

PCS イメージ像判別における光源波長の影響

岡山新技術望遠鏡グループ / Atsushi Shimono

平成 22 年 5 月 12 日

目次

1	概要	1
2	セグメントギャップに対する位相ずれ	2
2.1	像からの位相差決定時における波長ずれの影響	3
2.2	像からの位相差決定時におけるレーザー光 FWHM の影響	3
2.3	コヒーレンス長との比較	4
3	結論	4

1 概要

本望遠鏡は主鏡に 18 枚の分割鏡を採用しており、良好な像を得るためにはそのセグメント間の位置・位相あわせを行う必要がある。観測中はセグメントに取り付けた非接触センサーの値を利用して、ギャップ距離測定を行うことで位相あわせを実現する。しかしながら、一番最初の位相あわせの原点だしが必要であり、かつ非接触センサーの原点は徐々に変動するため数日から数週間おきに原点補正を行う必要があり、このために光学的な原点補正を行うための機構が必要となる。この機構が、PCS — Phasing Camera System であり、セグメントの向きを測定するための SH (Shack-Hartmann) Camera とセグメント間の位相差を測定する PC (Phasing Camera) によって構成される。この二つの機能は、取得するイメージとしては主鏡のどの部分を見ているかだけの違いであり、像を分割するマイクロレンズを入れ替えることで実現される。SH ではセグメントひとつに付いて 1 箇所、PC についてはセグメントが接する辺ひとつに付いて 1 箇所のマイクロレンズが配置される。(図 1)

Keck などでの PC では自然の星の光を利用した測定が行われているが、本望遠鏡のサイトである岡山では大気揺らぎのために困難である(フリードパラメータが小さい)ことが予想される。このため本望遠鏡での PC は、望遠鏡の境界に口径数 cm の平面ハーフミラーを設置し焦点面から複数波長のレーザーを短時間照射することで、自然の星を用いなくても任意の望遠鏡の向きで短時間に分割鏡の境目での位相差を測定する方法を採用している。(図 2)

このとき、PC では入射したレーザー光の波長におけるセグメント間の位相差に対応したさまざまな像が取得される(図 3)。この像を解析することにより該当する波長における位相差を求め、それを繰り返し複数の波長での位相差をあわせて計算すると、実際のセグメント間のギャップの大きさが求まる。

このような、本望遠鏡に搭載しようとしている PC システムで要求される仕様をまとめると次のようになる。

- 複数の波長を利用可能なレーザー発振装置を搭載していること
- レーザー発振は安定しており、かつ短時間で波長間の切り替えが可能なこと
- 測定可能なセグメント間ギャップは $\sim \pm 10\mu\text{m}$ 程度あること
- 各波長での位相差を 13 分割して求められること ($\pi/13$ の確度; $\pm\pi$ は区別できないので)
- $\sim \pm 10\mu\text{m}$ の幅でセグメント間ギャップ特定な波長数を持つこと

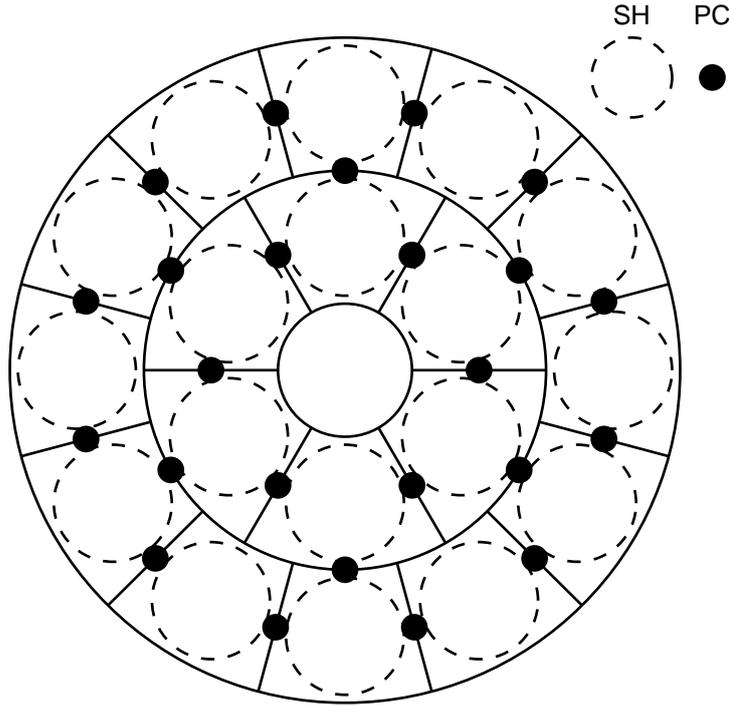


図 1: SH/PC マイクロレンズ配置図

- レーザー光が通過する光路の光路差より長いコヒーレンス長を持つこと

ここでは、これらの仕様に対して、実際に必要とされるレーザーの安定性がどの程度のものであるかを調査する。市販のレーザーでのこの安定性は、発振されるレーザーの波長方向広がり (FWHM (nm)、温度に対する波長シフト量 (nm/K)、出力パワーに対する波長シフト量 (nm/W) などによりあらわされる¹。

また、コヒーレンス長への要求は主鏡のギャップが光路差となるためから $10\mu\text{m}$ 程度以上が必要である。

2 セグメントギャップに対する位相ずれ

セグメント間に d のギャップができている場合 (図 4)、ハーフミラーで折り返されて出射されるレーザー光の光路差は $4d$ となる。

このとき、入射レーザー光の基準波長を n 、波長ドリフト量を $\Delta n = \alpha$ とすると、 n および $n + \alpha$ の波長を持つレーザー光での位相差 ϕ_n, ϕ_α は

$$\phi_n = 2\pi \cdot \frac{4d}{n}, \quad \phi_\alpha = 2\pi \cdot \frac{4d}{n + \alpha}$$

とあらわされる。ただし、実際に観測される位相差はこの表記の値に対して 2π で規格化された値となる。

いま、レーザー光の波長ずれの位相差への影響を調べたいので、 $\phi_n - \phi_\alpha$ を評価することが必要とされ、 $\alpha \ll n$ であることを利用すると

$$\Delta\phi = \phi_n - \phi_\alpha = 2\pi \cdot \left(\frac{4d}{n} - \frac{4d}{n + \alpha} \right) = \frac{8\pi d \cdot \alpha}{n(n + \alpha)} \simeq \frac{8\pi d \cdot \alpha}{n^2}$$

である。

¹Hz で表されている場合、レーザーの周波数 (600nm だと 5×10^{14} Hz) に対するのシフト量となる。たとえば、500MHz (5×10^8 Hz) の場合は 0.0006nm に相当する。

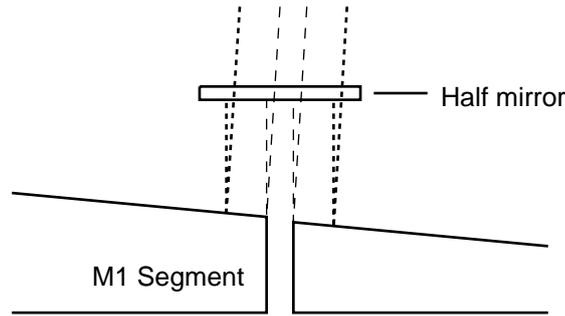


図 2: 主鏡セグメント上へのハーフミラー設置図



図 3: PC 像サンプル

2.1 像からの位相差決定時における波長ずれの影響

ある像を取得した際に、利用していると考えているレーザー光波長 n に対し、実際には $n + \alpha$ の波長のレーザー光が発振されていたとする。ただし、レーザー光は完全に単色 (FWHM 0) であると仮定する。このときに、像から位相差を決定するときどの程度の影響が出るかを評価する。

上述の表式から位相ずれの影響が最も大きく出るのは、セグメント間ギャップが想定しているレンジの両端まで大きくずれているときである。このとき、仕様から $d/n \sim 10\mu\text{m}/500\text{nm} = 20$ 程度²である。また、求める位相差のステップは 13 段階であるので $\pi/25$ 程度³のずれまでは許容できると考えるものとする。つまり、条件は

$$\Delta\phi = \frac{8\pi d \cdot \alpha}{n^2} < \frac{\pi}{25}$$

となり、 $d/n \lesssim 20$ から $\alpha/n \lesssim 4000^{-1}$ となる。(たとえば、 $n=500\text{nm}$ だと $\alpha \lesssim 0.125\text{nm}$ となる。)

2.2 像からの位相差決定時におけるレーザー光 FWHM の影響

レーザー光の発振波長に広がりがある場合、つまり $\text{FWHM} > 0$ の場合には、(連続した) 位相差がある複数のレーザー光の重ねあわせとして考えることができる。

この場合、どの程度までの FWHM が許容されるかは厳密には像を合成して、そこから位相差を求めるという解析が必要であるが、波長ずれが位相差決定に及ぼす影響から推測は可能であろう。ただし、波長方向に像を重ね合わせることでなるので、前節における単純な位相ずれでなく、像をぼやけさせ、像から位相差を求めるルーチンでの精度を落とす方向に効く効果となる。

簡単化のためにレーザー光の波長に対する発振強度分布を FWHM σ をもつガウス関数の形であるが、強度が中心波長強度の半分に落ちた波長での影響で代表させると考えると、この波長での位相差 (の最大値⁴) は波長が $n + \sigma/2$ であることから $4\pi d \cdot \sigma/n^2$ である。これが前節と同じ条件に収まっていればよいと考えると、 $\sigma/n \lesssim 2000^{-1}$ である。

²レーザー光は 500nm のものを利用していると仮定している。が、実際には可視光から近赤外のレーザー光 (500-900nm 程度) を利用する予定であるので影響は最大で半減する。

³ただし、実際にはイメージからどの程度の確度で判別できるかを理論的な像などから調査する必要がある。

⁴ $0, \pi$ での折り返しを考慮する必要がある

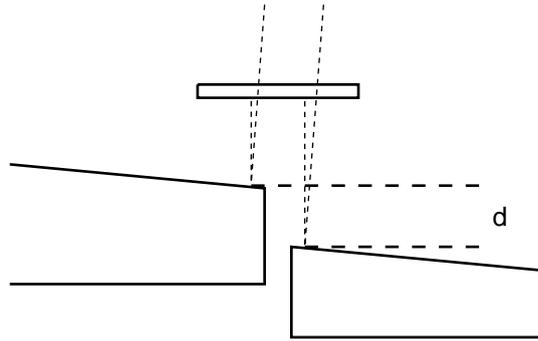


図 4: セグメント間のギャップ

2.3 コヒーレンス長との比較

一般に光のコヒーレンス長は、(波長)²/(波長幅)としてあらわされる⁵。ただし、レーザー光のスペクトル形状によりコヒーレンス長は短くなる。(ガウス分布で約半分弱程度。)

前節での $\sigma/n \lesssim 2000^{-1}$ の条件と比較すると、 $\sigma/n = 2000^{-1}$ のレーザー光のコヒーレンス長は、波長 500nm を仮定すると

$$L = \frac{(500 \times 10^{-9})^2}{500 \times 10^{-9} / 2000} = 1mm$$

となる。これは仕様の最低 10 μ m を満たす。

今回の仕様である 10 μ m を満たすレーザー光の波長幅・帯域は、25nm 以下の波長幅 (500nm レーザーの場合)、もしくは 30THz 以下の帯域幅となる⁶。

3 結論

3.0.1 レーザー光源への要求

1. レーザー光の広がり (帯域幅) は $\sigma/n \lesssim 2000^{-1}$ を満たす必要がある。この場合コヒーレンス長は問題ない。
2. レーザー光の波長安定性 $\Delta\lambda$ は、レーザー光の波長 λ に比べ $\Delta\lambda/\lambda \lesssim 4000^{-1}$ を満たす必要がある。

3.0.2 市販レーザー電源との比較

波長安定化ダイオードレーザー ALFALIGHT 社⁷ の 793nm ファイバー付き安定化ダイオードレーザーの仕様⁸ と比較すると表 1 となり、条件ぎりぎり程度となる。

表 1: ALFALIGHT 社 793nm 安定化ダイオードレーザー

項目	仕様値	条件
中心波長	791.5nm	—
出射光 FWHM	0.5nm	< 0.4 nm
対温度での波長安定性	0.07nm/K	(< 0.2 nm)
対出力での波長安定性	0.2nm/W	(< 0.2 nm)

⁵もしくは、(光速)/(帯域 Hz)となる。

⁶通常のレーザーダイオードでも十分満たされている範囲のはず。THz 以上の帯域幅のは逆に低コヒーレンスレーザーの部類に入ると思う。

⁷<http://www.alfalight.com/components.aspx>

⁸<http://www.alfalight.com/pdf/QS4152%206-pin%20793CW%20v1-4.pdf>