

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

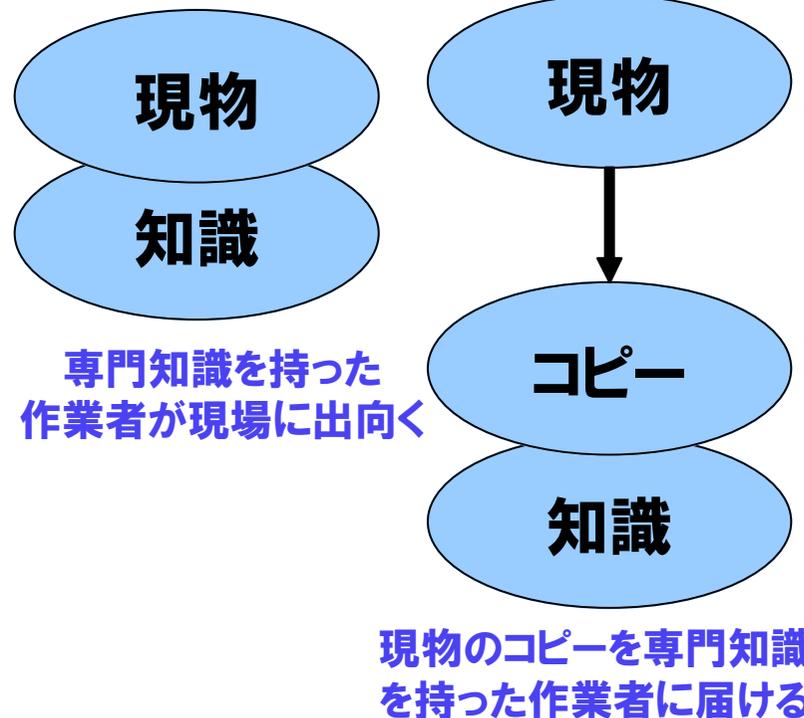
デジタルシミュレーションの利点

● 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

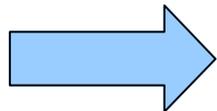
● モデルによる作業の検討.

- 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。**

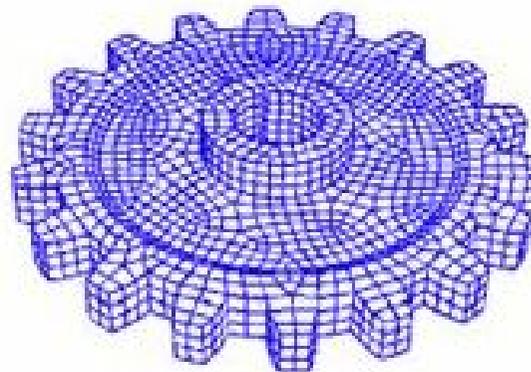
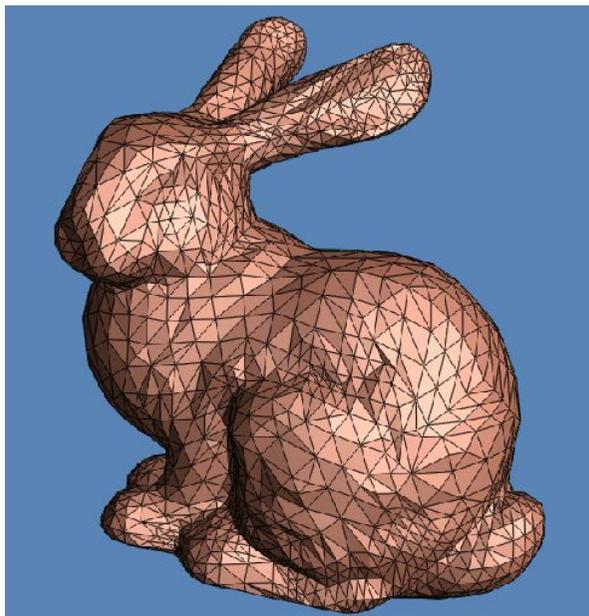


現物の計測による3Dモデルの作成が効率的。

点群を用いた 3Dモデル作成技術の概観

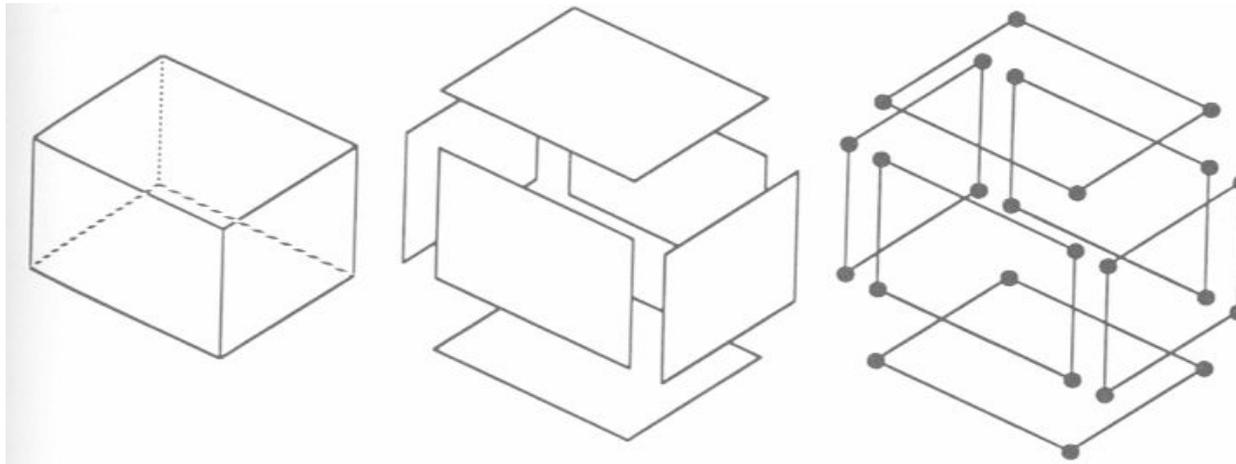
3Dモデルの基礎： メッシュモデル

- 物体表面を三角形や四角形の集まりで表現.



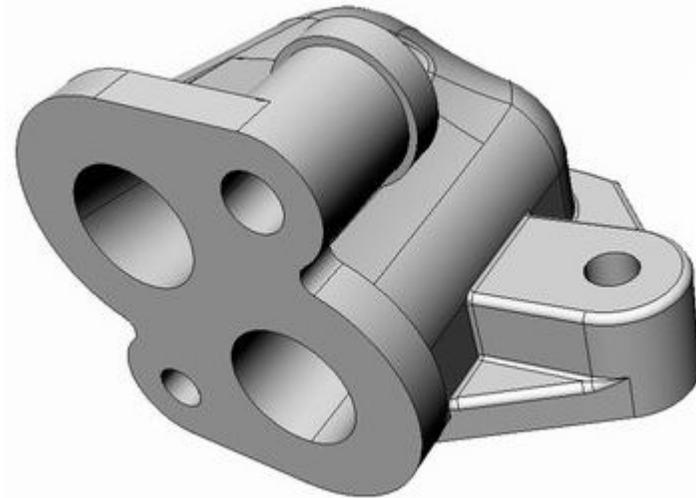
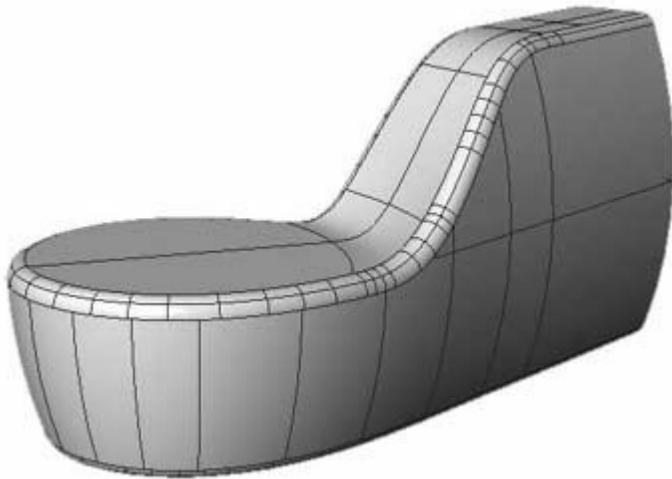
3Dモデルの基礎： ソリッドモデル

- **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.



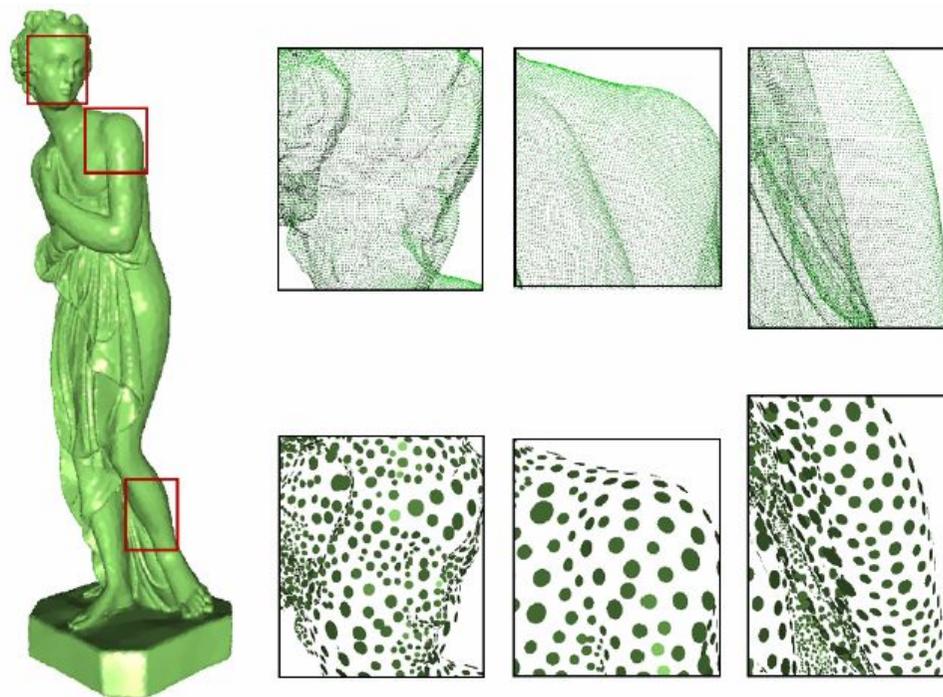
3Dモデルの基礎： 曲面モデル

- **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}



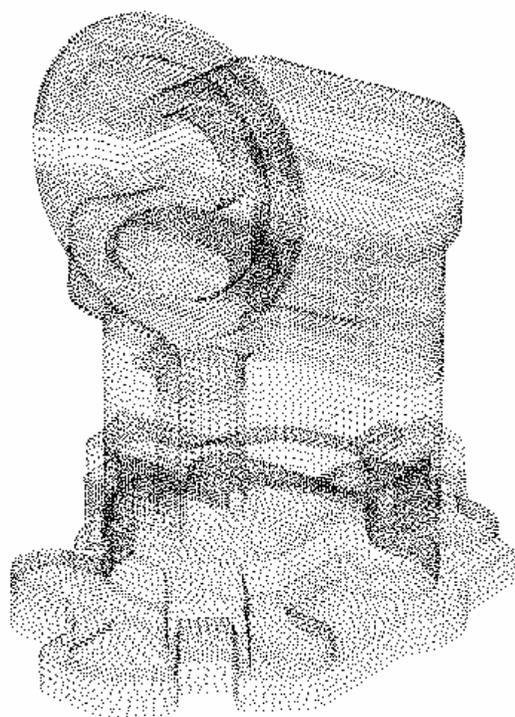
3Dモデルの基礎： ポイントベースモデル

- 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。

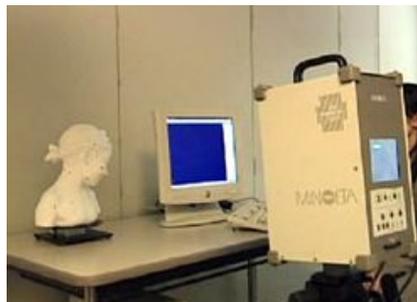


計測方法

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

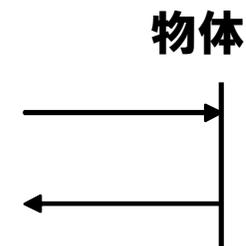
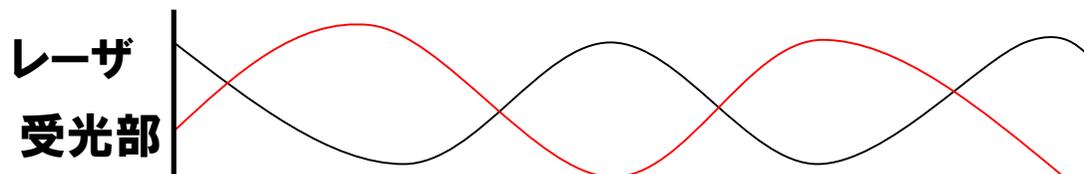
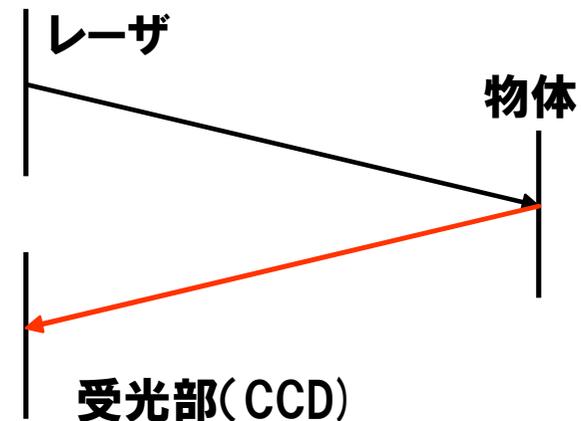


- **位相差**

- 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？

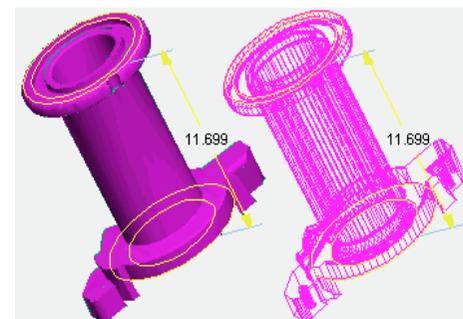
点群計測が活用されてきた分野

必要な知識はどこにあるか？

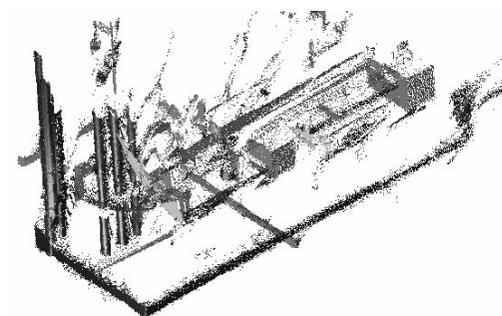
- **機械系CAD**
 - Reverse Engineering
 - 盛んに研究が行われてきた。（機械系, 情報科学系）
- **映像製作（コンピュータグラフィックス）**
 - As-Built や Reverse Engineering という用語を使うことは少ない
 - 非常に盛んに研究が続けられている。（情報科学系）
- **大型構造物のモデリング**
 - As-Built Modeling
 - 学術研究は比較的少ない。

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



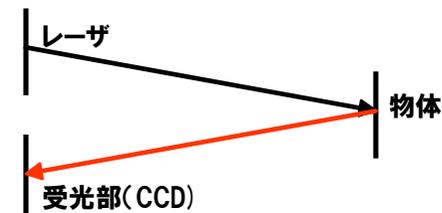
~10cm



~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

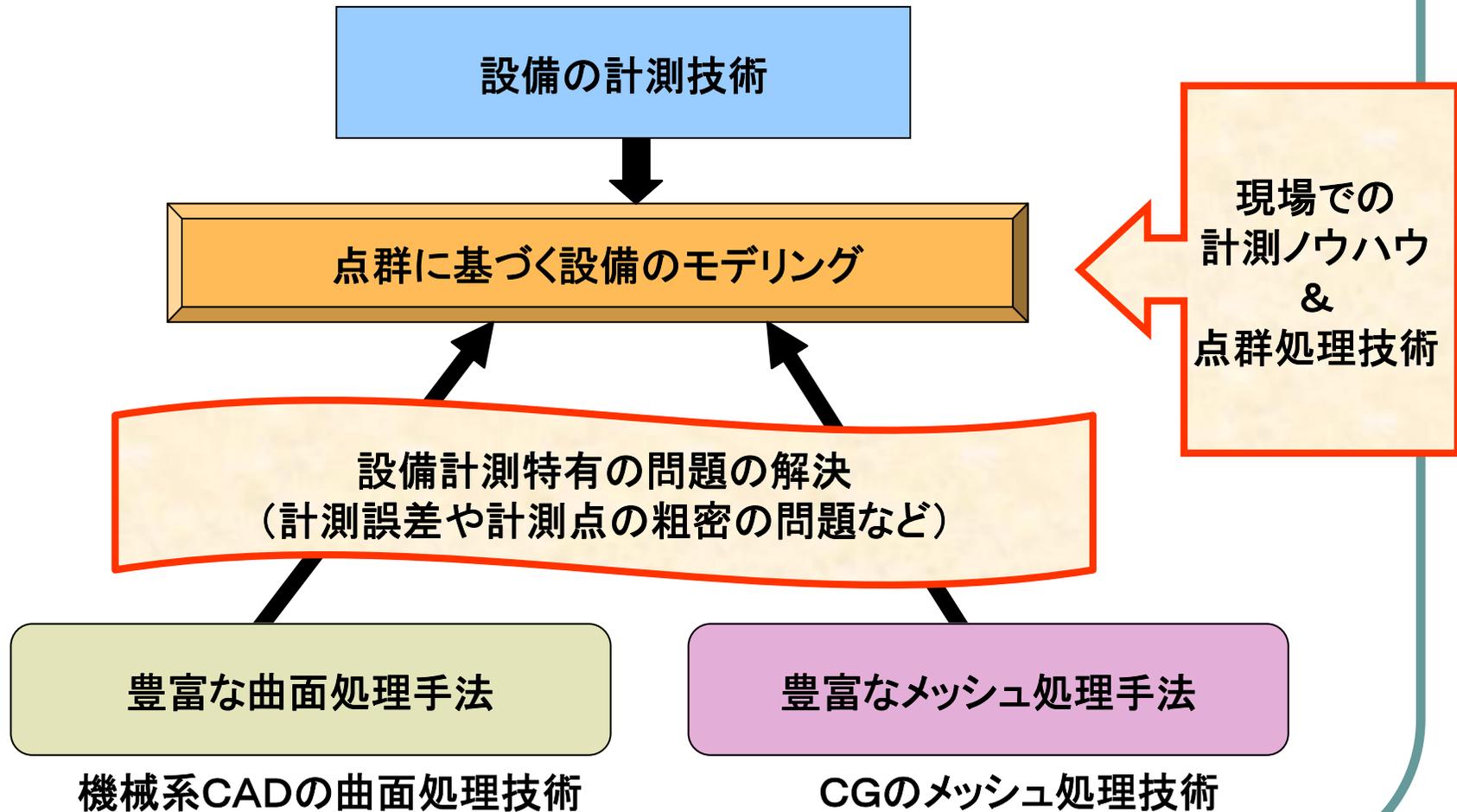


現状では, 機械系CADやCGの商用ツールを,
設備計測にそのまま利用するのは難しい.

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 | 標準部品 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 | 滑らかな自由曲面 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、 不規則な形状 。 | 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

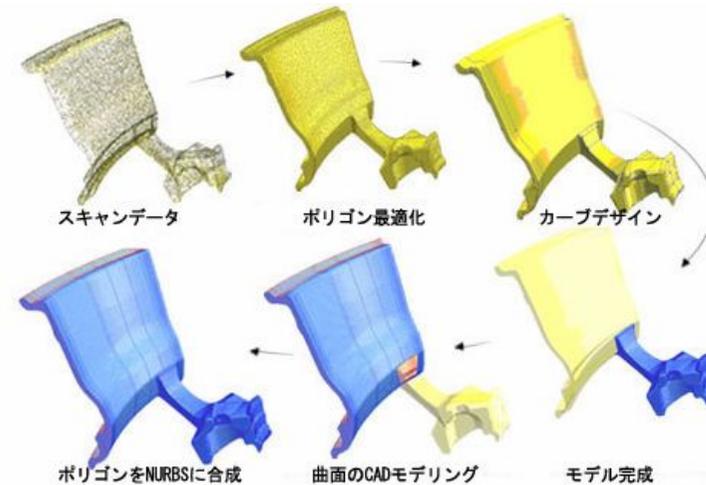


異なる領域の知識やスキルを融合する。

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

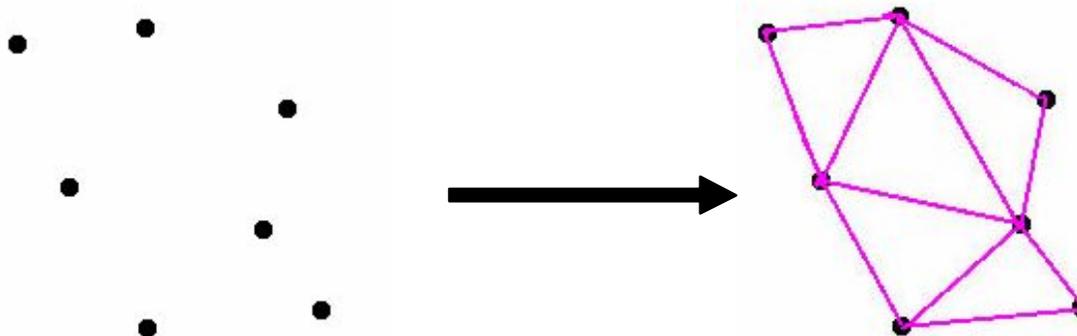
- **計測範囲**
 - 53m
- **計測時間**
 - 2億点を約6分
- **方式**
 - 連続waveレーザ方式



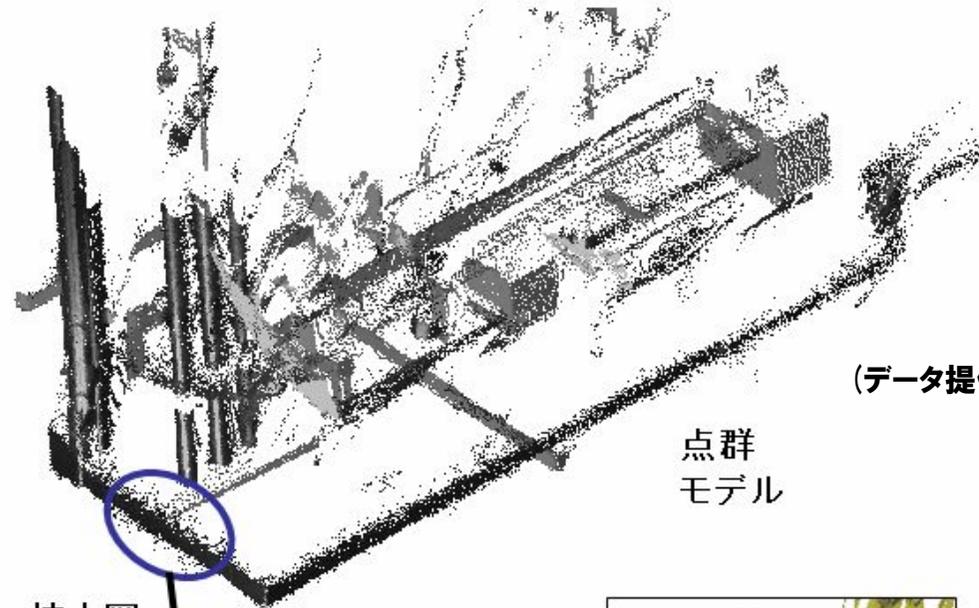
Z+F社

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。



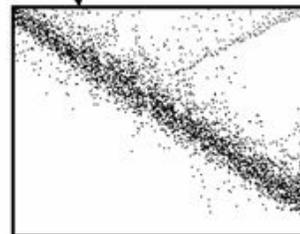
大型設備のレーザスキャンデータ



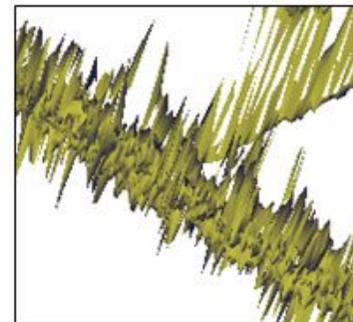
(データ提供:辰星技研)

点群
モデル

拡大図



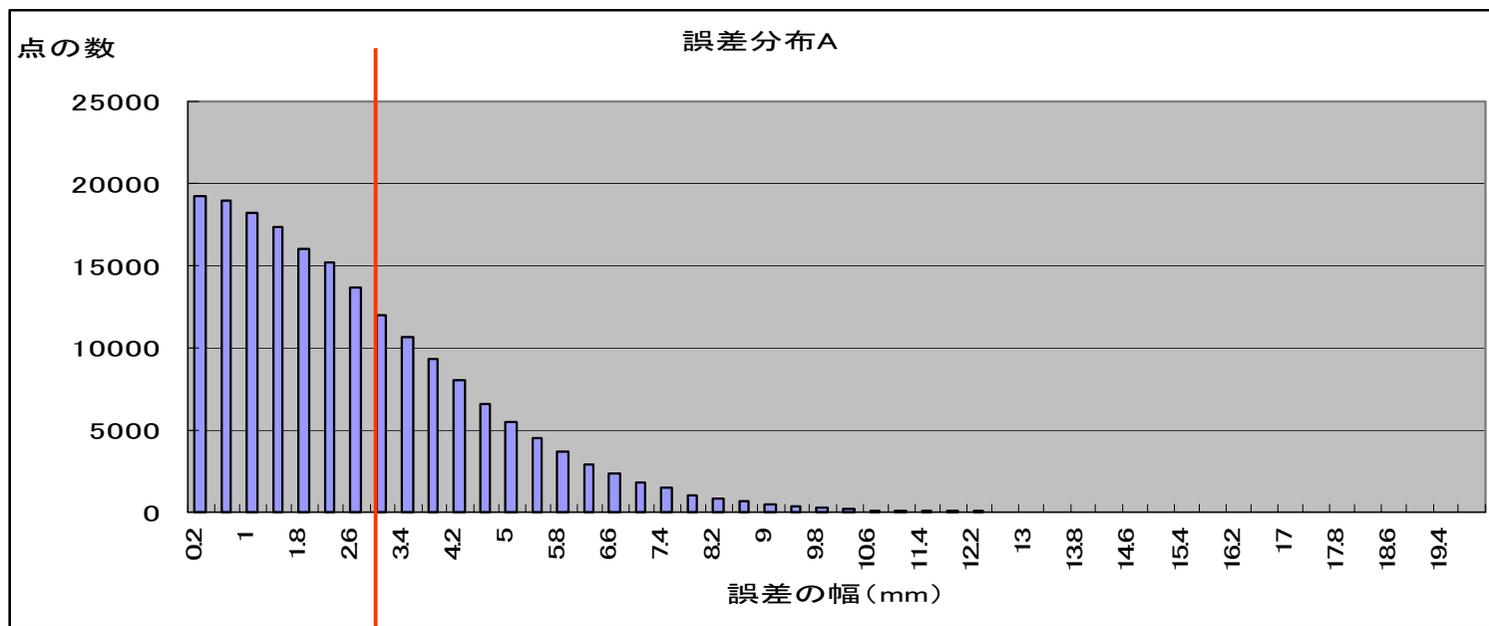
メッシュ化



ノイズの比率が大きい

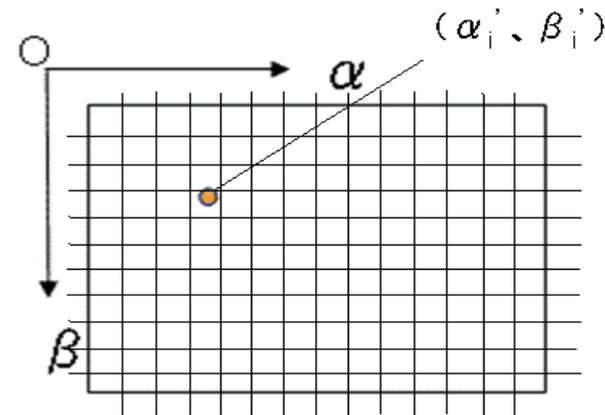
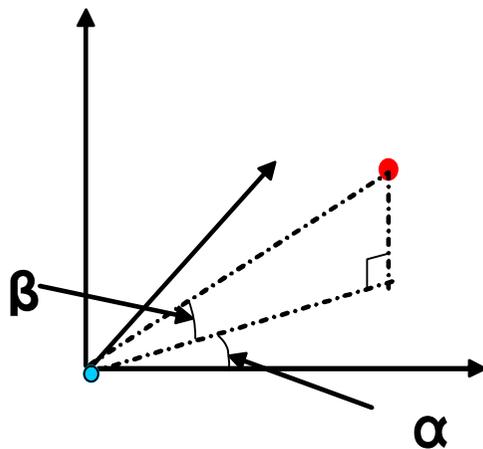
計測装置の誤差

- 誤差がある幅で分布する。



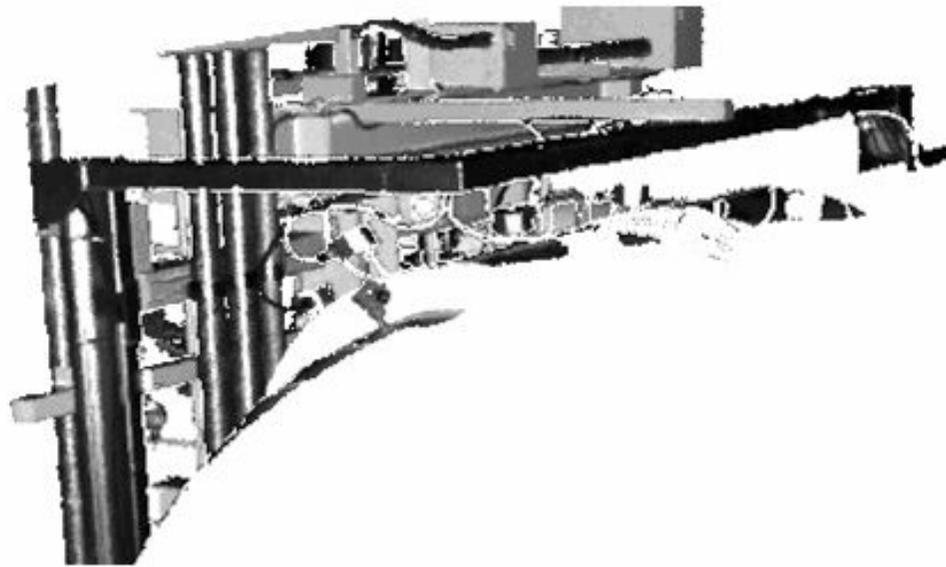
スキャンデータの特徴

- 3次元座標(x 、 y 、 z)は、極座標(α 、 β 、 d)で記述できる。
 - レーザ光の照射角度(α 、 β)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

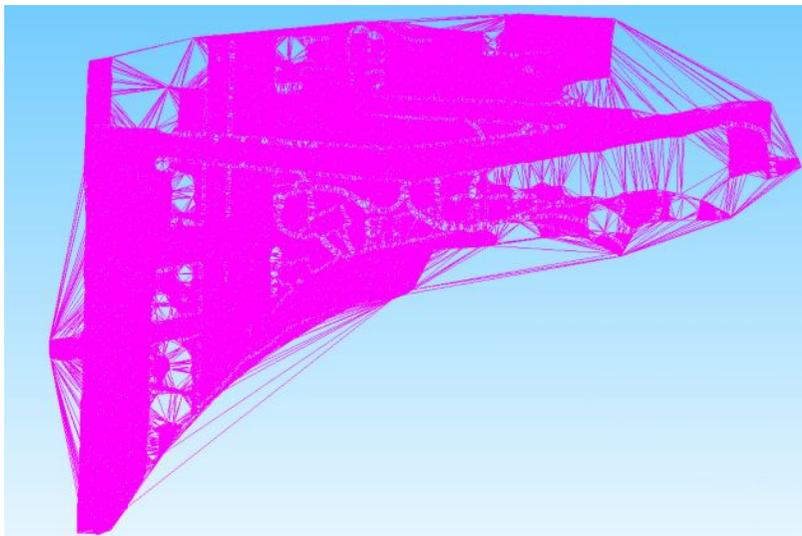
- 精度の高い(α, β)平面に投影して考える.



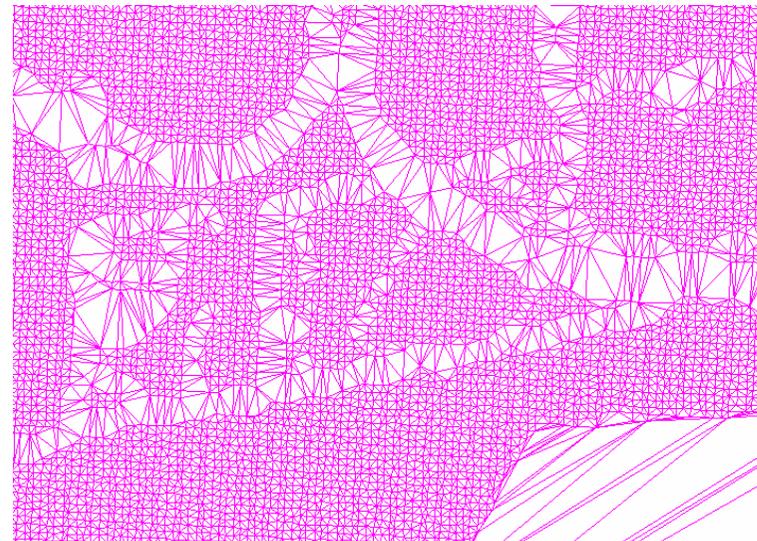
二次元平面への投影

メッシュの作成

- (α, β) の精度は高く, 十分密
⇒ 投影面上で二次元の Delaunay 分割



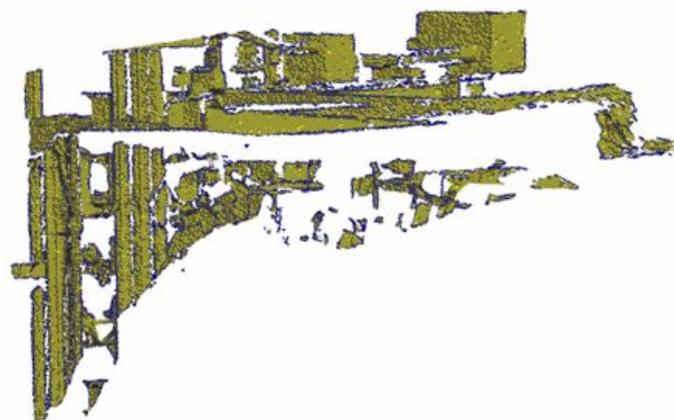
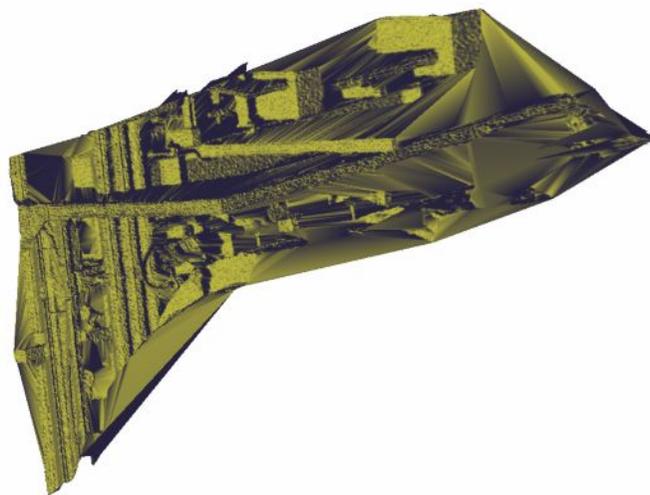
平面上でのメッシュ



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

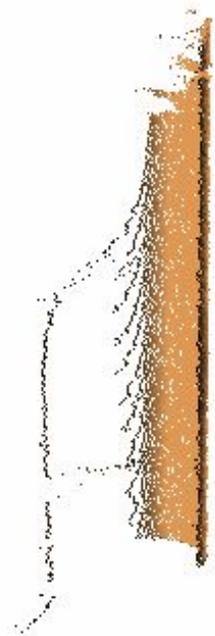
- **メッシュ生成は可能である.**
- **ノイズ除去は可能である.**
 - **ただし, (α, β) 平面への投影図で考える.**
- **奥行き方向の精度はよくないので注意が必要.**

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?**

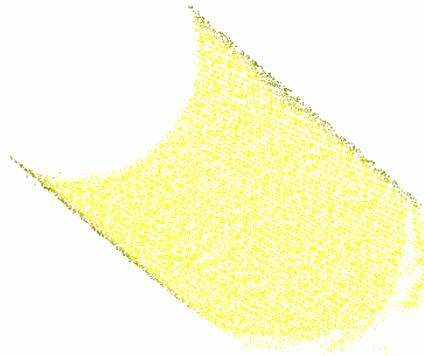
検証に使用した例

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

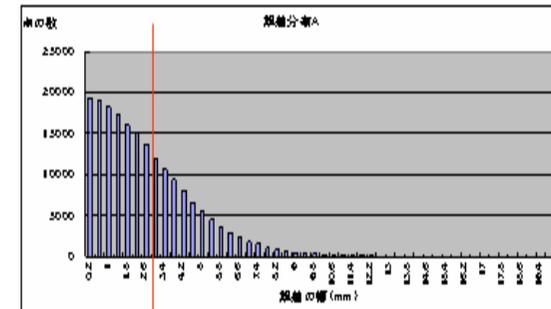


サンプリングによるノイズ除去

- **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。**