

CTA 報告46: CTA 大口径望遠鏡用分割鏡の開発: 形状測定システム

2012年9月13日

茨城大学大学院理工学研究科
馬場浩則

奥村曉^F, 加賀谷美佳^A, 片桐秀明^A, 北本兼統^E, 峪中良介^E, 周小溪^E,
田中駿也^A, 千川道幸^E, 手嶋政廣^{B,C}, 中嶋大輔^C, 野里明香^E, 林田将明^G,
柳田昭平^A, 山本常夏^D, 吉田龍生^A, R.Krobot^H,
他 CTA-Japan consortium

茨城大理^A, 東大宇宙線研^B, Max-Planck-Inst. fuer Phys.^C, 甲南大理工^D,
近畿大理^E, 名大STE研^F, 京都大理^G, 3D-Shape.^H

Large Size Telescope(LST:大口径望遠鏡)

LST仕様

口径(d) : 23m

F値 (焦点距離/口径) : 1.2

焦点距離(f) : 28m

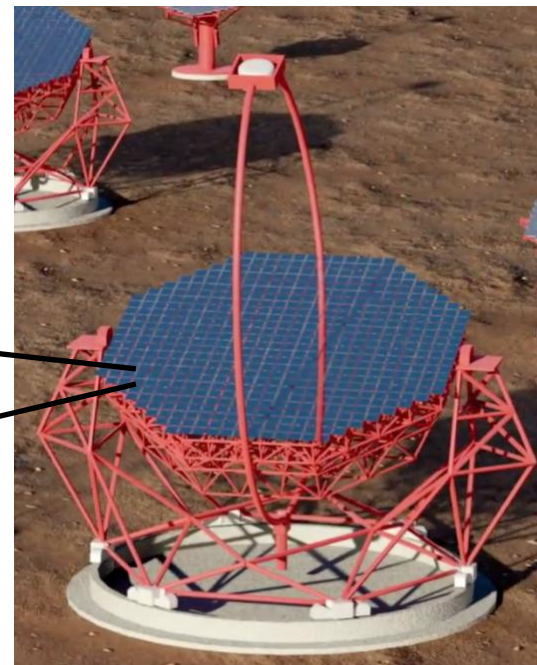
反射鏡面 : 回転放物面型複合鏡

カメラPixelサイズ : 0.1度

入射光がoff-axisの時に生じる収差をできるだけ小さくするため、このような値となっている



三光精衡所の製作によるLST用試作分割鏡



LST (CG画像)

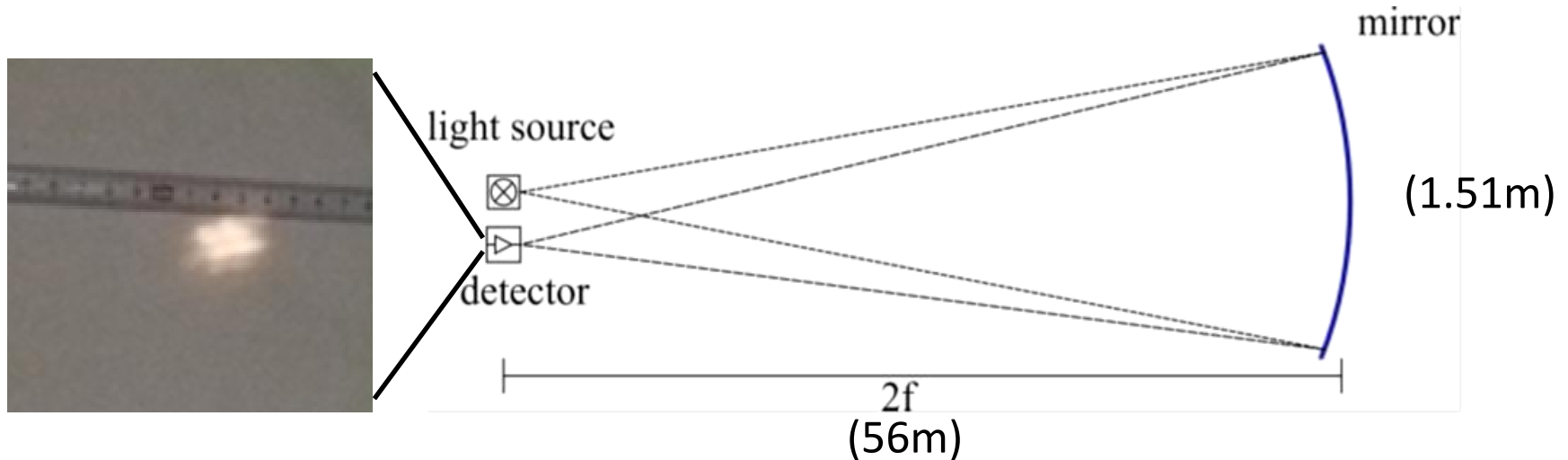
対辺間1510mm、**焦点距離28~28.4m**、**80%の光がカメラPixelの1/5の大きさに入るスポットサイズ（直径10mm）の分割球面鏡がLST一台あたり206枚必要**となる。

→高精度かつ効率のよい分割球面鏡の評価方法が必要

2f法による評価方法

2f法

曲率半径の中心に光源と検出器を置き、直接スポットサイズを測る方法



メリット

- ・ 仕組みがシンプル

デメリット

- ・ 曲率半径分の距離を必要とする。（装置の巨大化）
- ・ 高精度の測定には、全体が暗い方が良く、暗室内や夜間での測定など、周囲の明るさを抑える工夫が望まれる。

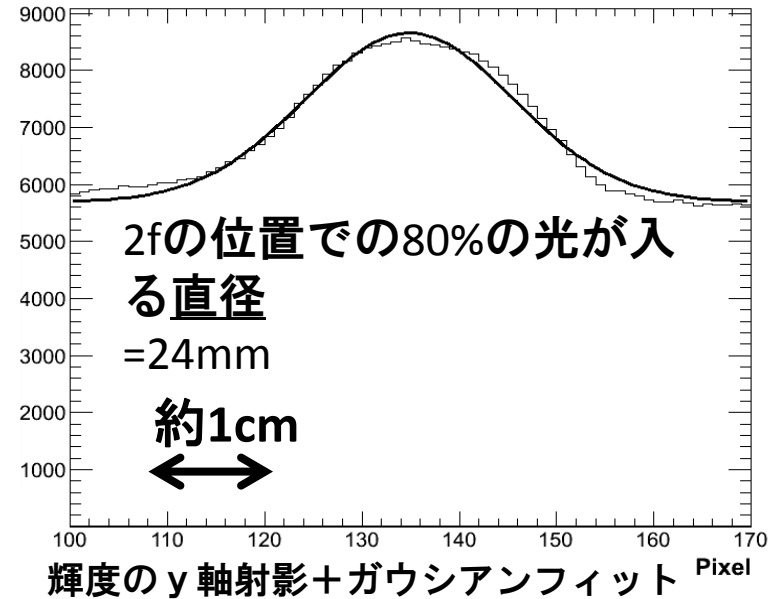
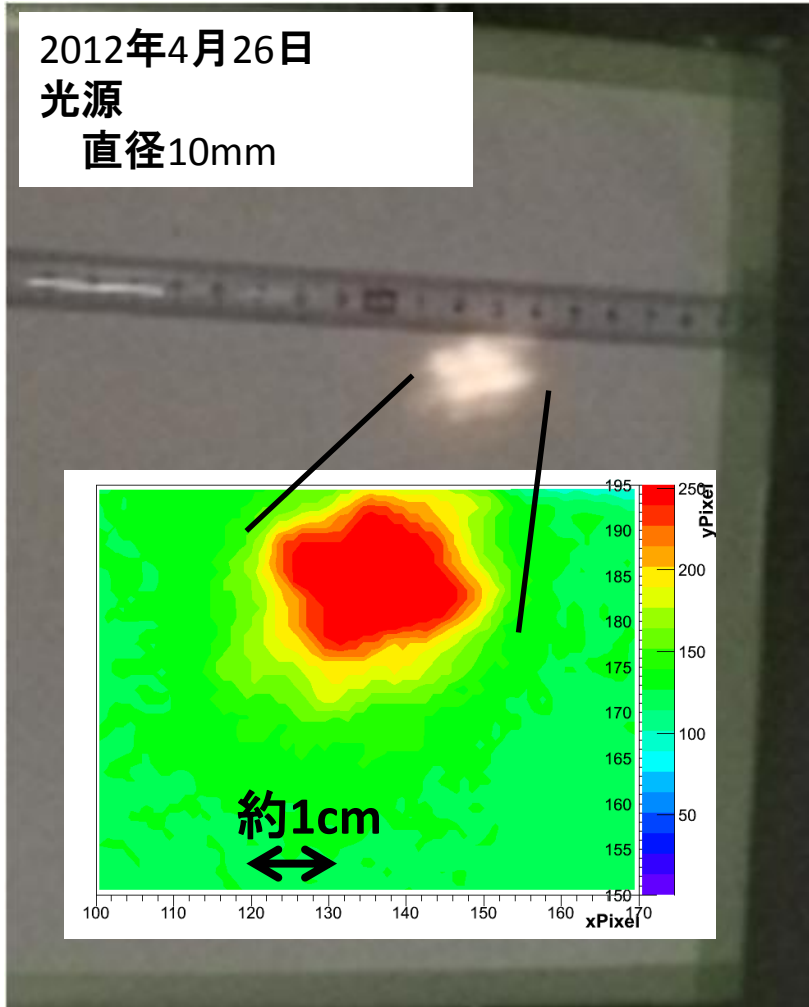
2f法の評価結果

試作されたLST用分割球面鏡(対辺間1510mm)に対し、2f法を使ったスポットサイズの評価を行った。

2012年4月26日

光源

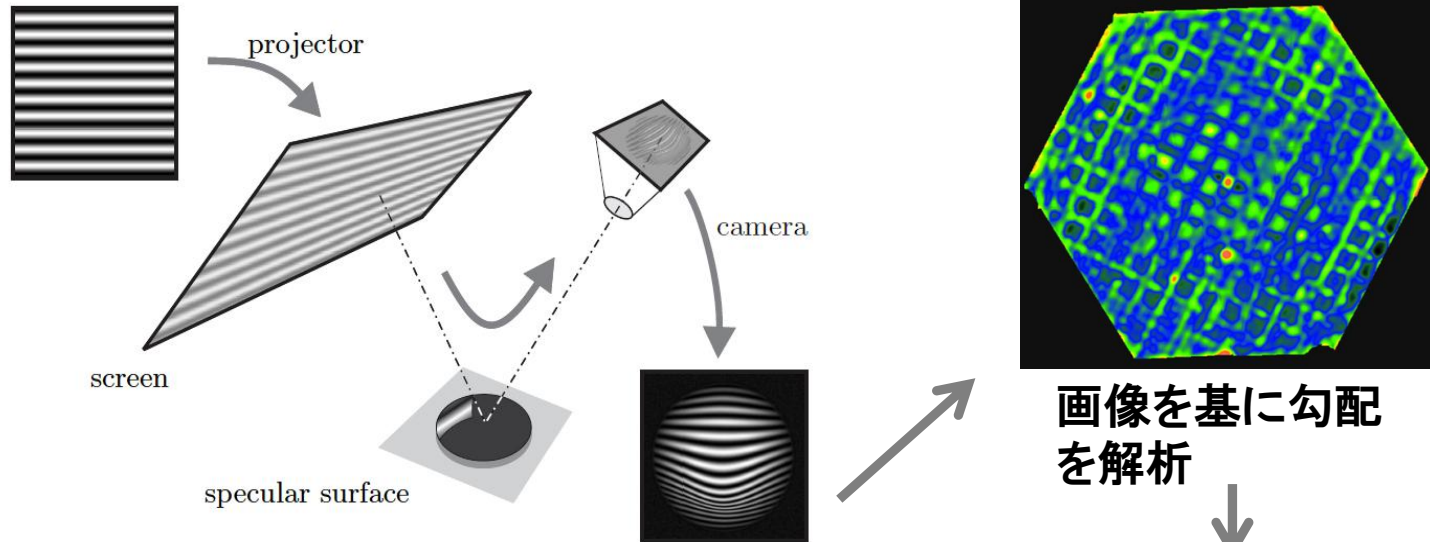
直径10mm



スポットサイズの要求に近い値となっている。

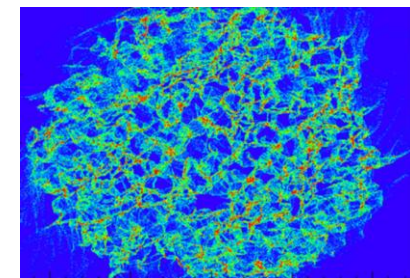
新しい鏡の評価方法 Phase Measuring Deflectometry (PMD)法

PMD法は、**位相シフト法**、及び、**ステレオカメラ写真測量**を利用して鏡面各点の勾配、法線ベクトルを求め、対象物の形状を高精度で測定する方法である。



スクリーンに位相がシフトする縞模様を映し、それを鏡に映しこみ、カメラで撮影する

画像を基に勾配を解析

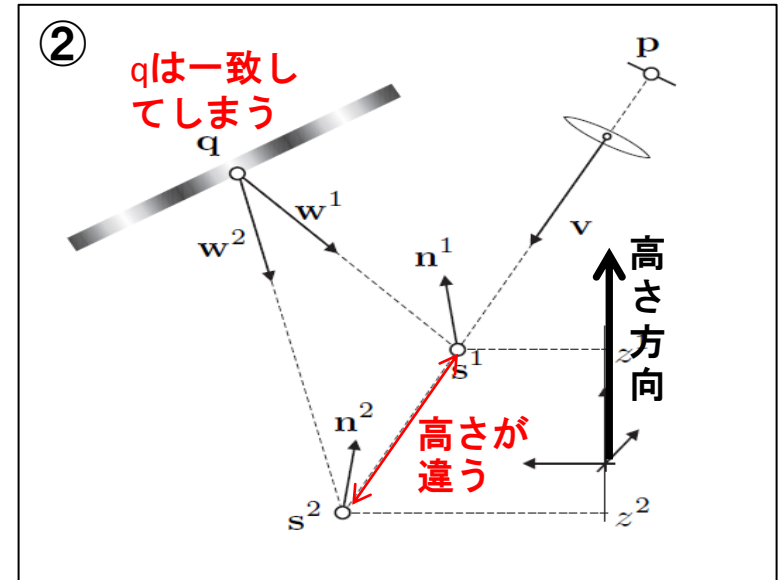
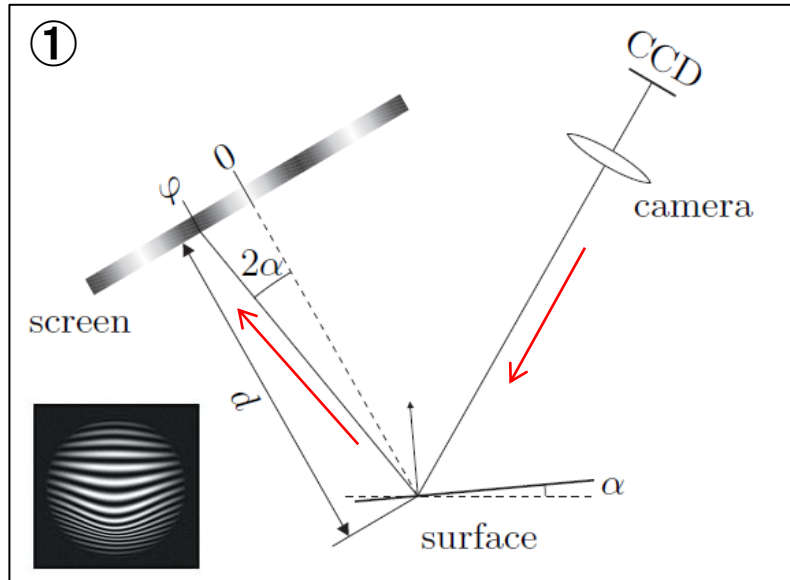


レイトレースでスポットサイズを求める

メリット

- ・測定自体は2f法同様シンプルである
- ・**直接鏡面の情報(勾配、座標、法線)が得られる**
- ・**装置をコンパクトにできる**

測定原理



光をCCDから出る1本の光線と考えた場合

①のように水平面から α 傾いた鏡面を反射するとき、反射角は水平面の場合に対して 2α ずれ、縞模様のスクリーン上で φ だけずれる。

$$\varphi = d \cdot \tan 2\alpha$$

つまりCCDからは d 、 α (勾配)に依存した縞模様のずれが観測できる。これをもとに鏡面の勾配を計算する。

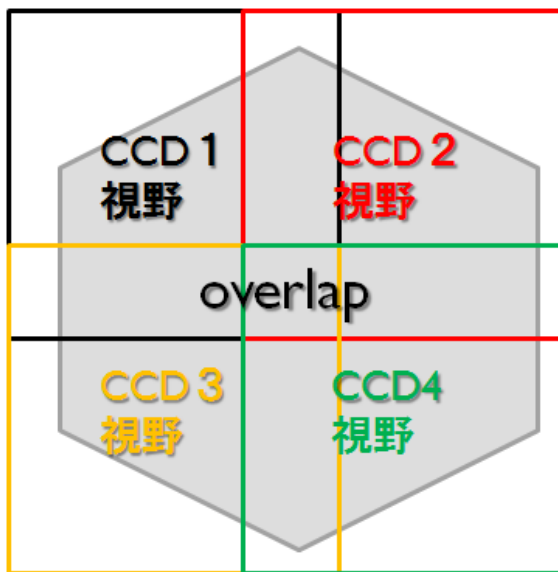
→しかし鏡面の場合は②のように、高さが唯一に決まらない
ステレオカメラで撮影することによって、高さを決める。

日本でのPMD法装置開発

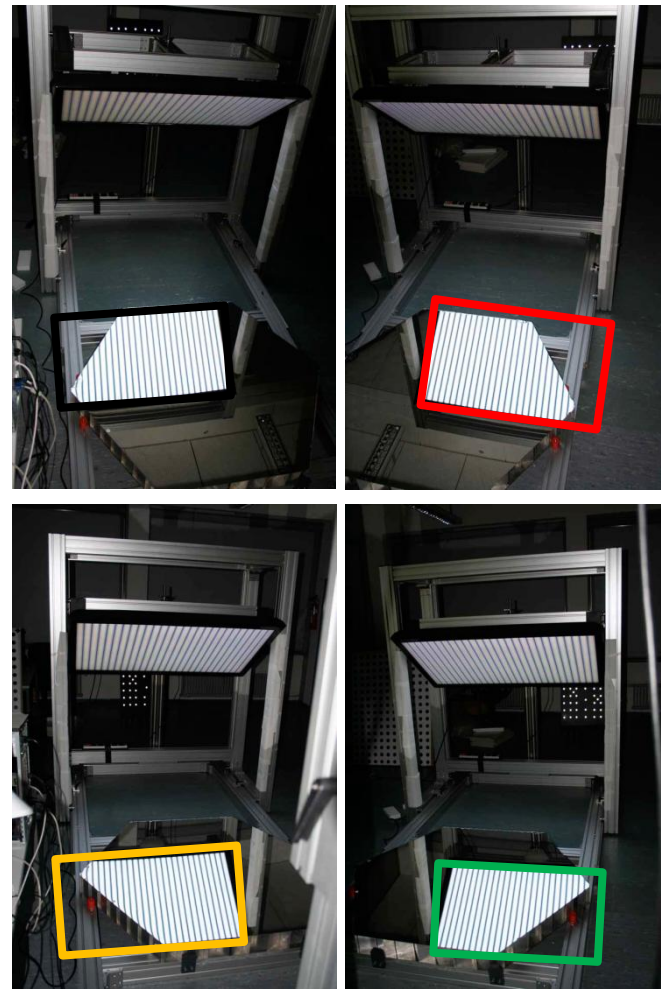
日本で生産するLST用分割鏡の評価のため、PMD法装置の開発を行った。

<装置開発の重要点>

- 十分なoverlap部分を作りつつ、分割球面鏡全体を4台のCCDカメラで撮影する。
- LST分割球面鏡(1510mm)仕様に拡張しつつ、コンパクトなスペースでの測定を実現する。



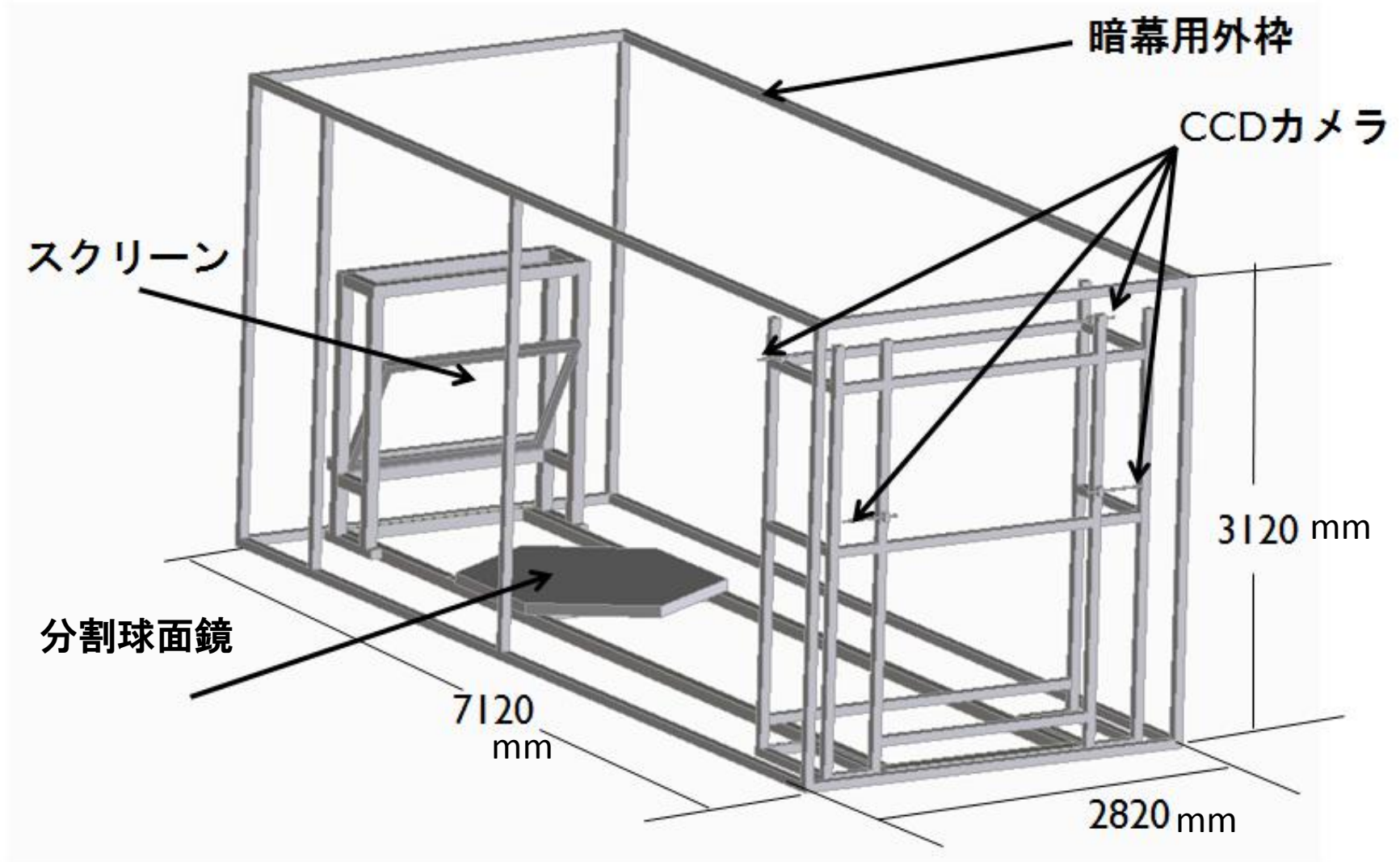
4つのCCD視野と分割鏡



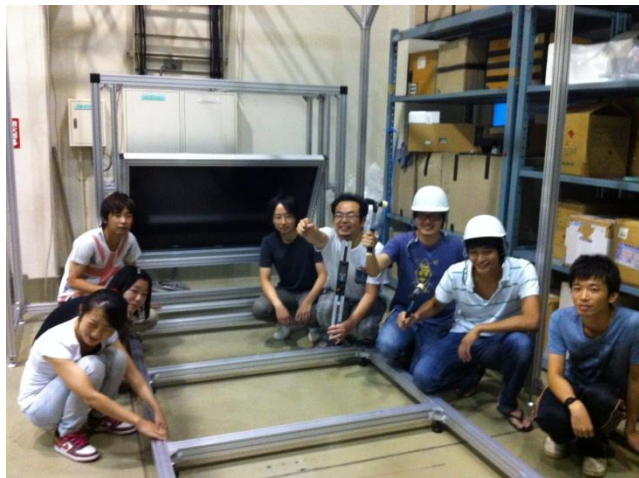
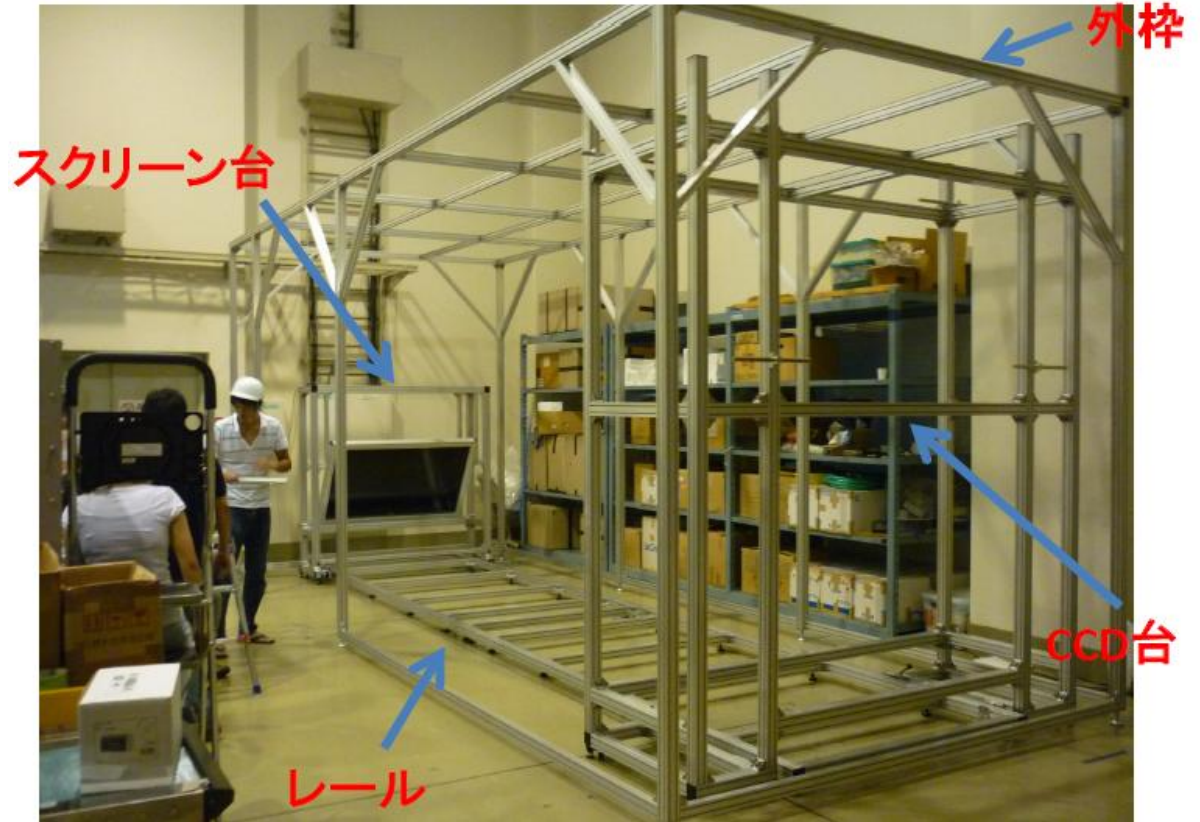
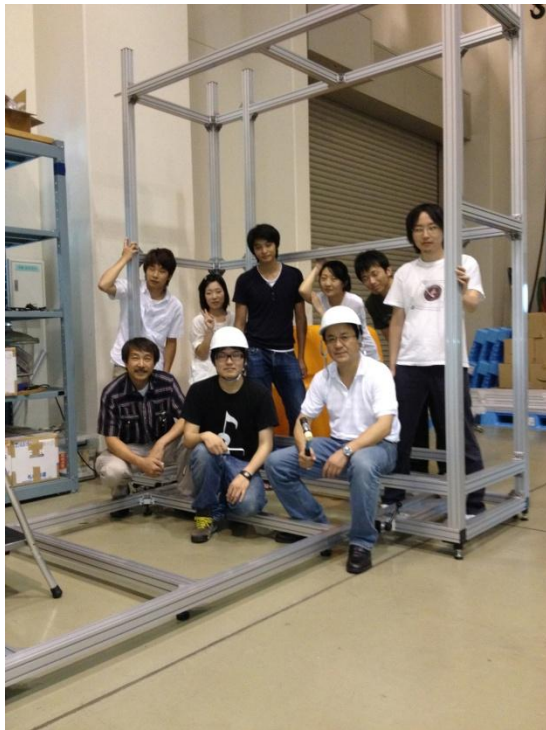
University of Erlangen-NurembergにあるMedium Size Telescope (MST)用分割鏡用のPMD法装置とその視野の場合

PMD法装置設計図

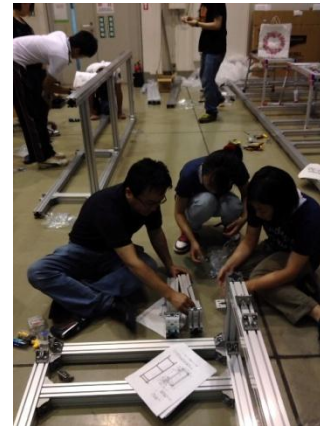
CCDの視野、分割球面鏡の面積、スクリーンの面積を基にそれぞれの位置を算出し、また、CCDカメラ台、スクリーン台を安定させるために、立方体のような形状で設計した。



製作したPMD法装置

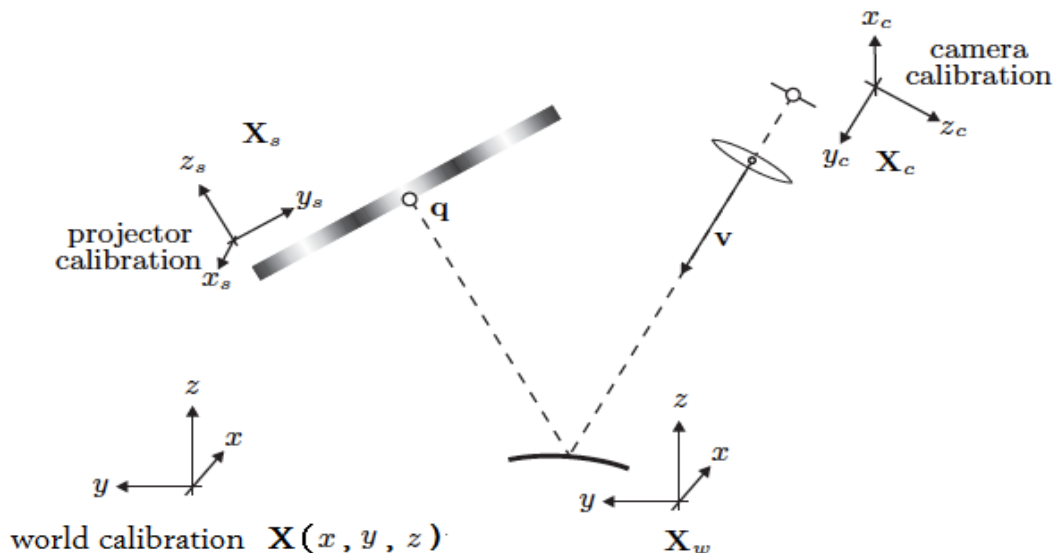


協力者 11人
製作期間 4日



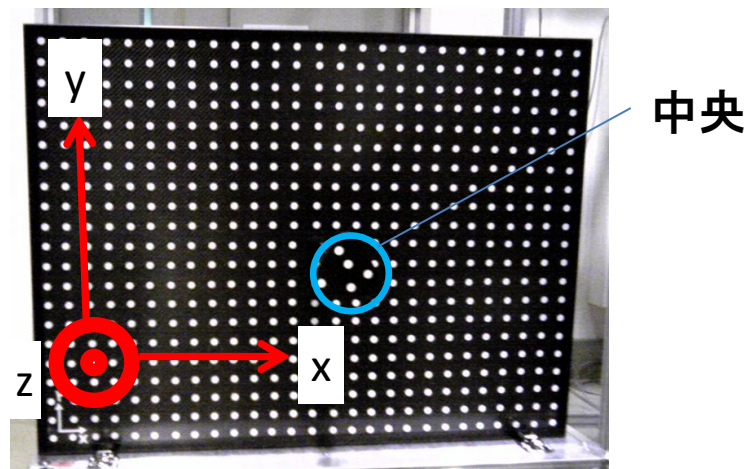
PMD法装置のキャリブレーション

高精度でPMD法の測定を行うためには、**CCDカメラ、スクリーンが持つ誤差の補正**が必要であり、また、実際の測定に必要なパラメータである**ワールド座標を求める**（スクリーンから鏡までの距離など）必要がある。



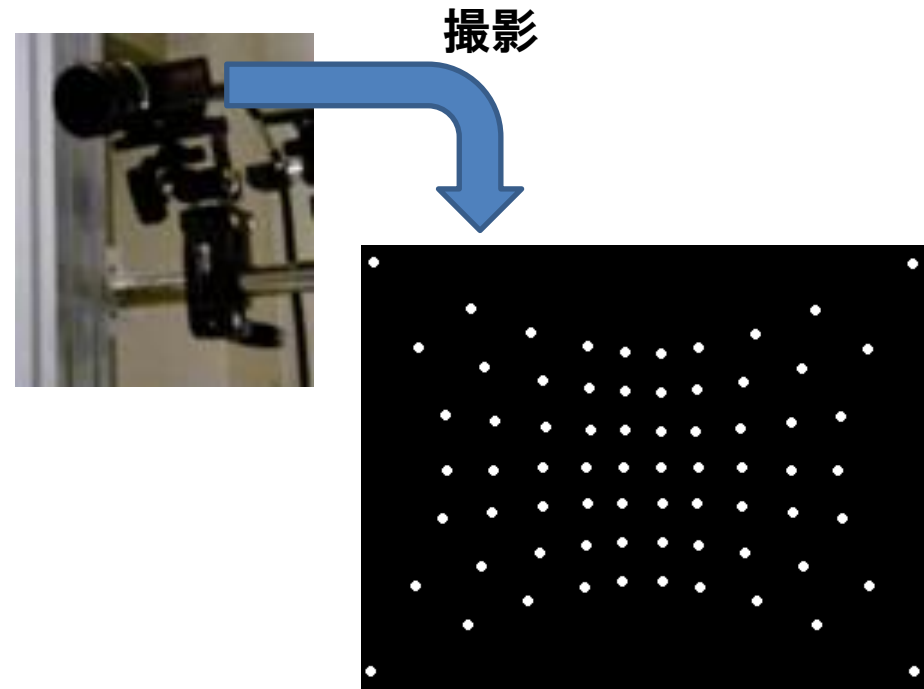
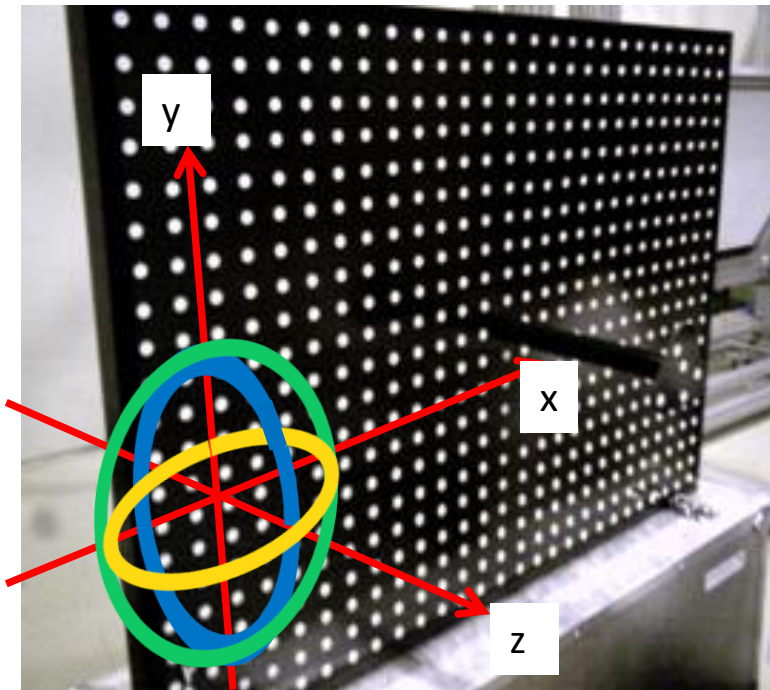
<テストボード>

主にカメラキャリブレーションに使う。全長は約80cm×50cmで、高い精度のドットが印刷されている。中央部分は、z軸方向に飛び出しており、上下左右見分けを付けるため、不規則な並びとなっている。



・カメラキャリブレーション

おおよそ実際の鏡とCCDとの距離にテストボードを置き、テストボードを正面と上下左右に傾けた5つのパターンで撮影。さらに90°回転させ同じように撮影し、計10方向の画像を得る。その10枚の画像の歪みを使い、**CCDカメラレンズが画像に及ぼす歪みを近似した多項式の関数の係数を求める。**

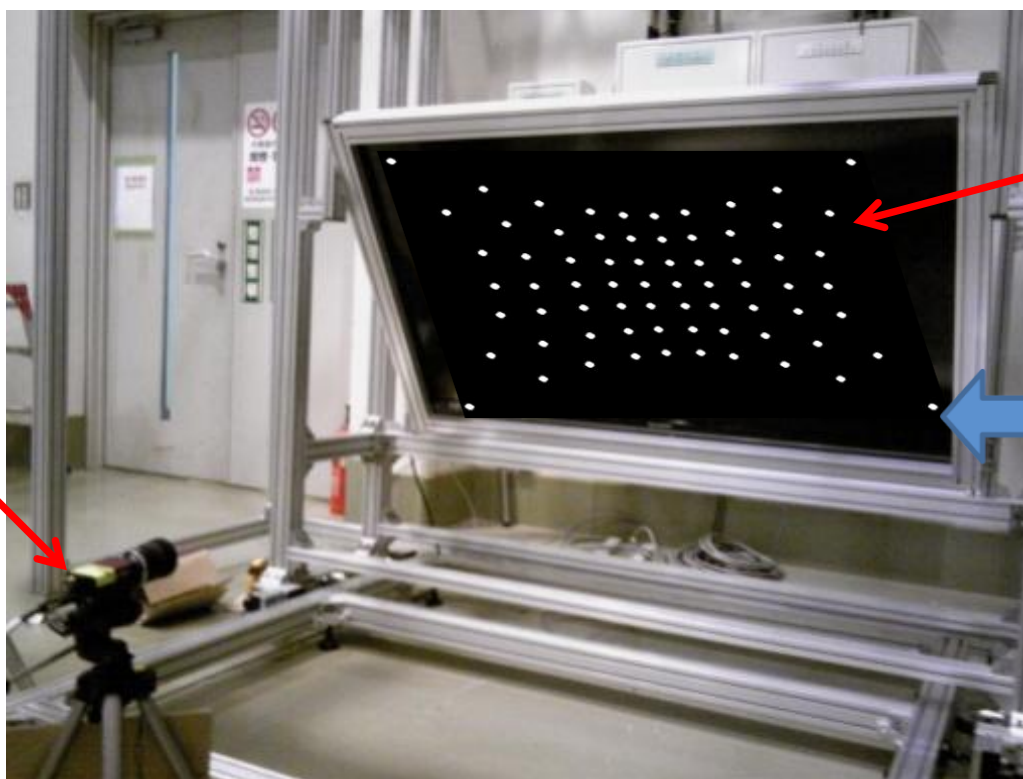


CCDのレンズにより歪んだ画像を得る

・スクリーンキャリブレーション

スクリーンにテストボードのような正確な間隔で描かれている模様を映し、それを補正済みCCDカメラで位置と角度の組み合わせで10方向から撮影する。そして、10枚の画像の模様のずれから**スクリーンの歪みを近似した多項式の関数の係数を求める。**

補正済みCCD
カメラ



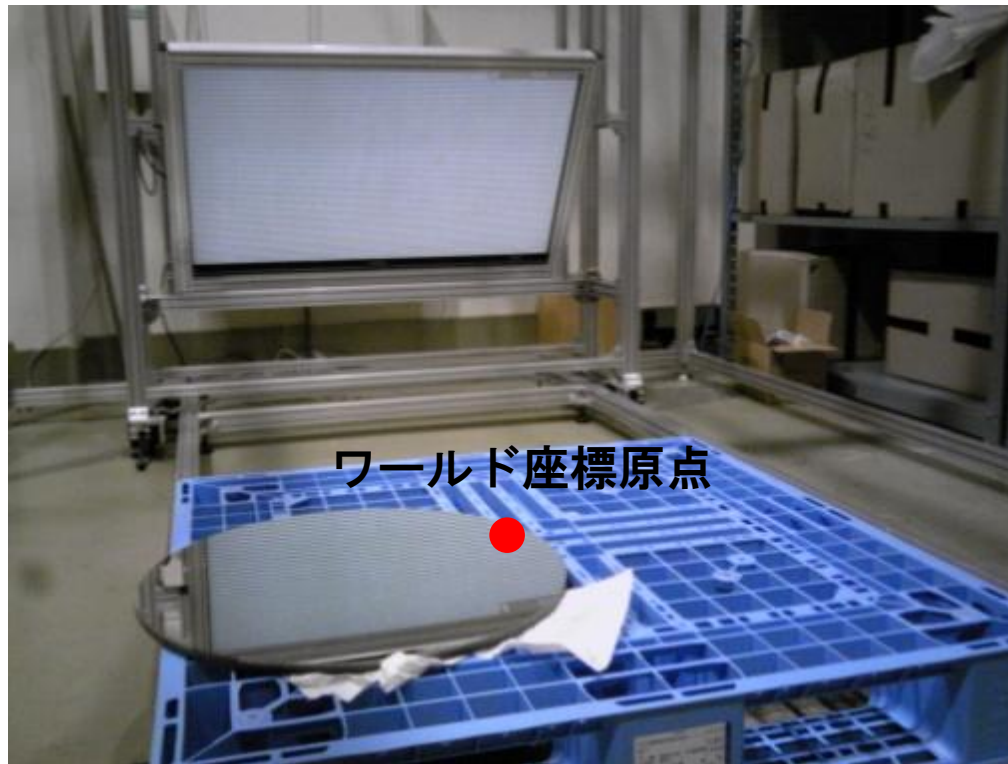
スクリーンの
画面の歪みに
よって歪む

映す



・ワールド座標キャリブレーション

装置全体の原点を「設置するLST試作分割鏡の中心」と決めて、ステレオカメラ測量を利用し、そこからのCCDカメラ4つの初期位置を与える。その後、10通りの位置や向きに鏡に縞模様を映して撮影し、**ワールド座標原点に対する正確なCCD4つの位置、スクリーン、CCD、鏡の位置関係を決定する。**

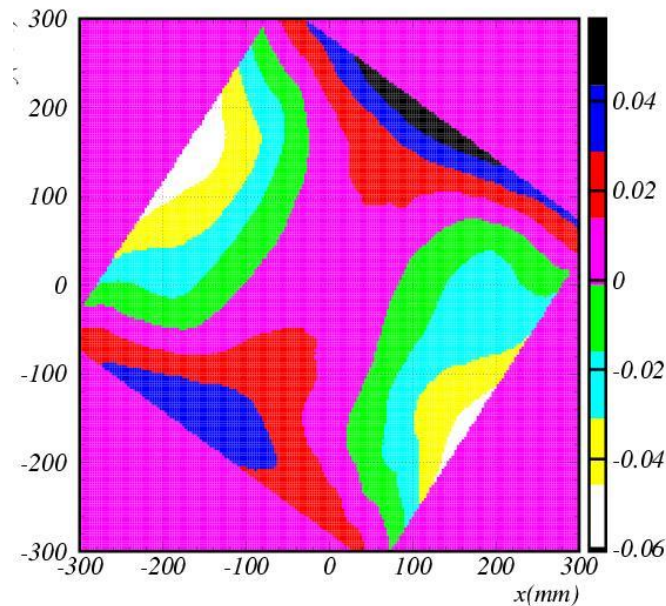


これらキャリブレーションが、現在進行中である。

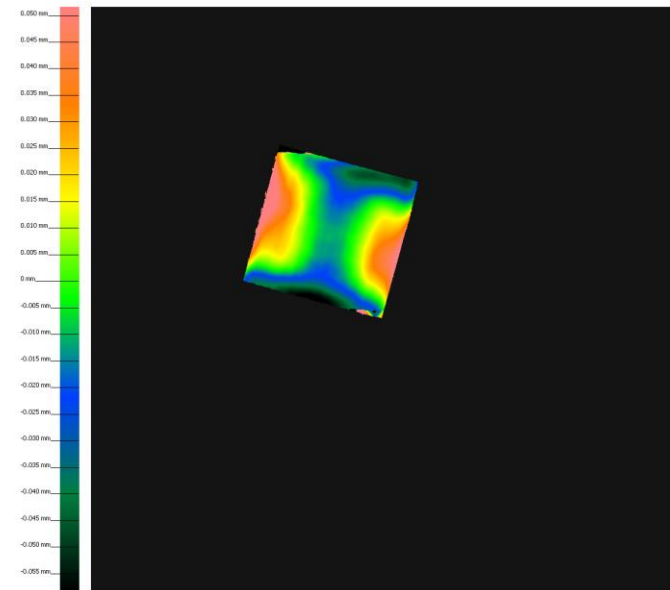
MST用試作鏡でのテスト

キャリブレーションが現在進行中であるが、現時点での性能をステレオ撮影した CCD1台分の画像を基に求めた。

500mm×500mmにカットされたMST用試作球面鏡を使用。



三鷹光器によるレーザー測量
曲率半径フィッティング 32.70m
測定精度 0.1 μ m



PMD法
曲率半径フィッティング 32.73m

キャリブレーション途中であるため、現段階ではPMD法の性能を判断することは出来ないが、今後はさらに精度が良くなると期待できる。

まとめ

我々は大量生産するLST分割球面鏡を高精度かつ効率よく評価のためにPMD法の装置開発を行った。

- ・ PMD法は位相シフト法及びステレオカメラ測量を用いた評価方法で、大量生産のされた鏡の評価に対して有効な評価方法である。
- ・ 現在、装置自体は完成し、高精度の測定に向けて調整を行っている。

今後は、調整を終了し、今後生産されていくLST用分割球面鏡の評価を行う予定である。