- **メッシュモデルの生成**

⇒ 点群からメッシュは作成できるのか？ **Yes**

- **セグメンテーション**

⇒ 自動セグメンテーションは可能なのか？ **Maybe**

- **曲面当てはめ**

⇒ 曲面当てはめによって、必要な精度は得られるのか？  
**Yes**

**原理的には、技術的障害はあまりない。  
(優秀な人材を引き付ける工夫は必要)**

# まとめ

- **点群計測に基づくモデリングは、低コスト化、期間短縮へのツールとして有望である。**
- **基本的な技術は、機械系CADとCG分野で豊富な蓄積があり、それらを活用できる。**
- **設備モデリング特有の問題(点群モデリングの処理)が存在するが、基本的には解決可能である。**