

Development of Adaptive Optics:

Measurements of Atmospheric Turbulences by Wavefront Sensor

高見英樹、片坐宏一、板部敏和、廣本宣久、有賀規

郵政省通信総合研究所

Communications Research Laboratory

Abstract

We have developed a wavefront curvature sensor for measuring the atmospheric turbulence which causes wavefront error of light from stars. The knowledge of time and spacial characteristics of the turbulence is essential for development of adaptive optics system. The sensor has a high frame rate of 380 Hz and a high spatical resolution of 3 cm. We made a measurement of atmospheric turbulence attached to CRL 1.5 m telescope. The results show that the powerspectrum of the curvature distribution is almost constant; the higher spacial component is smaller than expected from the Kolmogorov's turbulence theory. It is due to the surturation effect of wavefront curvature by large amplitude of the turbulence.

1. はじめに

通信総合研究所ではアダプティブ光学の開発を行ってきている。アダプティブ光学とは、大気の揺らぎによる星などからの光波面の位相のずれを実時間で測定し、受光光学系（通常は小さい鏡）をそれに合わせて変形させることによって、回折限界の像を得る技術である。そのためには、大気揺らぎの空間的性質（制御の空間分解能：制御素子の数を決める）と時間的性質（制御速度を決める）を知っておかなければならない。大気揺らぎの原因となる、空気の密度の空間的な揺らぎの性質については、Kolmogorovの乱流理論などの研究がある。それによると、密度揺らぎの空間周波数領域でのパワースペクトルは

$$|\rho(\kappa)| \propto \kappa^{-11/3}$$

で表され、実験的にも概ね確かめられている。しかし、その時間的変化については、上記の乱流のパターンが風に流されるという単純な解釈がほとんどである。そこでわれわれは、空気の密度揺らぎによって起こる光の位相の揺らぎの空間分布と、その時間変化を測定するために波面曲率センサを開発し、CRL 1.5 m望遠鏡を使って測定をおこなった。

2. 波面曲率センサ

波面曲率センサはF. Roddierによって提案されたもので、星の焦点内像と焦点外像を同時に取り、両者の差が波面の曲率に比例することを利用したものである。我々は、その変形としてImage SpaceからObject Space変換する光学系（レンズ1枚）を使ったセンサを製作した。その原理を以下に述べる。Object Spaceにおいては、像の明るさは瞳面の位置から Δz 離れたところでは

$$I = I_0 + \frac{\partial I}{\partial z} \Delta z = I_0 + [I_0 \frac{\partial W}{\partial n} \delta_0 - I_0 P \nabla^2 W] \Delta z$$

ここで I_0 は瞳面での明るさで、望遠鏡の主鏡の入る光の明るさに対応する。このとき I_0 の分布も一定ではなく、空気のレンズ効果のせいで強度の変化を受ける（シンチレーション）。 $\frac{\partial W}{\partial n} \delta_0$ は、瞳面の端から外へ向かった波面の傾き（1階微分）である。Pは瞳面の中では1外では0となる関数である。そして $\nabla^2 W$ が波面の曲率（2階微分）である。 I_0 とIを同時に測定すること

によって、開口の端での波面微分と内部の波面曲率を次のように得ることができる。

$$\frac{I}{I_0} = \frac{I_0}{I_0} = \left[\frac{\partial W}{\partial n} \delta_0 - P \nabla^2 W \right] \Delta z$$

このとき、波面の曲率とシンチレーションのパワースペクトルは、空気の密度揺らぎのパワースペクトルが $\kappa^{-11/3}$ に比例する場合には $\kappa^{1/3}$ に比例する。 $\nabla^2 W$ は大気揺らぎによる波面の乱れをほぼ等しい比率で積分したものが得られるが、シンチレーションでは主に上層の大気揺らぎの影響を受けるので、両者を比較することにより、揺らぎの高さに関するおおまかな情報を得ることができる。

この原理に基づいて製作した波面曲率センサーの諸元と概略図を表1、図2に示す。

表1、 波面曲率センサーの諸元

カメラヘッド：128×128素子	MOSレチコンカメラ	(EG & G 製)
イメージンテンシファイヤー：2段MCP+イメージブースター	(浜ホト製)	
フレームレート：3.8～380Hz	(760Hzまで変更可能)	
A/D変換：8ビット		
画像メモリ：8Mバイト→512フレーム		
コントロール：NEC PC9801コンパチ		
データ蓄積：20MBハードディスク→660MB光磁気ディスク		

この光学系により一つのカメラ焦点面に I と I_0 を同時に写すことができる。測定空間分解能は3cm、測定範囲は1.5m径である。MOSレチコンカメラはCCDに比べてS/Nが悪く、イメージンテンシファイヤーの蛍光面の輝度が(増倍率ではなく)足りないため、ブースターを用いている明るさを稼いでいる。データ取得には380Hzで512フレーム約1.3秒であるが、光磁気ディスクへのデータ転送には約9分かかる。

3. 観測

この波面センサーをCRL1.5m望遠鏡ナスミス焦点に取り付けて1992年1月28日に観測を行った。天体はベテルギウス、観測波長は700nm ($\Delta\lambda = 80$ nmの広帯域フィルター使用)である。380Hz (2.6ms)で512フレーム、38Hzで512フレーム、3.8Hzで64フレームのデータを取った。図3はシンチレーション(a)と曲率(b)に分離した2.6msごとの連続した画像である。この図からシンチレーションの変化は、上下方向に風によって流されていく成分が顕著であることがわかる。速度は30m/sで、高層(~10km)のジェット気流に起因すると考えられる。それにたいして波面曲率分布の変化には高層成分以外の(接地境界層、ドームシーイング等)遅い成分のほうが効いている。シンチレーション、波面曲率分布のパワースペクトルをとり、512フレーム平均したものを図4に示す。両者とも $\kappa^{1/3}$ からずれており、波面曲率はおおよそ κ^0 、シンチレーションはより高空間周波数成分が落ちている。これは空気の密度揺らぎにたいして、波面曲率及びシンチレーションが飽和しているためであると考えられる。特にシンチレーションの方が、飽和を起こしやすい高層の揺らぎの寄与が多いため大きく高周波成分が落ちている。

4. 今後の方針

現在、データ解析は進行中である。この観測結果からアダプティブ光学の必要な制御点数を決めるFriedパラメータ r_0 、制御時間周波数と制御誤差との関係を求めることができる。また季節をと場所(マウナケア等)変えて、観測を行っていく予定である。

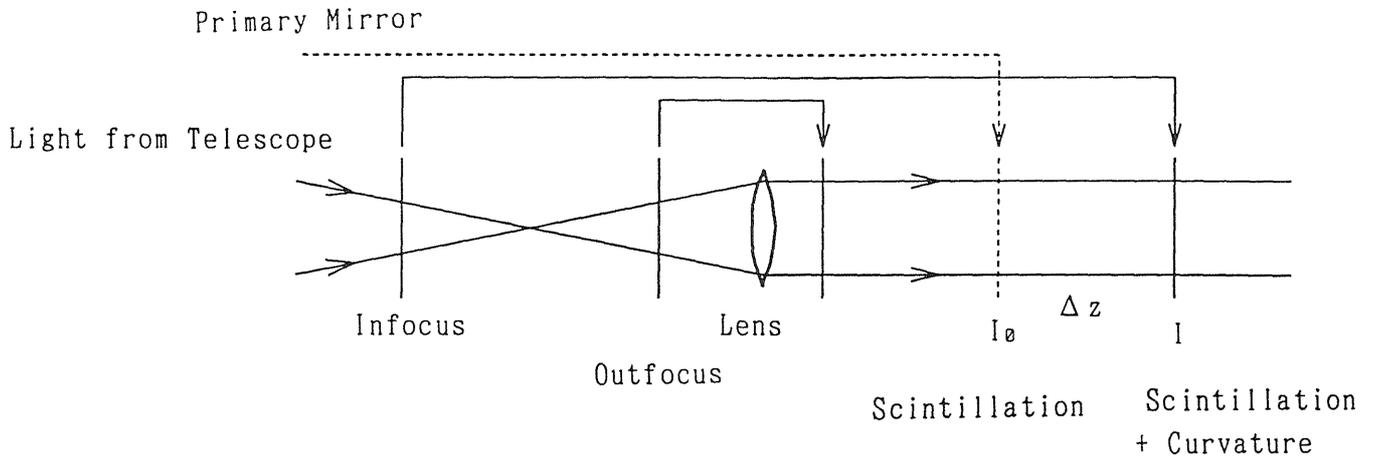


Fig.1 Principle of Wavefront Curvature Sensor

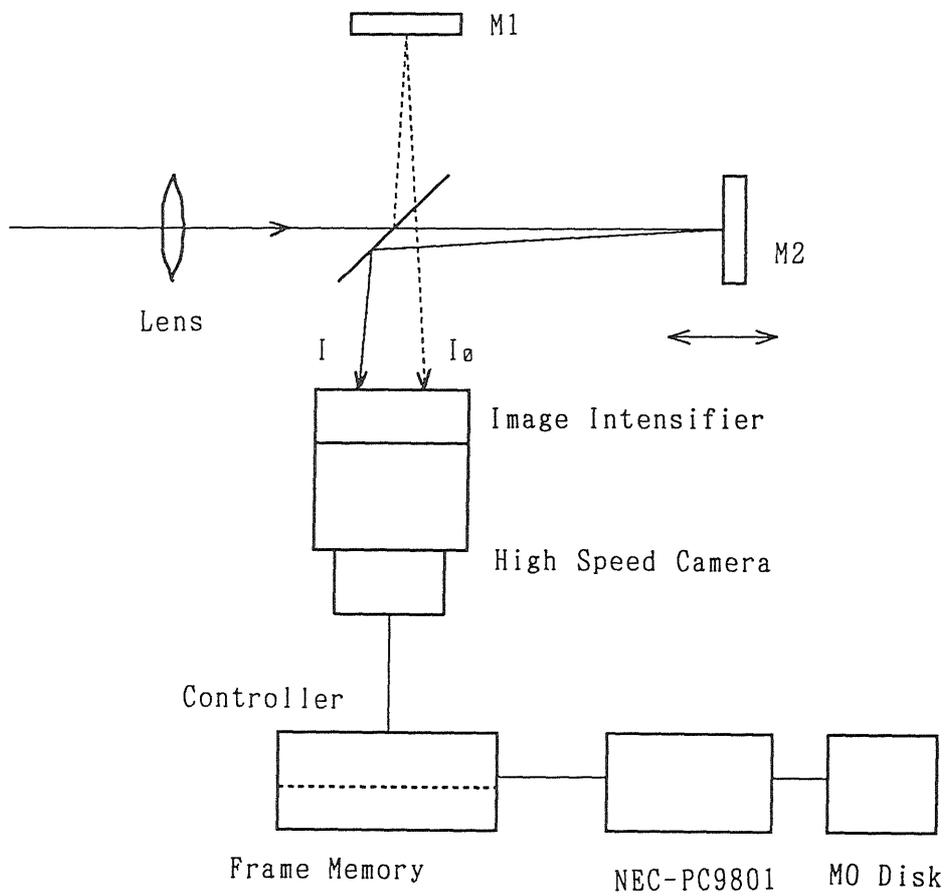
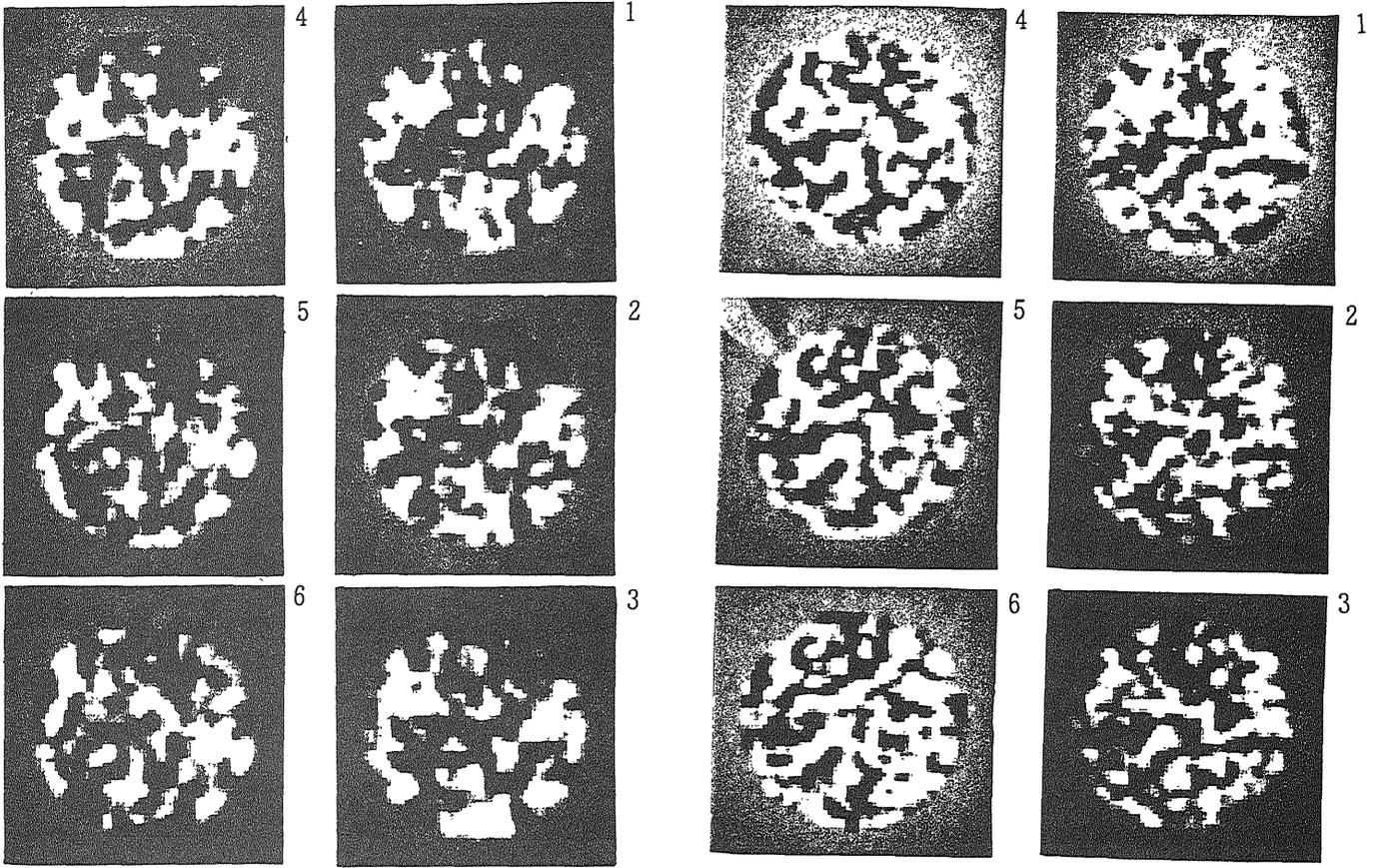


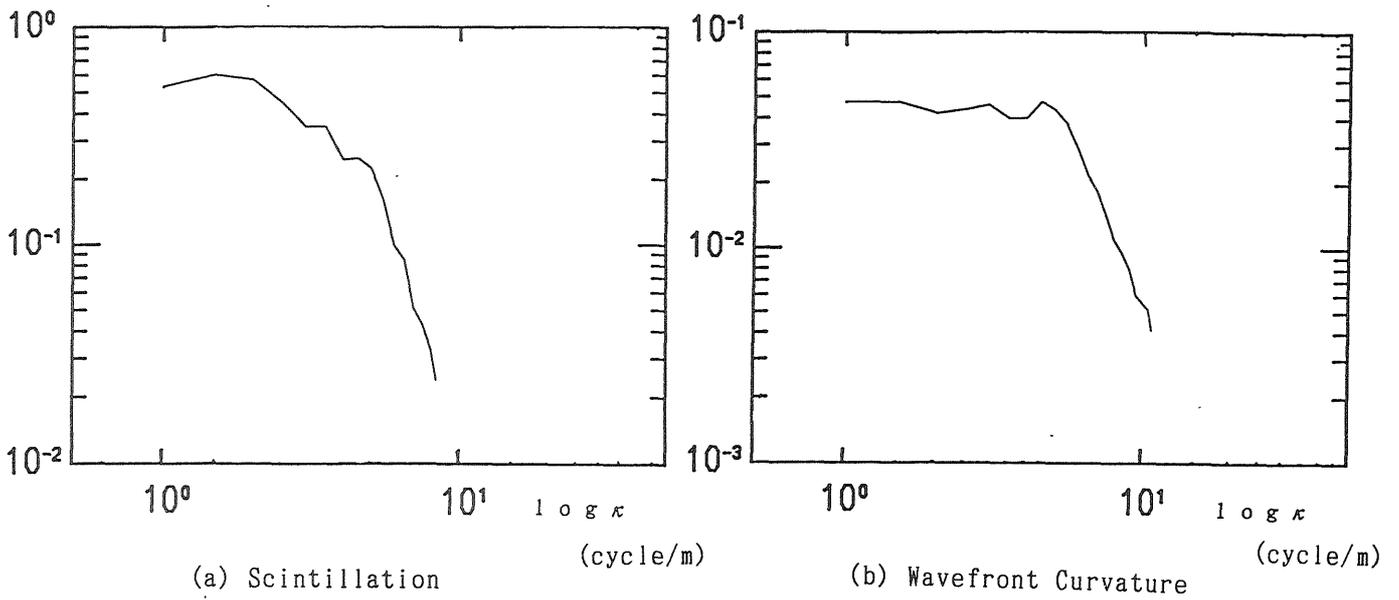
Fig.2 Configuration of CRL Curvature Sensor



(a) Scintillation

(b) Wavefront Curvature

Fig. 3 Images of Measured Scintillation(a) and Wavefront Curvature(b) every 2.6 msec



(a) Scintillation

(b) Wavefront Curvature

Fig. 4 Powerspectrum of the Scintillation(a) and Curvature(b)