極低温下における自由曲面鏡の 表面形状測定に向けたCGH干渉計の開発

1/18

近藤翼,國生拓摩,金田英宏(名大), 石原大助(ISAS/JAXA),木野勝(京大),脇田愛未(名大)

【目次】

イントロダクション 方法 結果 考察 今後の展望 まとめ

1-1 天文学における自由曲面鏡

自由曲面鏡を使用するメリット

様々な角度から入ってくる光を、少ない枚数の鏡で、

狙った位置(検出器上)に限りなく小さい広がりで焦点に結像できる

→コンパクトな光学系+広視野での観測を実現

例:SPICA/中間赤外線観測装置SMI



中間赤外線観測装置SMIの光学系

1-2 光学素子の表面形状測定

鏡の表面形状を測定する方法 → **干渉計**



干渉計を用いた表面形状測定のダイアグラム

非球面鏡測定に用いられる干渉計 →ヌルレンズ干渉計

- ・非軸対称の被検面波面を形成するのが困難
- 複数枚の自由曲面に対応したヌルレンズ群の 製作が困難

Computer Generated Hologram (CGH)





ヌルレンズ干渉計の光学系

1-3 CGHの原理

CGH (Computer Generated Hologram): 回折格子を利用した光学素子

4/18



dが等間隔: θ が一意に決まる→全ての次数($m = 0, 1, 2, \cdots$)で平面波 dが不等間隔:各点において θ が異なる→自由曲面を形成





CGH干渉計の特徴



He-Neレーザー

1-6 本研究で用いるCGH干渉計

「せいめい」望遠鏡分割主鏡の測定実績のあるCGH干渉計(M. Kino et al. 2012)の コンセプトがベース

先行研究との違い:CGHの発散光である1次光ではなく 収束光であるマイナス1次光を利用



CGHの1次光を利用した場合

CGHのマイナス1次光を利用した場合

6/18

入射窓を小さく設計し、外部からの熱流入を抑える
 ・被検面が参照光を邪魔しない
 →より汎用性の高い干渉計を実現

1-6 本研究で用いるCGH干渉計

「せいめい」望遠鏡分割主鏡の測定実績のあるCGH干渉計(M. Kino et al. 2012)の コンセプトがベース

先行研究との違い:CGHの発散光である1次光ではなく 収束光であるマイナス1次光を利用



CGHの1次光を利用した場合

CGHのマイナス1次光を利用した場合

6/18



極低温下(~10 K)で自由曲面鏡の表面形状測定を実現できる CGH干渉計を開発し、干渉計の性能が赤外線観測装置の要求 (SPICA/SMIの要求である測定精度60 nm RMS)を満たすか評価

イントロダクション ー 方法 ー 結果 ー 考察 ー 今後の展望 ー まとめ



- 2-1 測定光学系
- ·極低温光学系



2-2 使用する光学素子

球面鏡測定



被検鏡(球面鏡)



参照鏡(平面鏡)



非球面鏡(軸外し放物面鏡)測定



被検鏡(軸外し放物面鏡)



参照鏡(平面鏡)



フレネルゾーンプレート (FZP)

イントロダクション ー 方法 ー 結果 ー 考察 ー 今後の展望 ー まとめ

10/<u>18</u>

N:位相サンプリング数 2-3 位相シフト法 n:シフト量を決める定数(n = 0,1,2,…, N-1) 位相シフト法: 既知の位相量 ($\delta = \frac{2\pi n}{N}$) だけ参照面をシフトし、 表面形状誤差に対応する初期位相差を求める 検出器の各ピクセルで得られる干渉光の強度 *I*_t:被検光の強度、*I*_r:参照光の強度 $I = I_{t} + I_{r} + 2\sqrt{I_{t}I_{r}}\cos(\delta + \Delta\phi_{0})$ $\Delta \phi_0$:初期位相差(表面形状に対応) $\Delta \phi_0 = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}$ N=4の場合 CGH

冷凍機や冷媒の蒸発による

振動の影響で測定精度が悪化

位相サンプリング数を増やし、

フィッティングによって導出



2-4 振動耐性の高いデータ取得・処理方法

①位相サンプリング数の最適化 ②3σクリッピング イントロダクション ー 方法 ー 結果 ー 考察 ー 今後の展望 ー まとめ

2-4 振動耐性の高いデータ取得・処理方法

①位相サンプリング数の最適化 ②3σクリッピング

→外乱環境に応じて、位相サンプリング数を最適化し、 振動の影響を抑える



2-4 振動耐性の高いデータ取得・処理方法

①位相サンプリング数の最適化
 ②3σクリッピング

→振動などによる外れ値を除去することで、 より正確な初期位相差を算出



2-5 アラインメントの方針

軸外し放物面鏡のアラインメントの困難:シフトとチルトが等価でない



イントロダクション 一 方法 一 結果 一 考察 一 今後の展望 一 まとめ

- 3-1 極低温下での球面鏡の表面形状
- ・鏡の温度13 Kまで冷却に成功
- ・位相サンプリング数は17を採用





13/18

CGH干渉計で取得した干渉縞 (緑枠内の領域を表面形状に変換)

表面形状誤差マップ

イントロダクション 一 方法 一 結果 一 考察 一 今後の展望 一 まとめ

3-2 常温下での軸外し放物面鏡の表面形状

・位相サンプリング数は21に設定

PV值:669 nm RMS值:122 nm



CGH干渉計で取得した干渉縞 (緑枠内の領域を表面形状に変換)



nm

4-1 CGH干渉計の絶対精度

被検面として球面鏡を用いたため、フィゾー型干渉計と比較が可能



4-1 CGH干渉計の絶対精度

被検面として球面鏡を用いたため、フィゾー型干渉計と比較が可能



4-2 接触式測定との比較

軸外し放物面鏡の製作業者による接触式測定



CGH測定: PV=298 nm, RMS=108 nm

接触式測定:PV=451 nm, RMS=123 nm

→断面のパターンは一部で一致、しかしPV値に有意な差がある

→被検面のアラインメント誤差の可能性

5 今後の展望

ファイバー端モニターカメラを活用した軸外し放物面鏡の アラインメント誤差の評価

17/18

・新しいアラインメント方針・誤差除去方法
 □FZPのようなものを利用したもの
 □ソフトウェアでアラインメント誤差を補正する

・干渉計光学シミュレーション
 →干渉計の振る舞いの理解を深めたい

まとめ

・極低温下で自由曲面鏡の表面形状測定を実現できるCGH干渉計 を開発し、干渉計の性能を評価することが目的

- 本研究の特徴
 ①CGHの収束光であるマイナス1次光を利用
 ②振動耐性の高いデータ取得・処理方法を採用
- ・極低温下での球面鏡測定では、鏡を13 Kまで冷却に成功
 絶対精度26 nm RMSを達成した
 →SPICA/SMIの要求値である測定精度60 nm RMSを満たす
- ・常温下での軸外し放物面鏡測定では、被検面のアラインメント誤差 によって測定精度が悪化
 - →今後、極低温試験に向けて、アラインメント方法の改善を行う