

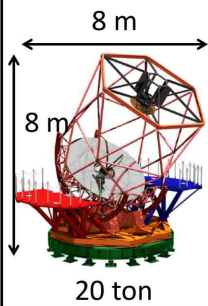
3.8m望遠鏡でのものづくり

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

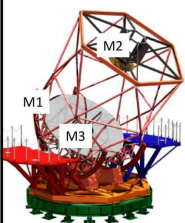
- アジア最大の口径3.8m
- 世界で3例目の分割鏡



技術の要約

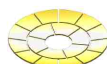
- 精密加工
- 精密計測
- 微小振動の制振
- 多入出力精密制御
- 構造の最適化
- データ処理

鏡加工



	形状	曲率半径	大きさ	枚数
主鏡	軸外し非球面	凹面 5000mm	~1m	6/12
副鏡	非球面	凸面 -1667mm	~1m	1
第三鏡	平面	平面	~1m	1

面精度: $\lambda/20 \approx 30 \text{ nm}$



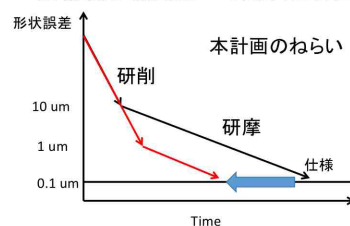
問題

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

- ベ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

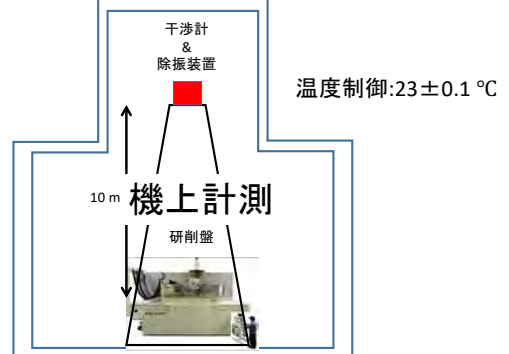


Facility
Astroaero Space Inc.



研削盤
(N2C-1300D)

施設の概要

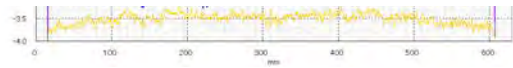


研削盤の加工性能

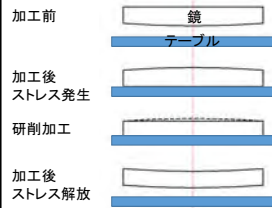
- 大きさ: Φ610
- 形状: 平面
- 材料: クリアセラム (ゼロ膨張材, OHARA)
- 加工時間: 数時間



形状誤差 P-V = 0.4 μm



キネマティックサポート

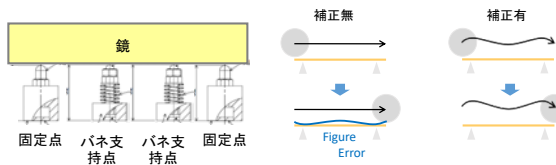


問題
せつかくの高精度加工がこのままでは役に立たない。

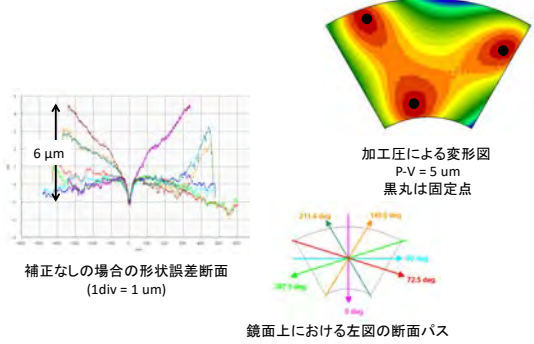
薄くて大きな鏡を直接加工機に載せて加工すると、裏面の形状不一致によりストレスが生じ、加工後に大きく変形する、という問題が発生

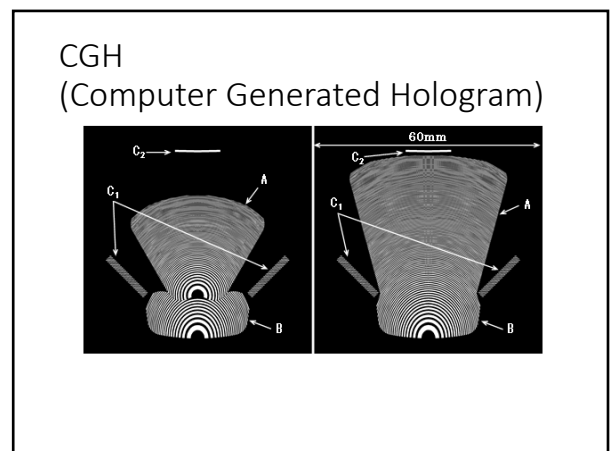
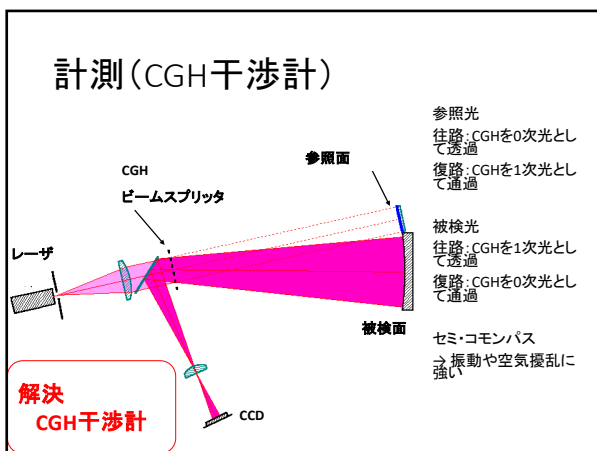
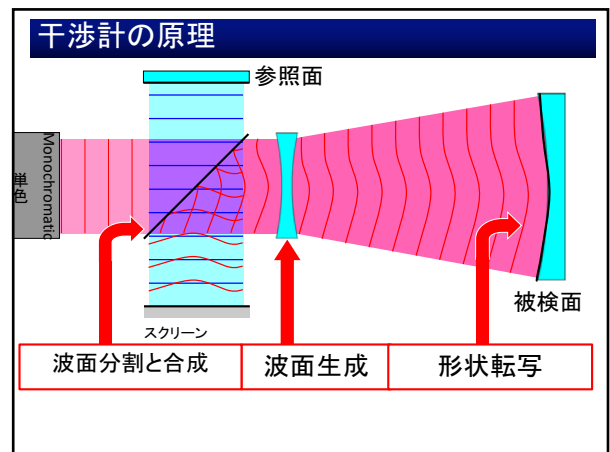
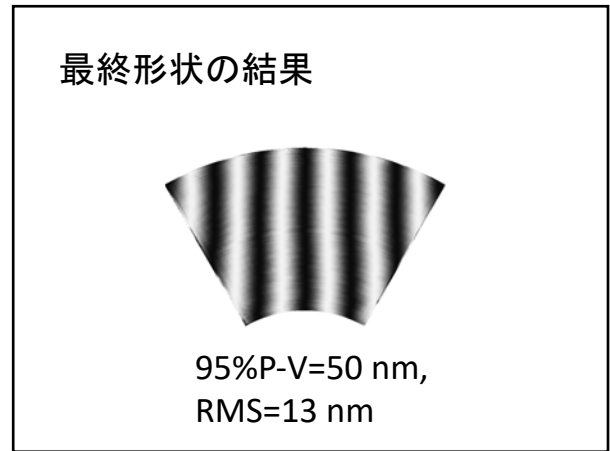
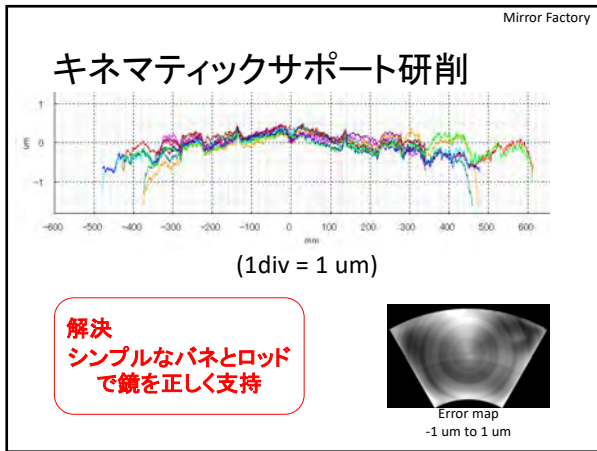
キネマティックサポート

- 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。



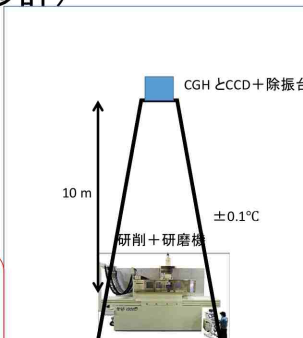
キネマティックサポート研削





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



10 m

CGHとCCD+除振台

±0.1°C

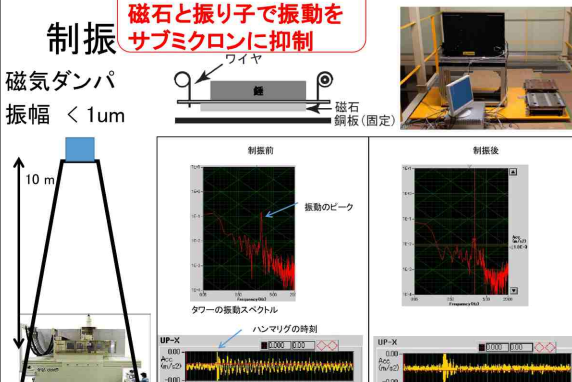
研削+研磨機

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

解決
磁石と振り子で振動をサブミクロンに抑制

磁気ダンパ
振幅 < 1μm



ワイヤ

磁石
銅板 (固定)

10 m

制振前

振動のピーク

制振後

タワーの振動スペクトル

ハンマリングの時刻

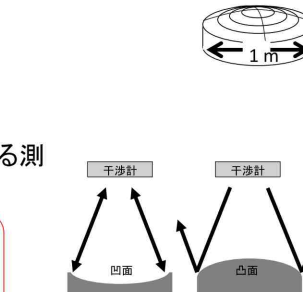
ハンマリング後の減衰の様子

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



1 m

干渉計

干渉計

凹面

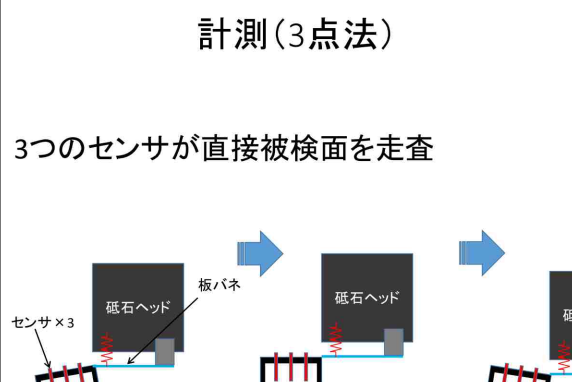
凸面

被測定物

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



センサ×3

磁石ヘッド

板バネ

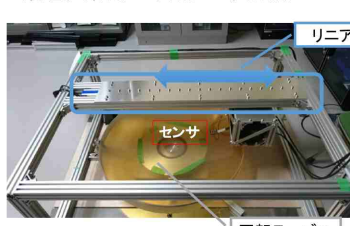
鏡

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

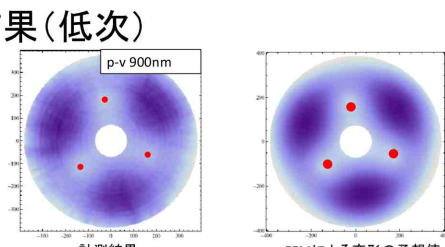


リニアステージ

センサ

回転テーブル

結果 (低次)



p-v 900nm

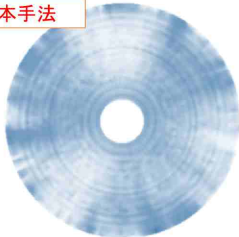
計測結果

FEMシミュレーションによる変形の予想値

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形状誤差)

干渉計



理想的な支持状態で干渉計による結果

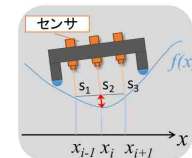
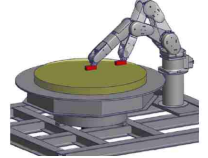
※三つ葉パターンの引き残しがある。これは解析と計測時の支持点の差によるものと考えられる。

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



不利な点

- 低空間分解能

ロボットアームと研磨機

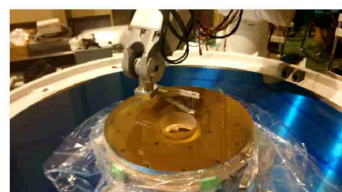
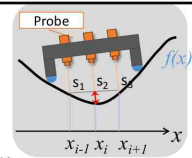
メーカー: STAUBLI (スイス)
自由度: 6軸 + ターンテーブル1軸

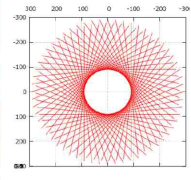



Φ600の鏡とロボットアーム
アストロエアロスペース

ロボットアームと計測

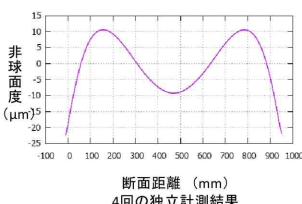
計測原理: ひきずり3点法
ロボットのヘッドの先にプローブを交換取り付け

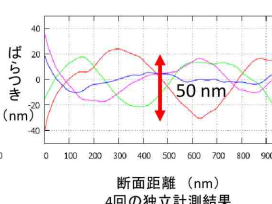


6度おきに60本の計測

計測結果と再現性Φ1000

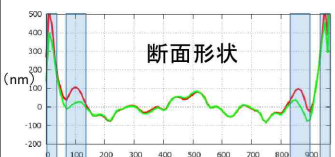


非球面度 (μm)
断面距離 (mm)
4回の独立計測結果

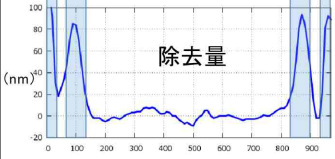


誤差 (nm)
断面距離 (nm)
4回の独立計測結果

形状誤差と修正研磨



断面形状



除去量

- 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10nmレベルの計測再現性

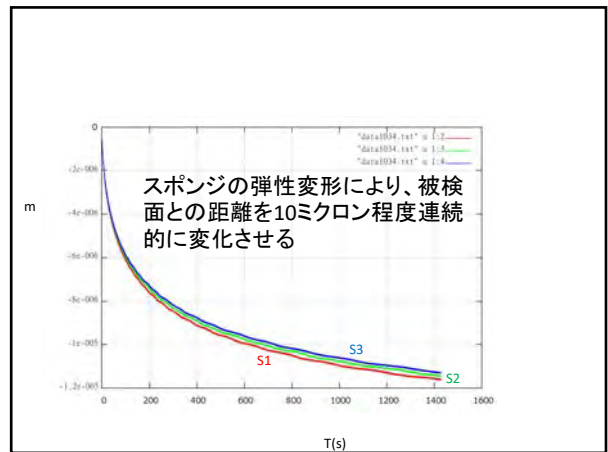
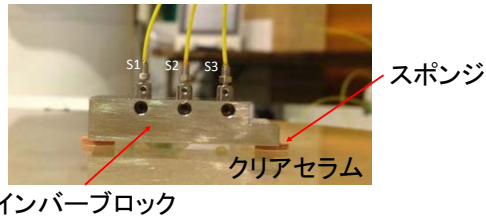
非接触化へ

キーエンス SI-F
振動に弱く非接触計測できず

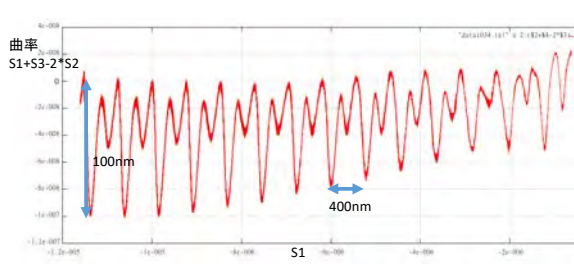
Attocube FPS
振動に強いが周期誤差が大きい
(周期誤差は平均しても解決しない)

Experiment

3つのセンサで被検面の曲率をモニタ



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

IDS(新)へ FPS(旧)へ
S1 S2 S3
スポンジ
クリアセラム

スポンジに押さえつけて離し、滑らかな変位を行う

旧センサ(FPS)に周期誤差を確認できる

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

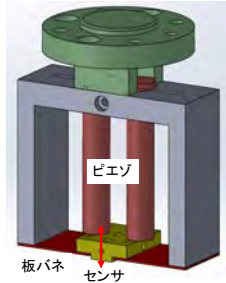
旧センサ(FPS)に比べて新センサ(IDS)は周期誤差を確認できない

適当な滑らかな関数からの残差

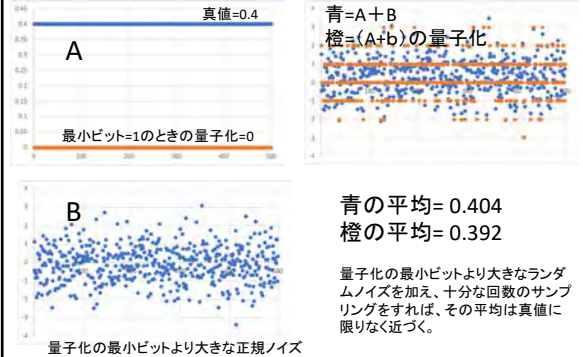
センサの出力結果

加振装置

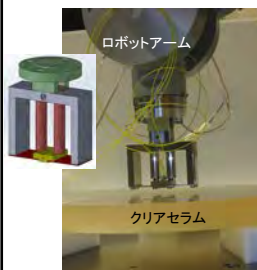
- 周期誤差の強度より十分大きな外乱振動を加え、十分な数のサンプリングを行うことで誤差の抑制を図る
- ピエゾ素子により任意の波形の振動をセンサに加える
- ただし、板バネによる固有振動数=734Hzまで



量子化ノイズにおける事例



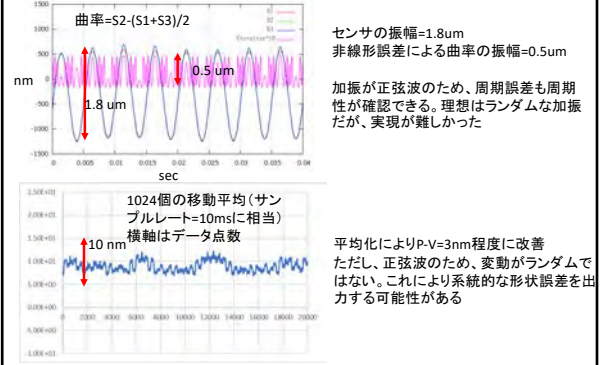
実験



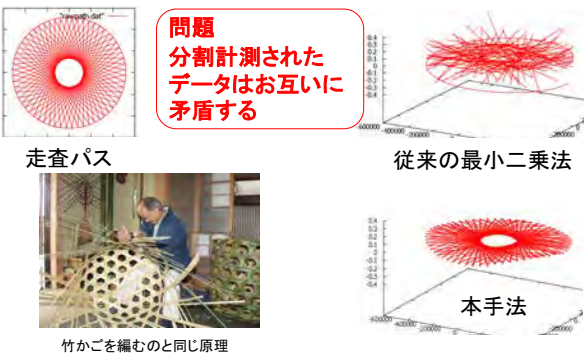
使用センサ:FPS(旧センサ)
サンプル周期:10.24us
定点計測:曲率は一定値を示すことが理想

実験の様子

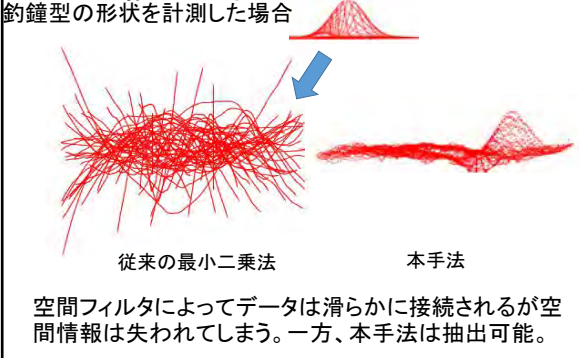
結果

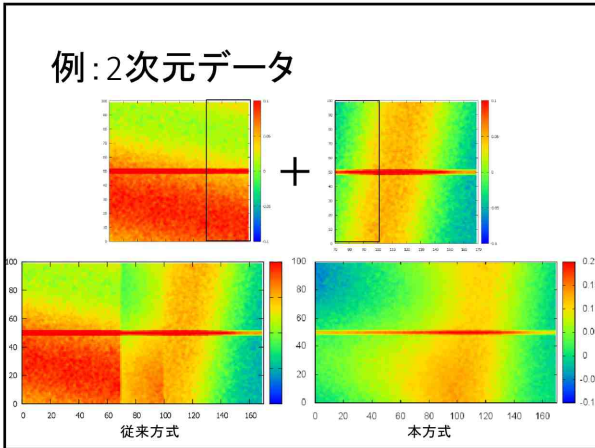


データ処理



局所構造の抽出



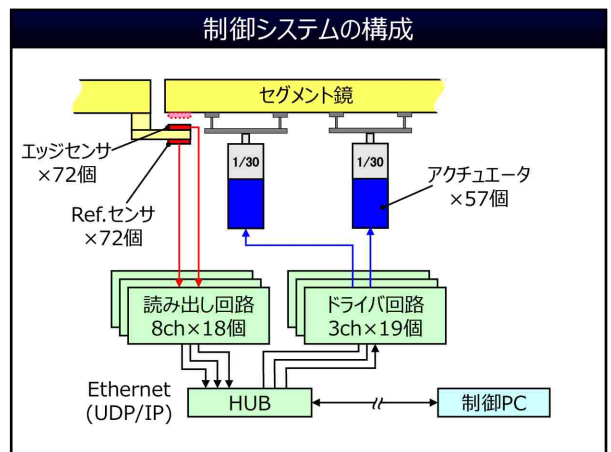


3.8m望遠鏡の分割主鏡

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

I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

I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)
- Iアクチュエータの伝達関数**
 - ・特性の測定
- I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
- I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

I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

↓

I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

I減速機
 弾性変形を使ったテコで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。

分解能100nm
推力7kgw

10nm以上の分解能と50kgf以上の推力が要求される。

減速比(テコ比)30

入力

出力

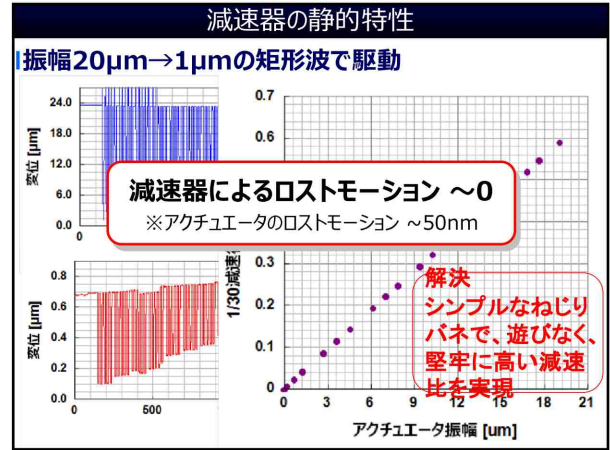
支点(ピボット)

断面図

板バネ

支点はただの板

- ねじれ中心は板の中心
- 中心は完全に不動
- z方向には硬い
- y方向の強度は出力にほとんど効かない
- 低ストレス
- 低コスト



鏡面支持構造

ホイップルツリー : 9点

ラテラル支持

駆動点

支持点

分割鏡外形

動的特性の測定

実験機材 (実機と同等)

- アルミ製ダミーセグメント
- ホイップルツリー
- 1/30減速器
- Zaberリニアアクチュエータ

測定点

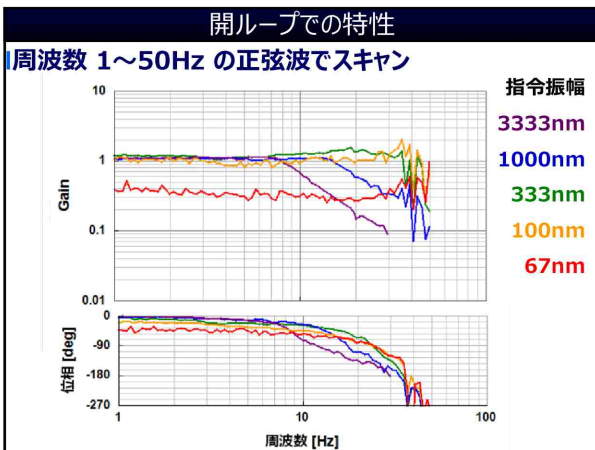
- 減速器の出力軸付近

ダミー鏡

センサ

アクチュエータ

減速器



閉ループでの駆動テスト

実験機材は同じ

フィードバック条件

- 制御量: 位置
- 操作量: 速度

偏差に比例した速度指令値
⇒ 積分制御に相当

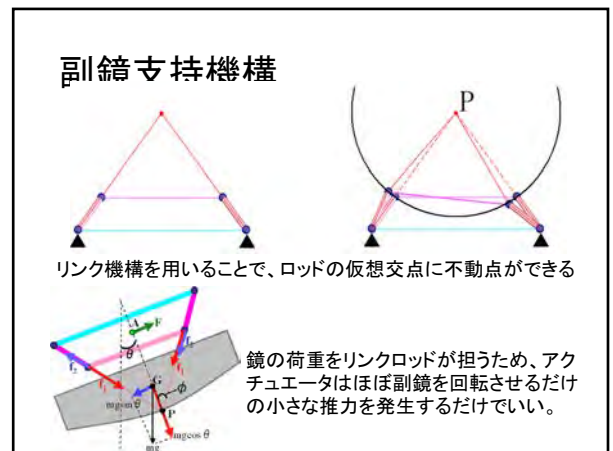
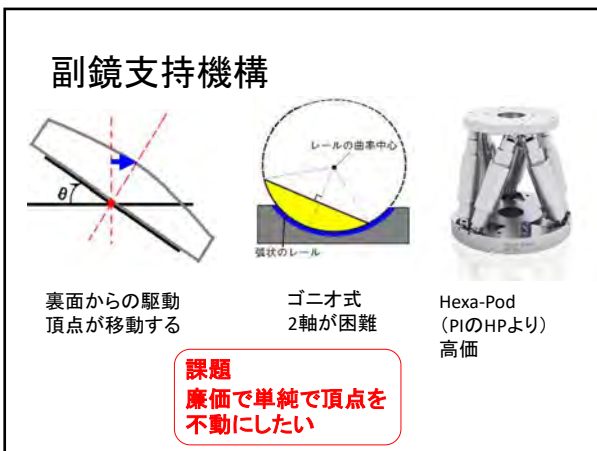
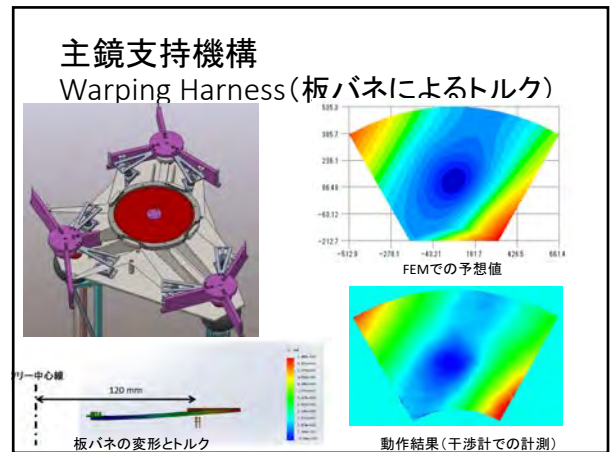
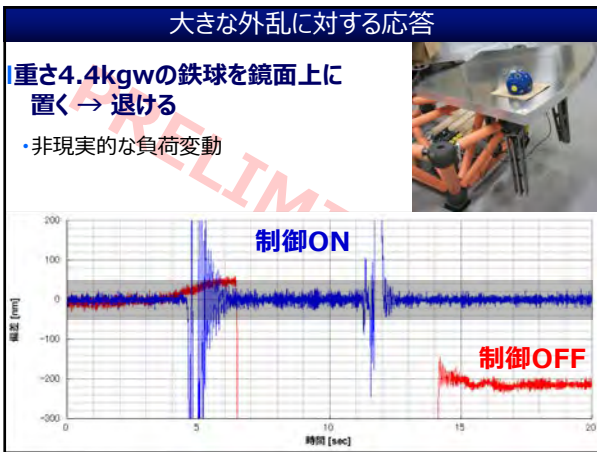
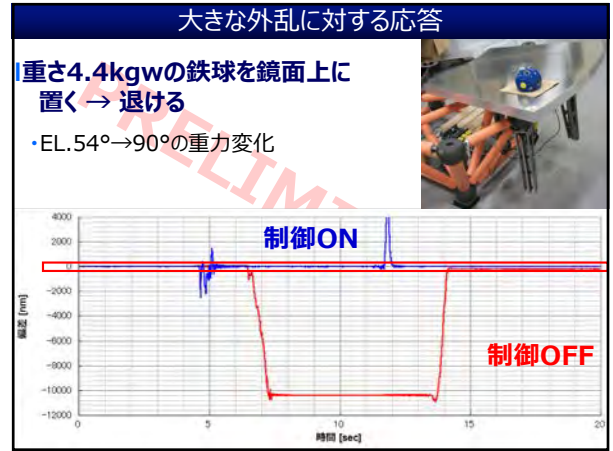
- 周期: 1/200秒

ダミー鏡

センサ


アクチュエータ

減速器



この頂点の動きを確認

副鏡支持機構



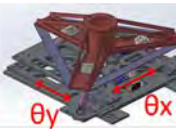
解決
3本の棒で準不動点を実現

ジンバルのような弾性関節
関節より上位は完全剛体

FEMによる解析結果

1°傾斜させた際の副鏡頂点のずれ(um)

	dx	dy	dz
θ_x	0.064	1.1	0.045
θ_y	0.77	-0.033	-0.030




Lightweight Structure

軽量な構造

- 突発天体のため的高速駆動
 - 軽量で強い構造
 - 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

↓

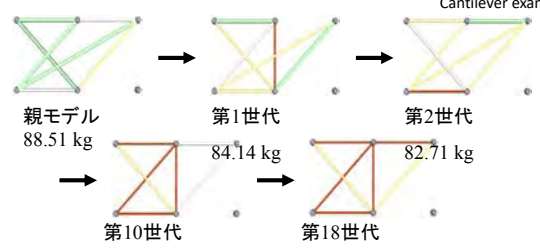
鏡筒の重量は従来の1/5に



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、突然変異しながら進化する。

Cantilever example



親モデル 88.51 kg

第1世代 84.14 kg

第2世代 82.71 kg

第10世代 77.52 kg

第18世代 76.22 kg

Kunda Masashi @ 夏ゼミ

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)

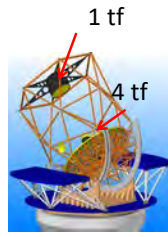
- M1用の節点変位 <0.1 mm
- M2用の節点変位 <0.4 mm
- M3用の節点変位 <0.05 mm

設計変数

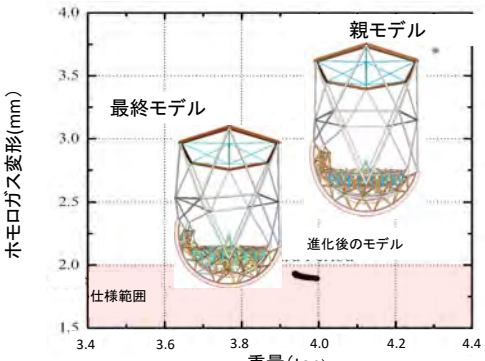
- 接点の位置 (削除も含む)
- パイプの断面積 (削除も含む)

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



ホモロガス変形(mm)

重量 (ton)

親モデル

最終モデル

進化後のモデル

仕様範囲

