

京大岡山 3.8 m 望遠鏡 分割鏡間の段差計測のための位相カメラ

上野 忠美 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理教室)

Abstract

現在京都大学では様々な研究機関と共に岡山観測所に 3.8 m 望遠鏡の建設を進めている。建設予定の望遠鏡の主鏡は分割鏡であるためその分割鏡の間の段差を計測しなければならない。その理由は、星の良い像を得るためには主鏡を一枚鏡のように見なせなければならないのでこの段差を小さく (数十 nm 程度) しなければならないためである。このような段差計測には位相カメラというシステムを用いた計測方法がある。ここでは新技術であるレーザーを用いた位相カメラでの分割鏡間の段差計測の説明をする。

1 Introduction

現在東アジア地区には 2.5 m 口径以上の光赤外線望遠鏡が存在していない。そのためこの地方の夜空で突発天体などが発生したときすぐに詳しい観測を行うことができないのが現状である。この問題の解決のため 3.8 m 望遠鏡の建設を行うこととなった。またこの望遠鏡は将来の超大型望遠鏡への技術開発に向けた実験的な側面も有しており、様々な新技術が導入されている。その他、この望遠鏡は長時間モニター観測にも使用できるので系外惑星の探査にも適している。図 1 はその完成予想図である。



図 1: 望遠鏡の完成予想図

建設予定の 3.8 m 望遠鏡の主鏡は扇型 (図 2) の分割鏡である。すべての分割鏡を一枚鏡として使うには分割鏡同士が同じ方向を向いてかつ分割鏡の間の段差がない状態でなければならない。本稿では特に段差の計測を行うため位相カメラシステム (以下位相カメラ) について説明する。位相カメラとは光の干渉縞を読み取ることで分割鏡の光軸方向の相対位置を光学的に確認するシステムである。Keck 望遠鏡

などは星の光を使って段差計測を行うが、計測には時間がかかりすぎてしまうため望遠鏡の機動性に影響してしまう。さらに日本で同じ方法を使って計測しようとする大気の揺らぎのため、Keck 望遠鏡よりももっと多くの時間が必要となる。そのため我々はレーザー光を用いた位相カメラを使い段差測定を行うことを考えた。これなら測定時間は短時間で望遠鏡の観測時間への影響もさほどない。

では、そもそもなぜ分割鏡の間に段差が生じるのか。例えば望遠鏡が真上を向いているとき段差が全くなかったとしても、望遠鏡をターゲットの方向に傾けたとき各分割鏡に対する重力の働く向きが変化してしまうため段差が生じてしまう。その補正のために段差を正確に計測する必要がある。

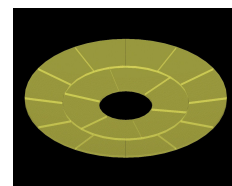


図 2: 主鏡

2 測定原理

図 3 のような状態を考える。焦点から出た光が放物面鏡に当たるとその光は平行光となる。この原理を利用して、焦点である位置から光を放出して放物面鏡に反射させ、さらにハーフミラーでその光を垂

直方向にもう一度放物面鏡に反射させ焦点位置に光を戻すことを考える。この戻る位置にカメラを設置して光をとらえる。図 3 のように分割鏡の境目にハーフミラーを置き 2 つの光線の経路を考える。この 2 つの光線を干渉させてその干渉縞をカメラで読み取り、分割鏡に段差がない場合の干渉縞と段差がある場合の干渉縞を比較し、そのずれを測定することでその段差を計測できる。

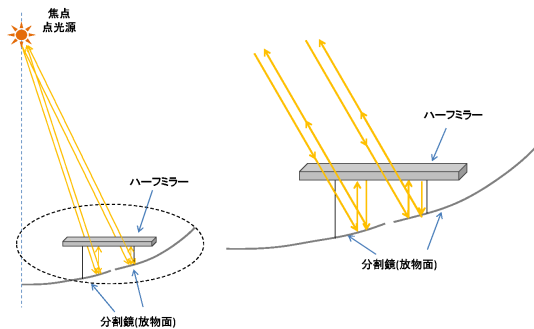


図 3: 測定原理

3 実験方法

実験には 3 つのレーザーを用いた。それぞれ He-Ne ガスレーザー (633 nm)、765-780 nm チューナブルレーザー (波長可変レーザー)、808 nm 安定化ダイオードレーザーである。波長が 1 つのレーザーでは干渉縞の周期性より計測に不定性が出てしまうので複数のレーザーを使う。段差が全くない場合各波長の干渉縞の見え方と数は同じになるはずで、段差が生じるとそれぞれの波長に対する周期性に合わせた変化が見えるはずである。この時各波長の周期性はバラバラであるため計測の不定性がなくなる。そしてこの変化のパターンを解析して段差の計測を行う。実際の望遠鏡で使う主鏡はまだ完成していないため、実際の分割鏡より小さい 2 枚に分断された放物面鏡を使って計測をした (図 4)。この鏡は焦点距離が 2 m 程度なので実験室でも行いやすい (実際の主鏡は焦点距離 10 m 程度で実験室では難しい)。

カメラは CCD (図 5 の右図右側) を使った。カメラで読み取るまでの手順を以下にかく。図 5 の右図の光っている部分 (左側) からレーザーを照射し、左図の

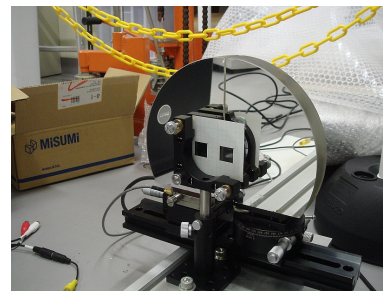


図 4: 分割鏡とハーフミラー

奥の鏡で反射させる。反射して返ってきた光を CCD で読み取る。焦点位置は右図の真ん中の棒の位置にあるため光源もカメラも焦点位置にない。これは測定原理のところでも説明した条件 (光源もカメラも焦点に存在すること) を満たしていないが、2 つとも焦点の近くに配置しており計算上も実際の計測にも問題ないことが確かめられている。

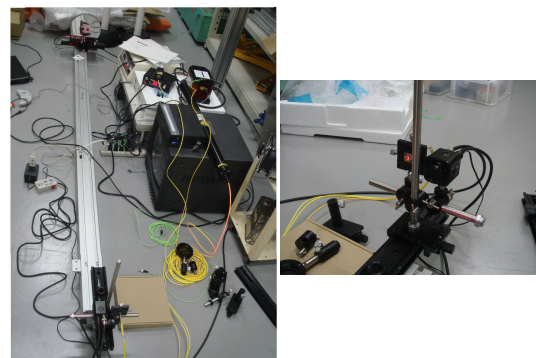


図 5: 実験装置

最初の測定には波長可変なチューナブルレーザーを使う。このレーザーは波長を 765-780 nm の間で連続的に変化させることができる。このため連続変化する干渉縞を観察しながら鏡の位置を動かしていった、干渉縞がほとんどずれない段差があまりない鏡の位置をある程度同定することができる。鏡の位置がある程度決まったら、次に He-Ne レーザーと安定化ダイオードレーザーの干渉縞をしてみる。この 2 つのレーザーは波長が安定しており正確な計測が可能となる。段差が全くなければ同じ干渉縞が見えるが、わずかでも段差があれば干渉縞の見え方が変わってくる。これらの干渉縞を CCD で読み取り、そのパターンを解析して段差を計測する。理論上は

数十 nm まで計測可能で、最終的には段差がこのレベルの誤差になるまで小さくしたい。

4 これまでの成果

実際に CCD カメラで撮った干渉縞を図 6 に示す。

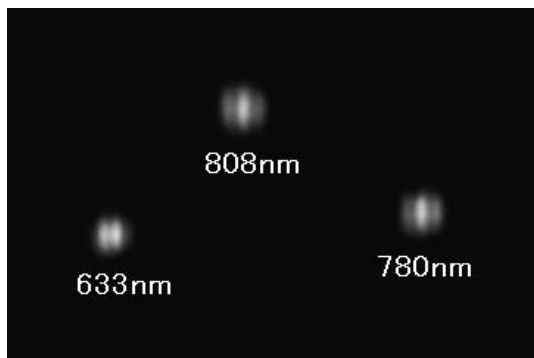


図 6: 位相差がほぼない状態の干渉縞

像がボケてしまっているがこれは地面の振動や大気の揺らぎなどで生じてしまう。これを動画として撮影し、段差の評価を行う。動画を見ると、揺らぎが干渉縞 1 つのずれより大きいことが分かり変化も早かった。そのため静止画 1 枚では測定不能で動画として撮影しなければならないことが分かる。この動画を解析するためにスポット形状から位相を判定するソフトを作り映像に適用した。その結果が図 7 である。図 7 の横軸は時間で縦軸は位相のずれを表している。上段は安定化ダイオードレーザーに対する He-Ne レーザーの相対重心と相対位相、下段は安定化ダイオードレーザーに対するチューナブルレーザー (765-780 nm で動かした) の相対重心と相対位相である。それぞれの色は桃:相対位相、赤:メジアンフィルター+三角変化差し引き後、青:相対 x 座標、水:相対 y 座標、緑:スポットの鮮鋭度となっている。

図 7 の下段を見ると途中でチューナブルレーザーでスキャンした (波長を動かした) ことがはっきりと分かる。また、この結果から段差を計測すると $7.811 \mu\text{m}$ となった。さらに図 8 にも結果を示す。これは位相が合っている状態から約 50 nm ステップで状態を変えてスキャンした結果の中で最終的に一番小さい段差 16 nm のもので、かなり良い精度で計測できた。

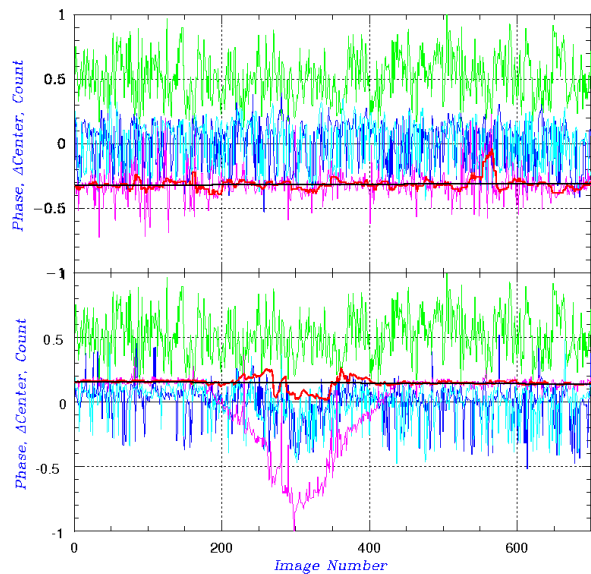


図 7: 位相解析 1

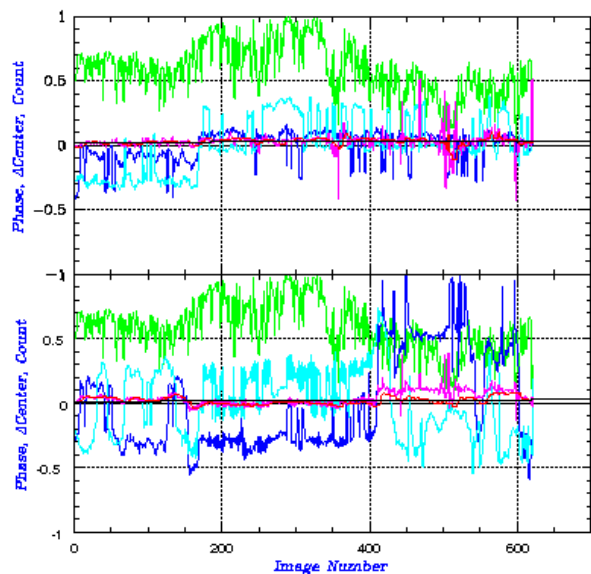


図 8: 位相解析 2

5 今後の課題

図 7,8 で示した解析結果は実はカメラでの測定と同時にやったものではなく後から撮影した動画を元に計算した結果である。実際の望遠鏡を扱う場合は測定と同時に計算しなければならないので、そのよ

うな装置とソフトの開発を行わなければならない。
また、今回用いた鏡の焦点距離は約 2 m で実際の望遠鏡の焦点距離 10 m よりも短い。焦点距離が長くなると地面の振動や大気の揺らぎによる影響が大きくなることが予想され、仕様 (誤差数十 nm) を満たすかどうか微妙であり実際焦点距離 10 m の鏡を使って段差を計測する必要がある。

他にも、鏡の上に設置するハーフミラーは小さいほど鏡の面積が大きくなるので良い像が得られるが、小さすぎると回折現象の影響が無視できなくなるためそのことも考慮に入れなければならない。

6 参考 Web ページ

京大岡山 3.8 m 新技術望遠鏡,
<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/iwamuro/Kyoto3m/>,
(参照 2013-05-27)