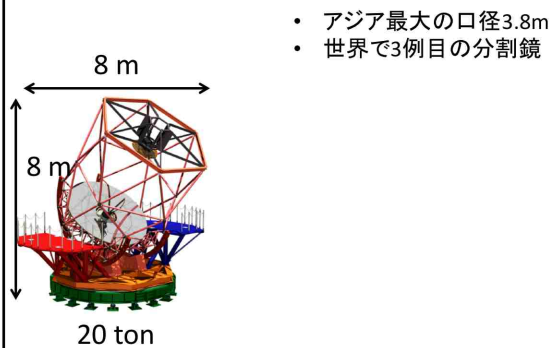


3.8m望遠鏡での ものづくり

栗田光樹夫
京都大学
170928
近畿地区技術職員研修



3.8m望遠鏡の概要



技術の要約

- 精密加工
- 精密計測
- 微小振動の制振
- 多入出力精密制御
- 構造の最適化
- データ処理

鏡加工

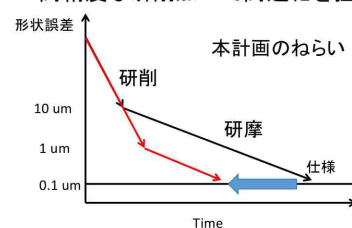


問題
このような加工と計測
技術は国内にない

研削と研磨

- 一般的には研削加工のあとに研磨加工
- 研削加工: 砥石で削るため、速いが、荒い
- 研磨加工: 遅いが、滑らか

高精度な研削加工で高速化を狙う



Mirror Factory

- ペンチャー企業を立ち上げ設立
- 超精密研削加工を用いた高精度な鏡面加工技術の確立を目指す

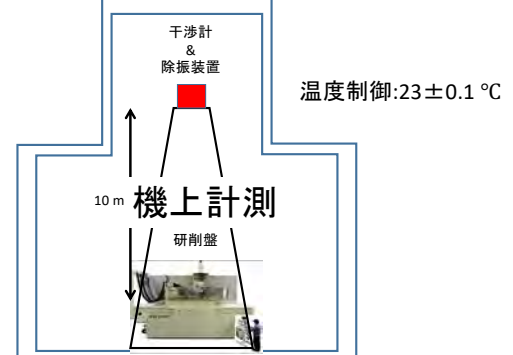


Facility
Astroaero Space Inc.



研削盤
(N2C-1300D)

施設の概要

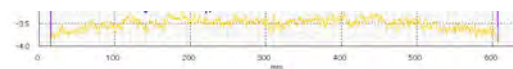


研削盤の加工性能

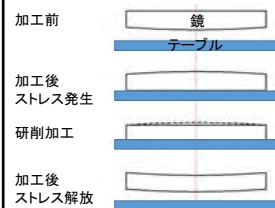
- 大きさ: $\Phi 610$
- 形状: 平面
- 材料: クリアセラム
(ゼロ膨張材, OHARA)
- 加工時間: 数時間



形状誤差 P-V = $0.4\mu\text{m}$



キネマティックサポート

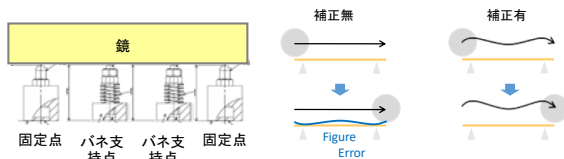


問題
せっかくの高精度加工
がこのままでは役に立
たない。

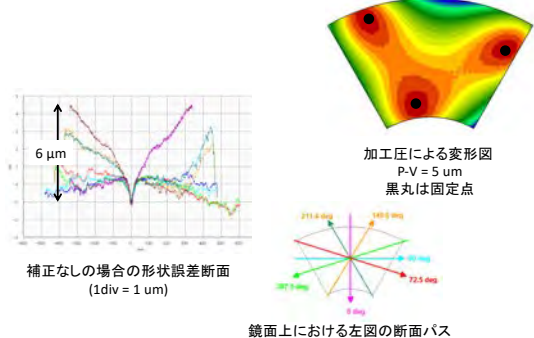
薄くて大きな鏡を直接加工機に載せて加工すると、裏面の形状不一致によりストレスが生じ、加工後に大きく変形する、という問題が発生

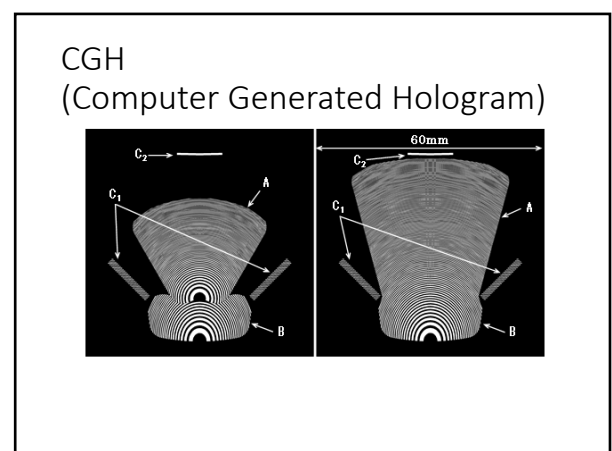
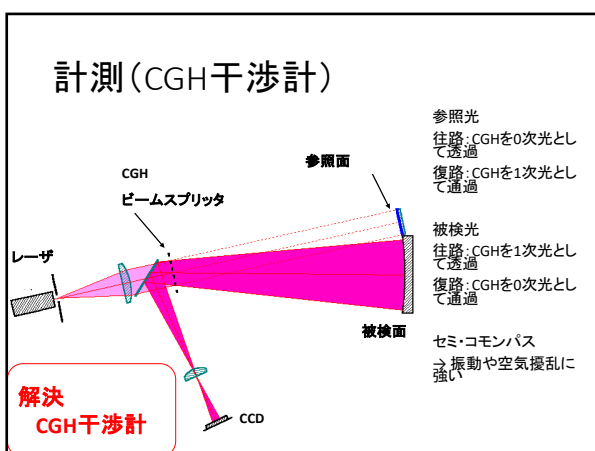
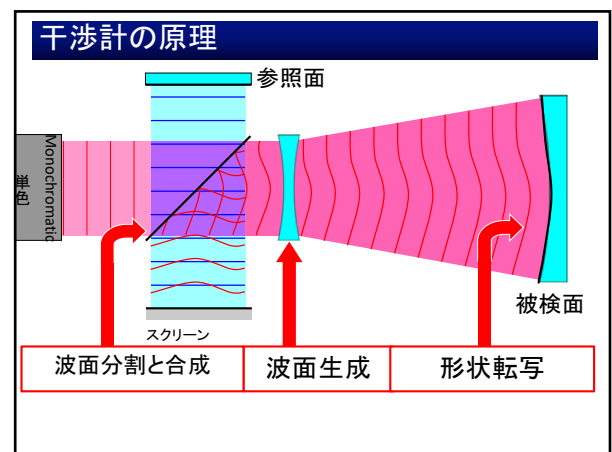
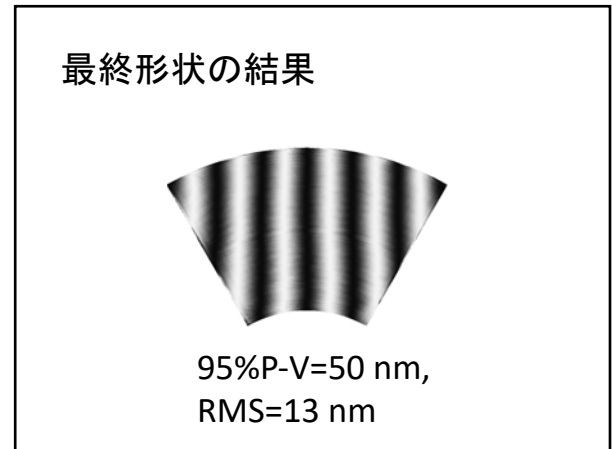
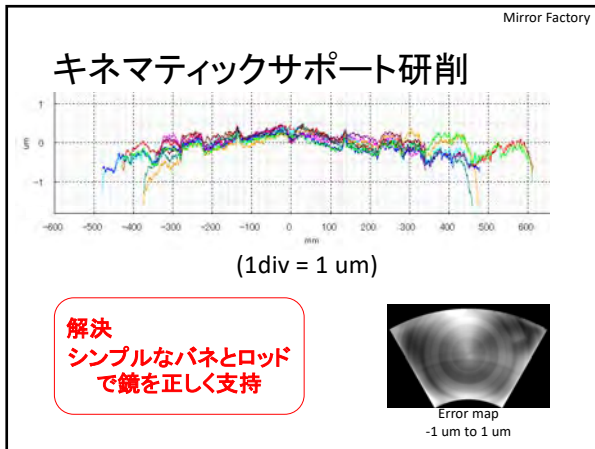
キネマティックサポート

- 過拘束のない3個の固定点
- 静圧受けのための24個のバネ支持点
- 鏡は浮いたような状態で加工されるため、裏面の形状誤差は不問となる。



キネマティックサポート研削





計測(CGH干渉計)

・機上計測により、安定で、迅速なフィードバック

・再現性:

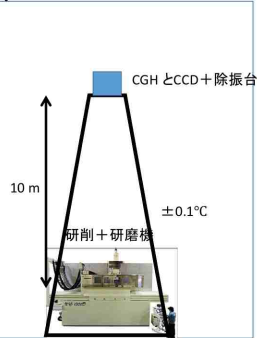
RMS=10 nm

・精度:

RMS= 15 nm

問題

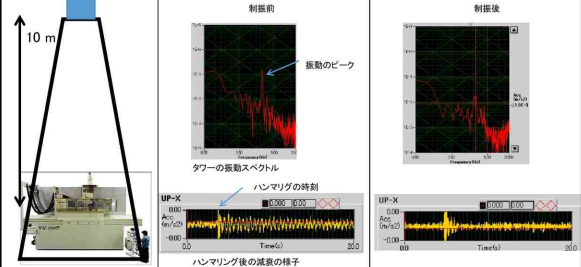
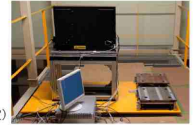
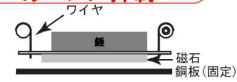
当初、タワーが数ミクロン揺れ、計測できなかった。



制振

磁気ダンパ
振幅 < 1μm

解決
磁石と振り子で振動をサブミクロンに抑制



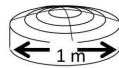
計測(3点法)

・要求仕様

・形 : 凸面と平面

・大きさ : ~1 m

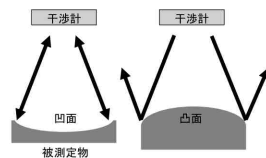
干渉計が得意な形状



自由曲面を計測できる測定器が必要

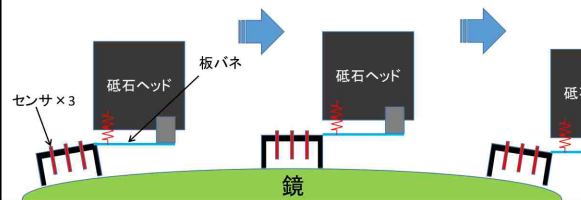
問題

干渉計では副鏡の計測が困難



計測(3点法)

3つのセンサが直接被検面を走査



計測(3点法)

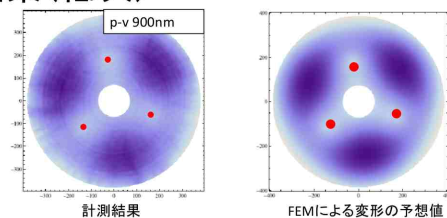
φ800 mm 球面鏡

リニアステージでセンサを引きずる

走査するごとに鏡を回転させ合計60本計測



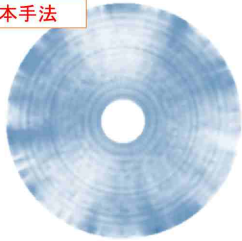
結果(低次)



赤丸の3点を支持点として鏡をわざと歪めて計測。

結果(高次)

本手法



前項の左図から右図を引いた結果
(理想的な支持状態での形状誤差)

干渉計

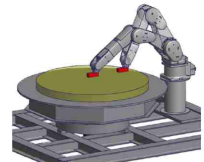
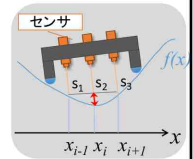


理想的な支持状態での干渉計による結果

※三つ葉パターンの引き残しがある。これは解析と計測時の支持点の差によるものと考えられる。

利点

- 十分な精度
- 単純な測定原理
 - 高精度な運動機構が不要
 - 低コスト
- 環境に強い
- 自由形状が計測可能
- 測定範囲が無制限
 - 大型の鏡に対応
- 机上計測をコンパクトに実現

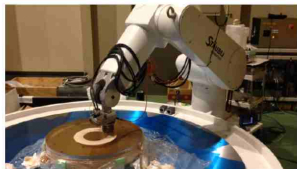
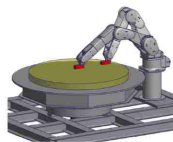


- 不利点
- 低空間分解能

ロボットアームと研磨機

メーカー: STAUBLI (スイス)

自由度: 6軸 + ターンテーブル1軸

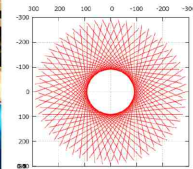
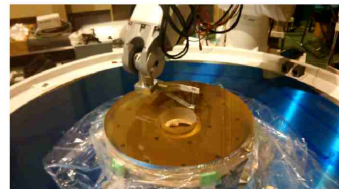
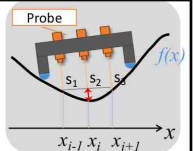


Φ600の鏡とロボットアーム
アストロエアロスペース

ロボットアームと計測

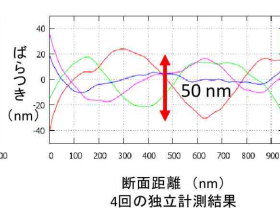
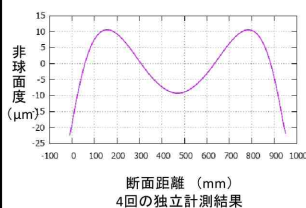
計測原理: ひきずり3点法

ロボットのヘッドの先にプローブを交換取り付け

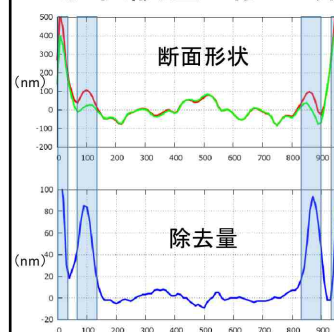


6度おきに60本の計測

計測結果と再現性Φ1000



形状誤差と修正研磨



- 周辺部を除き
P-V ~ 150 nm
RMS ~ 50 nm
- 軸対称性の高い形状誤差
→ 軸対称加工のため
→ 一部を修正研磨し改善
- 上記サイクルを1日で実現
- 日をまたいでも 10 nm レベルの計測再現性

非接触化へ



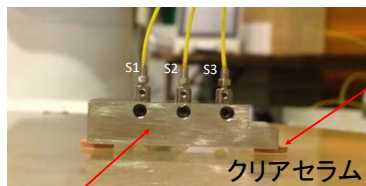
キーエンス SI-F
振動に弱く非接触計測できず



Attocube FPS
振動に強いが周期誤差が大きい
(周期誤差は平均しても解決しない)

Experiment

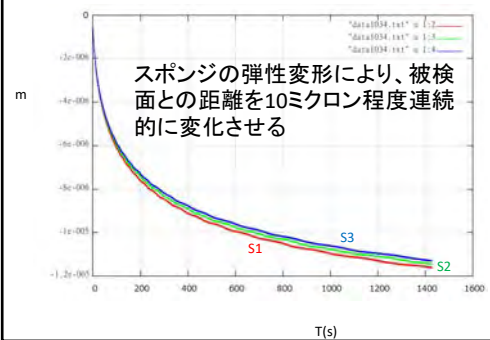
3つのセンサで被検面の曲率をモニタ



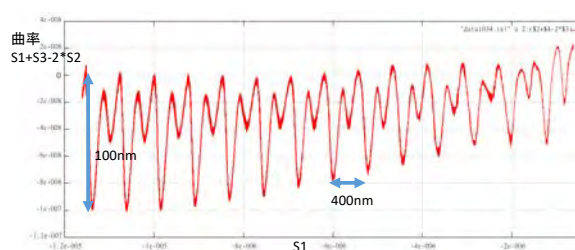
インバーブロック

スポンジ

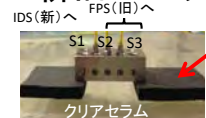
クリアセラム



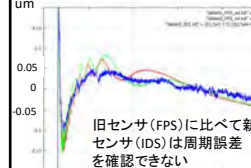
周期400nm(使用波長の1/4)で強度100nmの周期誤差を確認(この間被検面の曲率は一定なので)



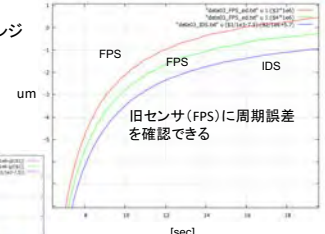
新旧センサの比較



スポンジに押さえつけて離し、滑らかな変位を行う



適当な滑らかな関数からの残差

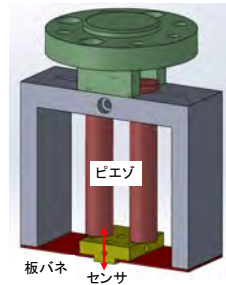


センサの出力結果

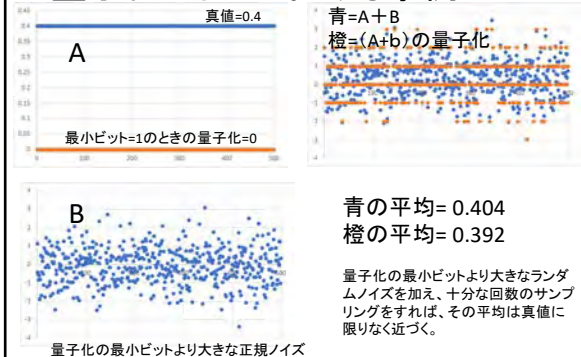
新センサ(IDS)のばらつきが大きいのはサンプル時間が40usとFPSに比べて1024倍短く、細かな振動を捉えているため

加振装置

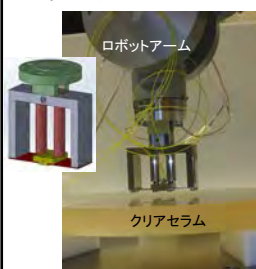
- 周期誤差の強度より十分大きな外乱振動を加え、十分な数のサンプリングを行うことで誤差の抑制を図る
- ピエゾ素子により任意の波形の振動をセンサに加える
- ただし、板バネによる固有振動数=734Hzまで



量子化ノイズにおける事例



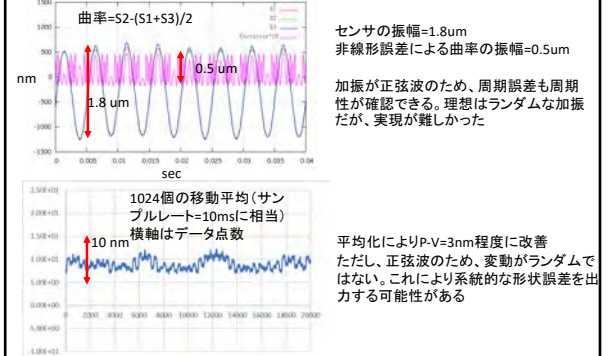
実験



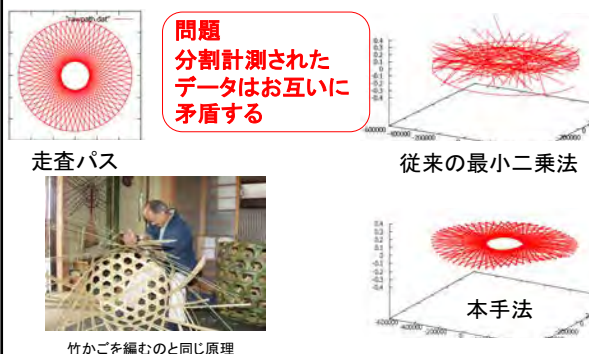
実験の様子

使用センサ: FPS (旧センサ)
サンプル周期: 10.24us
定点計測: 曲率は一定値を示すことが理想

結果

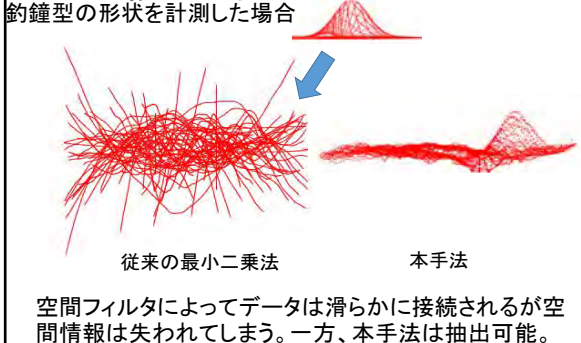


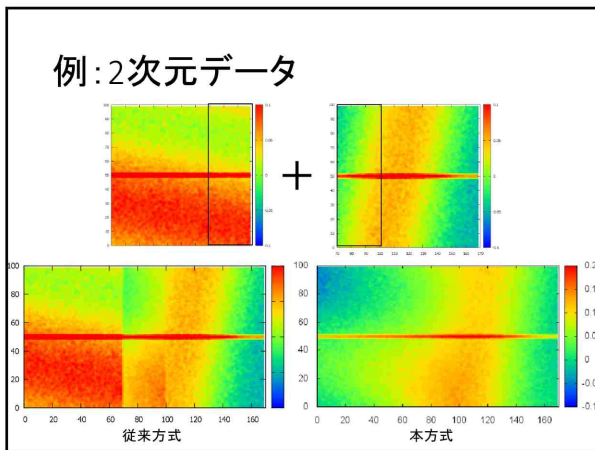
データ処理



局所構造の抽出

釣鐘型の形状を計測した場合





3.8m望遠鏡の分割主鏡

I主鏡全体

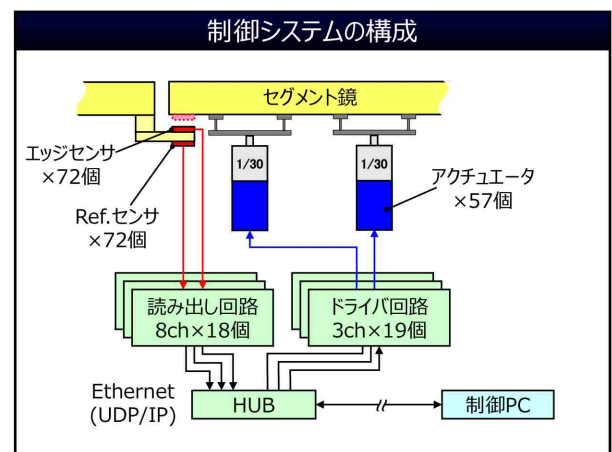
- 口径 : 3.78 m
- 曲率半径 : 10 m
- 表面形状 : 双曲面
- 分割数 : 内周6 + 外周12

IIセグメント鏡

- 大きさ : 対角~1.2 m
- 重さ : 約70 kg
- 設置精度 : rms ≤30 nm

III外乱

- 架台の重力変形・熱変形 : ~100 μm
- 風圧 : 300 nm @1 Hz
8 nm @10 Hz



主鏡制御の開発項目

I非干渉化行列 ・導出 (18枚) ・誤差伝播の評価 (18枚) IIアクチュエータの伝達関数 ・特性の測定 III支持構造の伝達関数 ・機械設計 (内周リング・内周・外周) ・特性 (静的・動的) の測定 IVセンサモデル ・特性の測定	I制御システムモデル構築 ・制御ソフトの作成 II制御・通信システムの入手 ・制御用計算機 ・アクチュエータドライバ ・センサ読み出し回路
---	---

↓

IV実機 (or 単純化モデル) で動作検証

駆動構造

Iアクチュエータ

ステッピングモータ + 樹脂潤滑の送りねじ

ストローク : 30 mm
分解能 : 3 μm/フルステップ

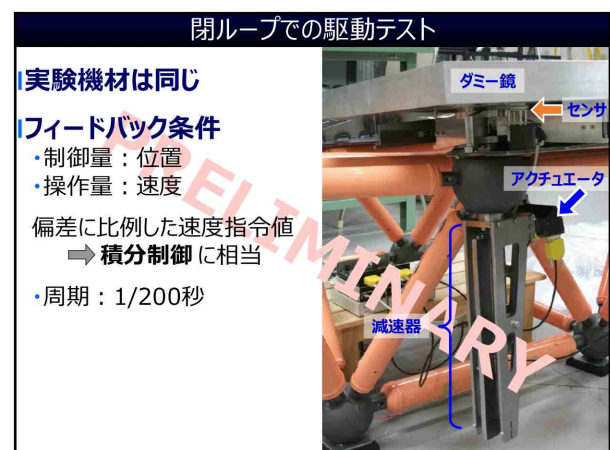
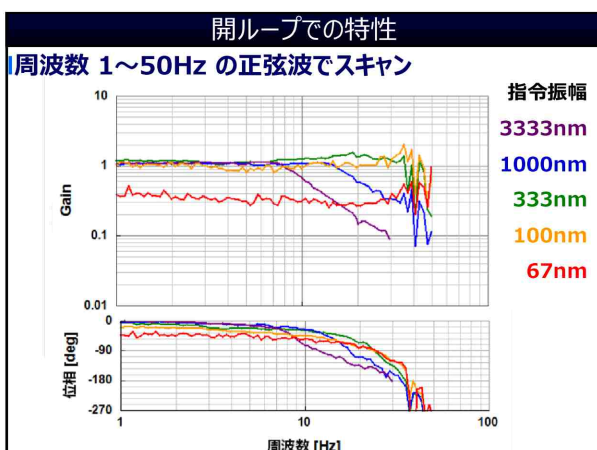
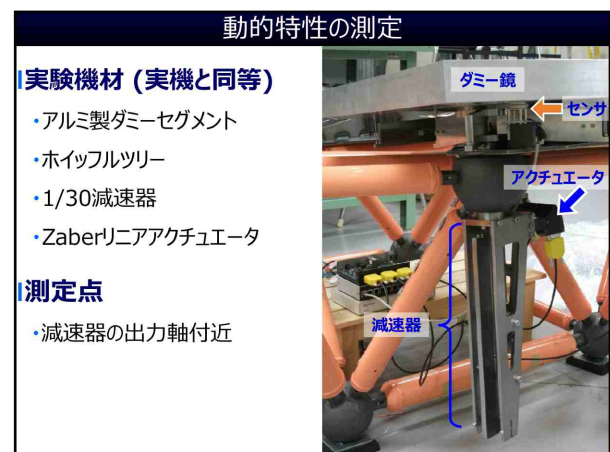
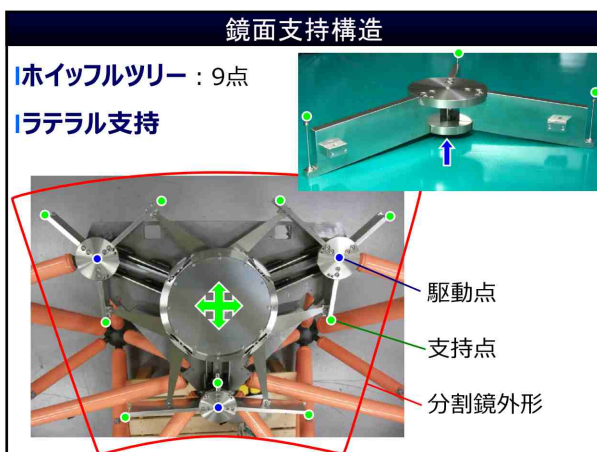
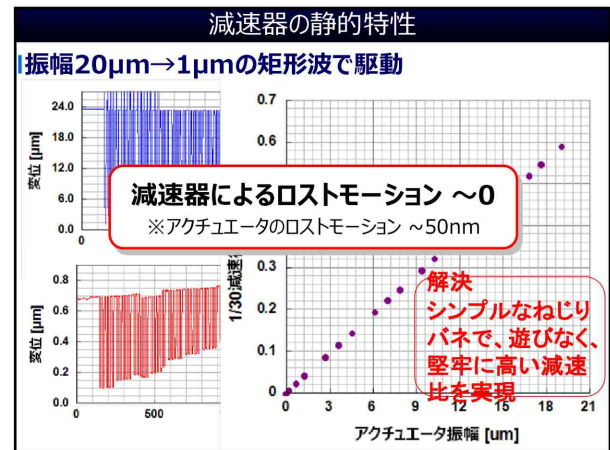
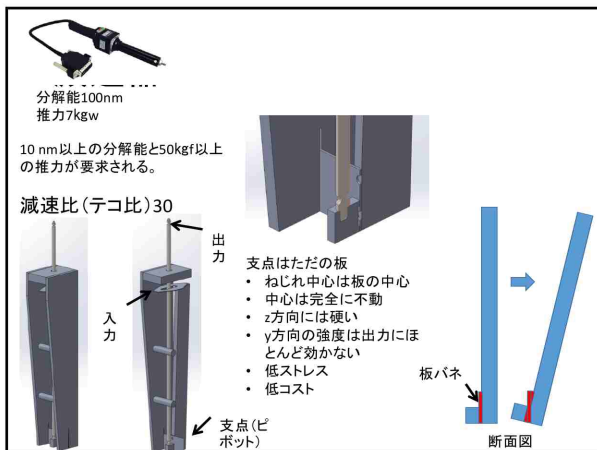
II減速機

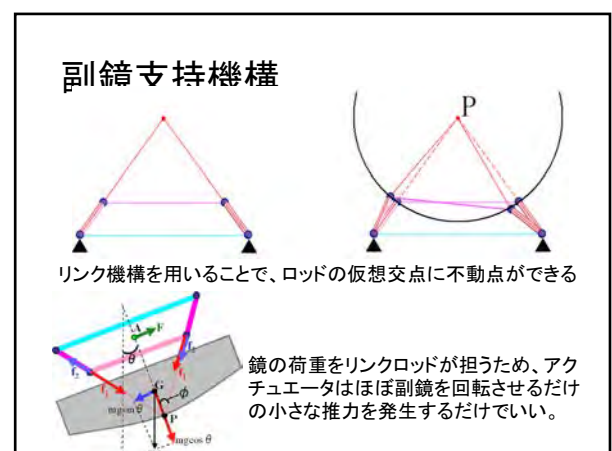
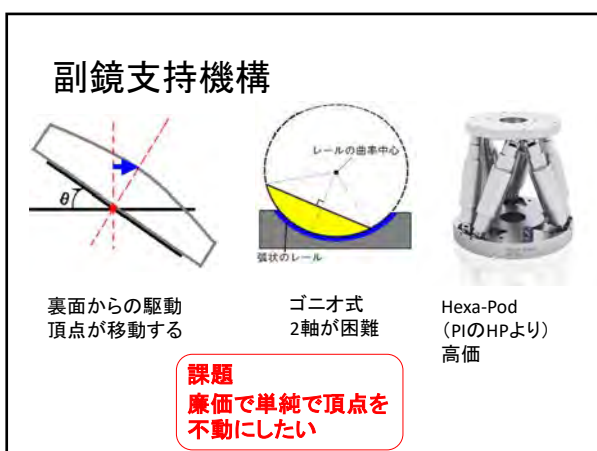
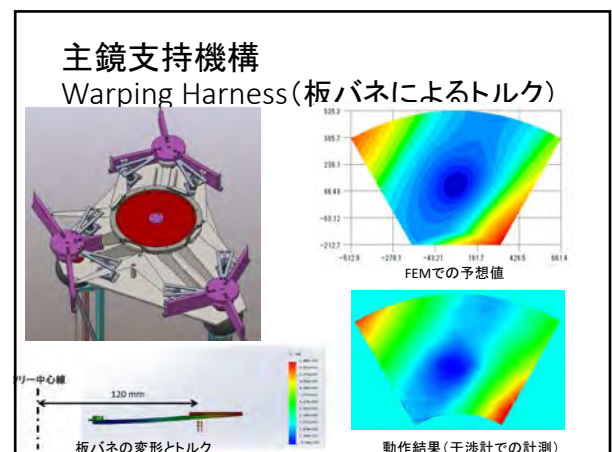
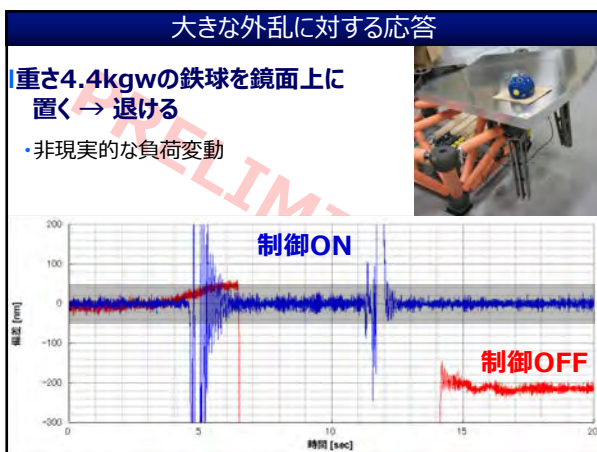
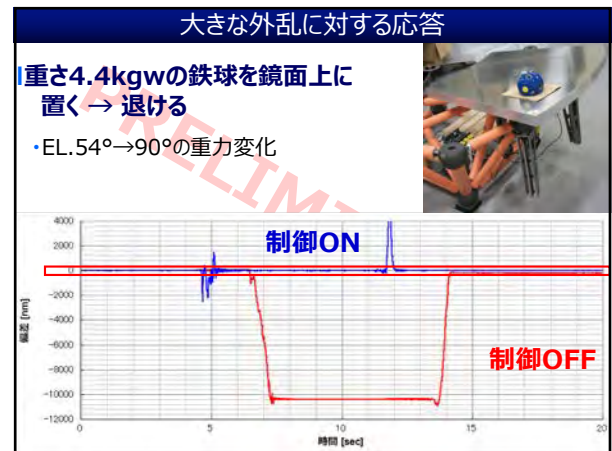
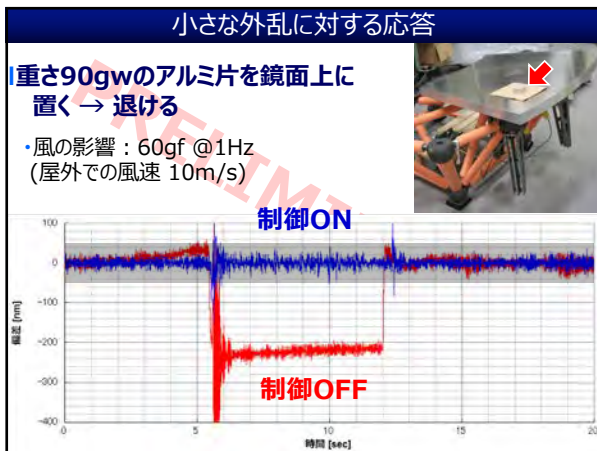
弾性変形を使ったデコで1/30に減速

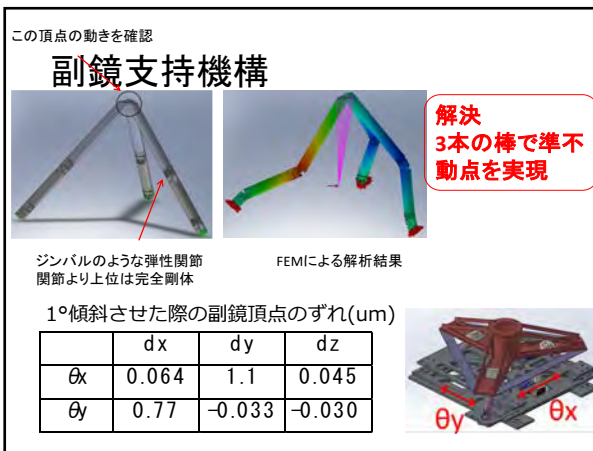
ストローク : 1.0 mm
分解能 : 100 nm/フルステップ

課題

アクチュエータの推力と分解能が足りない。







Lightweight Structure

軽量な構造

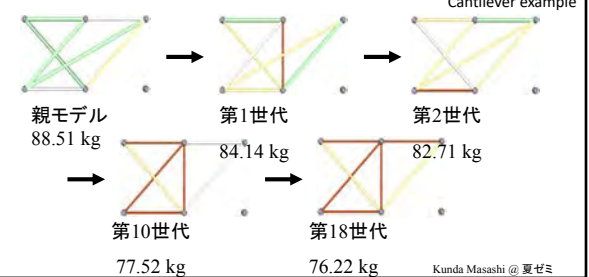
- 突発天体のための高速駆動
 - 軽量で固い構造
 - 巨大な円弧状の高度軸
 - トラス構造
 - ホモロガス変形と遺伝的アルゴリズム

鏡筒の重量は従来の1/5に



遺伝的アルゴリズムによる最適化

遺伝的アルゴリズムとは、最適化問題への数値解析手法のひとつ。相反する複数の目的から最良の解を探索する際に、モデルが生命のように選択、交叉、突然変異をしながら進化する。



遺伝的アルゴリズムによる最適化

ホモロガス性能の要求 (仰角: 88~20 度)

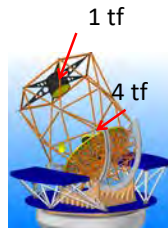
- M1用の節点変位 <0.1 mm
- M2用の節点変位 <0.4 mm
- M3用の節点変位 <0.05 mm

設計変数

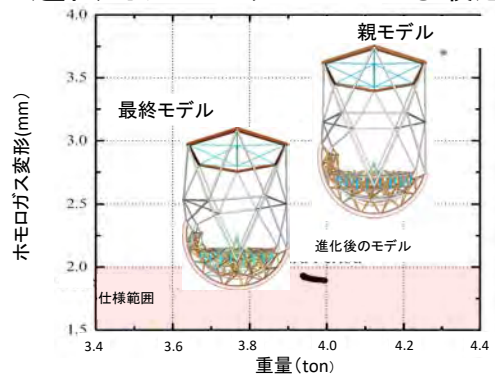
- 接点の位置 (削除も含む)
 - パイプの断面積 (削除も含む)
- JISからの未選択

交叉レート: 0.8

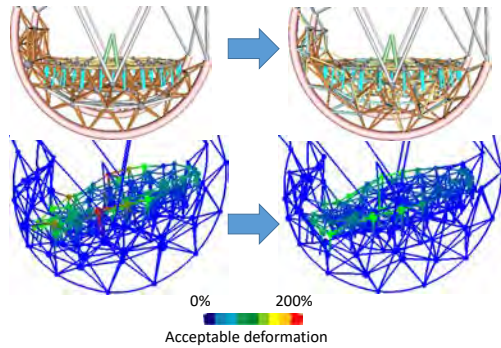
突然変異レート: 0.01



遺伝的アルゴリズムによる最適化



遺伝的アルゴリズムによる最適化



参考資料

<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/kentoukai.html>

