

修士論文

すばる望遠鏡レーザートモグラフィ補償
光学に向けたCMOSカメラ制御系開発と
ローリングシャッター読み出しによる波面
測定

Development of CMOS camera control system for
Laser Tomography Adaptive Optics on Subaru
Telescope and wavefront estimate with rolling shutter
readout

東北大学大学院理学研究科
天文学専攻修士2年

櫻井 大樹

0.1 要旨

レーザーガイド星を用いた補償光学は地上大型望遠鏡での可視近赤外線観測の基盤技術となっている。すばる望遠鏡には既に1つのレーザーガイド星を用いた補償光学装置 AO188 が実装されているが、円錐効果のため可視光領域においては十分な補償が達成できない。そこで我々のグループでは AO188 のアップグレードとして4つのレーザーガイド星を用いたレーザートモグラフィ補償光学装置を開発しており、可視光領域において十分な補償を達成することを目指している。可視光で高空間分解観測を行えることで近傍宇宙の銀河における星の運動状態がより高空間分解で観測できるほか、活動銀河核の中心核近傍の物理状態がわかることで銀河とブラックホールとの共進化についてより詳細に解明されることが期待される。LTAO は4つのレーザーガイド星の波面測定をリアルタイムで行うため、カメラの高速読み出しに加えて4つのカメラのデータ同期性が求められる。そこで LTAO に使用される CMOS カメラの読み出し評価試験を行った。CMOS カメラ特有の読み出し方式であるローリングシャッターによる影響を LED 高速点滅実験から評価した結果、ある1方向に 200×200 pixel の画素数で露光と読み出しの時間に約 1ms 程度のズレがあることがわかった。このズレは $> 400H_z$ でリアルタイム補償を行う LTAO において、波面推定精度に影響が出ると予想される。そこでローリングシャッターによる波面測定を AO シミュレーションコードを用いて再現し、波面測定精度への影響をシミュレートした。その結果 fitting error や temporal error と比べるとローリングシャッターによる波面測定精度への影響は小さいという結果が得られたが、大気揺らぎ時間変動が大きい場合にはその影響が強まる結果となった。そこで、ローリングシャッターによる影響を軽減するために、大気ゆらぎの変動のアルゴリズムを検討しシミュレーションに実装して評価を行った。

目次

0.1	要旨	i
第 1 章	補償光学の原理	1
1.1	地上望遠鏡での可視光近赤外線観測	1
1.1.1	大口径地上望遠鏡	1
1.1.2	大気揺らぎによる検出限界への制限	1
1.1.3	大気揺らぎのモデル	2
1.1.4	大気揺らぎを特徴づけるパラメータ	5
1.2	補償光学	6
1.2.1	補償光学装置の概要	7
1.3	SHWFS	9
1.3.1	波面測定 of 原理	9
1.3.2	波面再構成	10
第 2 章	すばる望遠鏡 LTAO システムの概要	14
2.1	AO188	14
2.1.1	装置概要	14
2.1.2	Angular Anisoplanatism とコーン効果	15
2.2	レーザートモグラフィ補償光学	18
2.2.1	ハードウェア設計	19
2.2.2	ソフトウェア設計	22
2.3	可視光近赤外線天文学へのフィードバック	24
第 3 章	CMOS センサーの読み出しタイミングの評価	26
3.1	CMOS	26
3.1.1	ローリングシャッター読み出し	26
3.1.2	Orca flash 4.0 v2 の撮像モード	28
3.2	CMOS センサーの評価	30
3.2.1	カメラの制御	30

3.2.2	1 秒間のフレーム数 (Frame Per Second)	31
3.2.3	画像サイズと FPS との関係	33
3.2.4	露光時間サンプリング	34
3.2.5	ローリングシャッターの評価	35
3.2.6	行方向に対する読み出しのズレの測定	38
3.2.7	トリガ制御の評価	40
3.2.8	LTAO に向けたカメラの複数制御	44
第 4 章	シミュレーションのセットアップ	47
4.1	シミュレーションパラメータ	47
4.2	シミュレーションの流れ	50
第 5 章	シミュレーション結果	54
5.1	波面推定の誤差	54
5.2	グローバルシャッターのみの場合	56
5.3	ローリングシャッターのシミュレーション結果	62
5.4	シミュレーションの考察	65
第 6 章	議論	68
6.1	大気揺らぎの予測アルゴリズム	68
6.2	実装結果と考察	69
第 7 章	まとめ	73
	謝辞	75
	参考文献	76

第 1 章

補償光学の原理

1.1 地上望遠鏡での可視光近赤外線観測

1.1.1 大口径地上望遠鏡

現代の可視光近赤外線天文学の分野では、より高い分解能の獲得のために望遠鏡の巨大化が進んでいる。今現在存在している地上望遠鏡は、ハワイにあるすばる望遠鏡(口径 8.2m)をはじめ Gemini north(8.1m) や keck(10m)、さらにチリにある VLT(8.2m) や Gemini south(8.1m) などがあるが、近い将来には TMT(30m) や ELT(39m) や GMT(24.5m) といった 30m 近い口径を持つ望遠鏡を建設するプロジェクトが既に始まっている。可視光近赤外線天文学の分野ではこれらの望遠鏡の登場により、より高い分解能での観測が期待されている。

1.1.2 大気揺らぎによる検出限界への制限

可視光や近赤外線領域で観測に用いられる望遠鏡の巨大化にはその望遠鏡が持つ分解能が大きく関わっている。分解能は観測波長と望遠鏡の口径の大きさを用いて

$$\theta \sim \frac{\lambda}{D} \quad (1.1)$$

で定義されていることが知られている。分解能の定義式には観測環境のパラメータが含まれていないため、得られる像が回折限界を達成するような理想的な場合に望遠鏡が持つ分解能力を示している。可視光近赤外線観測で望遠鏡の大型化が進められているのは口径を大きくすることにより潜在的に望遠鏡の分解能力を向上する目的があるが、実際には大気揺らぎや光学的な制限により式 (1.1) のような角度分解能を達成することは難しい。

地上で大口径の望遠鏡を作っても式 (1.1) のような式で得られる角度分解能を達成で

きない原因の一つが前述したように大気揺らぎの影響である。大気揺らぎは大気の色度や密度が場所によって異なることで屈折率にムラが生まれることで起こる。天体からの光は無遠慮にある点源とみなすことができるため、地球の大気に光が届く時には平面波と仮定できるが、屈折率にムラある空間を光が伝搬することで等位相面 (波面) が乱れることにより観測される星像が広がり、理想的な場合の角度分解能に比べて実際の角度分解能は悪化してしまう。図 1.1 は大気揺らぎのない場合と大気揺らぎがある場合に結像にどのように影響するのかを示した図である (Hardy [11])。大気揺らぎのない理想的な場合では回折限界を達成しているのでエアリーディスクの幅を持つ星像が得られるが、大気揺らぎがある場合では対象天体からの光の波面が乱れているので、得られる星像はエアリーディスクの幅よりも広がってしまう。

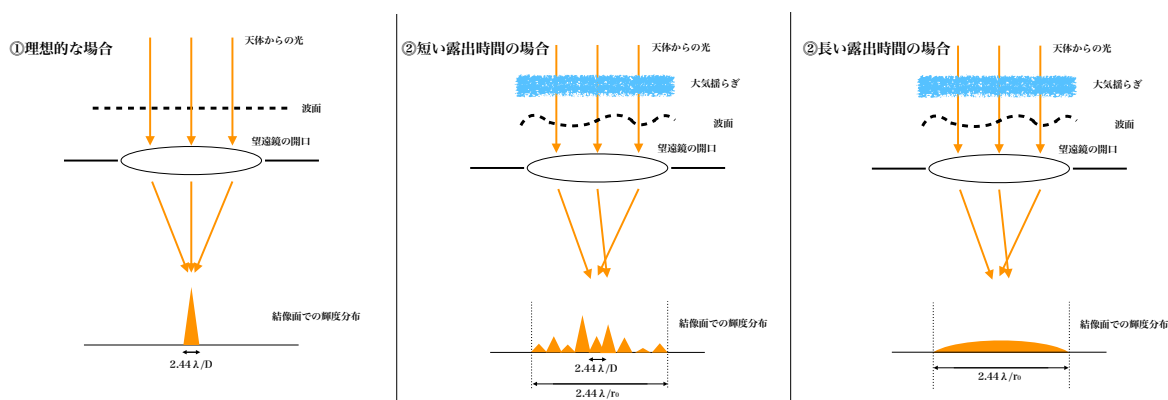


図 1.1 大気揺らぎがない場合 (①) と短い露出時間 (②)、長い露出時間 (③) の場合のそれぞれにおいて結像面でどのような影響が現れるかを示した図。大気揺らぎがない理想的な場合では点源の光源に対してエアリーディスクの幅を持った結像が得られるが、大気揺らぎを考慮すると短い露出の観測ではエアリーディスク程度の細かいスケールのゆらぎを持ち星像全体では $2.44\lambda/r_0$ だけ広がりを持つような振る舞いが見られる (r_0 については 1.1.2 節で説明する)。一方長い時間観測を行うとエアリーディスク程度の細かいスケールの揺らぎは長時間観測の中で打ち消され $2.44\lambda/r_0$ の幅で広がった星像がみられる。

1.1.3 大気揺らぎのモデル

大気揺らぎの原因である場所による温度のムラや大気粒子の密度のムラは地表に対して高度方向には起流は気流の流れの境界面で強く生じるので、大気揺らぎはある高度での乱流の層が連なったものとして考えることができ、ある高度における大気揺らぎを特徴づけるパラメータが決まると大気揺らぎを記述することができる。大気揺らぎは地表から高度 20km に渡って存在しており、その影響は気圧の高い地表面付近で最も強く、高度が大きくなるにつれて弱くなるが上空 10km 付近では対流圏近くでそ

の強度が強まることが観測的に知られている (図 1.2)。

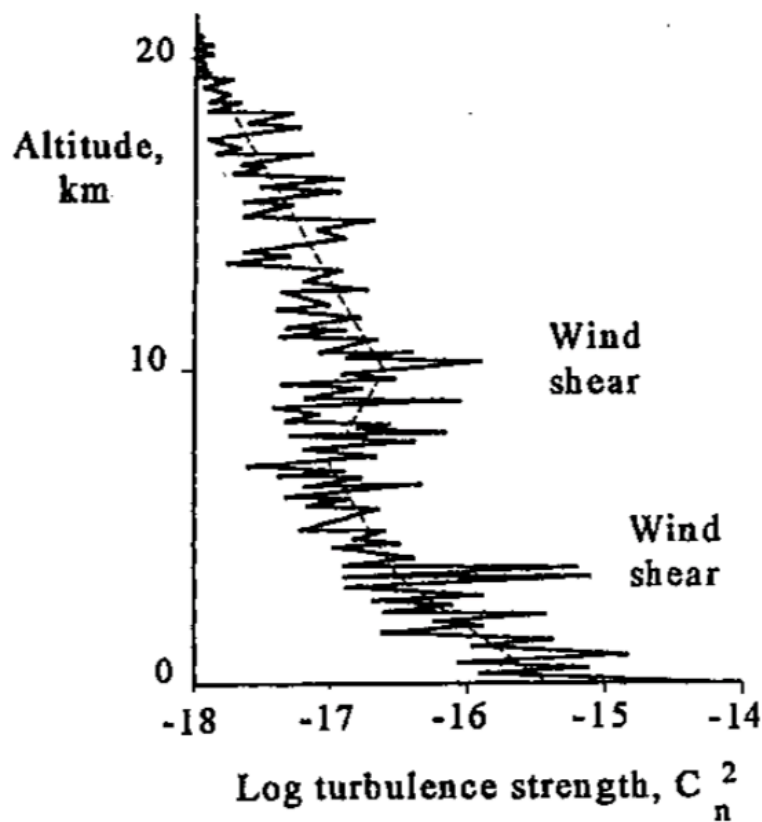


図 1.2 大気揺らぎが高さ方向に対してどのような強度分布を持つのかを示した図 (Hardy[11])。縦軸は海面からの高度 (km)、横軸は大気揺らぎの強度を対数スケールで示している。地表層付近で最も大気揺らぎが大きく、高度が大きくなるにつれて指数的に強度が減少しているが対流圏付近では温度変化が最も大きく、また wind shear により風速が大きいため、強度が高いことがわかる。

大気揺らぎによる乱流の記述は複雑であるが、コルモゴロフ [Kolmogorov[24]] によって大気モデルが提案され、大気揺らぎによって位相面がどれほど乱れているのかを解析的にモデル化することができる。

Kolmogorov 乱流

Kolmogorov は乱流が一様で等方的、また非圧縮であることを前提とすると、大気乱流モデルは太陽光といった外部からエネルギーによって乱流が大きいスケール (outer scale L_0) で発生し、エネルギーが流体中を伝搬していくうちに乱流が無視できるほど小さいスケール (inner scale l_0) にまで分散されるとして大気乱流を記述している。Kolmogorov 則では $L_0 \geq l \geq l_0$ を満たすスケール l で決まる空間周波数を $\kappa = 2\pi/l$ とすると流体中を伝搬する 1 次元のエネル

ギー $E(\kappa)$ は

$$E(\kappa)d\kappa \propto v^2 \propto \kappa^{-2/3} \quad (1.2)$$

であり

$$E(\kappa) \propto \kappa^{-5/3} \quad (1.3)$$

で表される。また3次元におけるエネルギーは

$$E(\kappa)d\kappa = E(\vec{\kappa})d^3\kappa = 4\pi E(\vec{\kappa})\kappa^2 d\kappa \quad (1.4)$$

であるので

$$E(\vec{\kappa}) \propto \kappa^{-11/3} \quad (1.5)$$

と表される。温度や屈折率のムラは式(1.5)で表されるエネルギーによって空間周波数 κ のスケールで発生するためこのムラのパワースペクトルを $\psi(\kappa)$ とすると

$$\psi(\vec{\kappa}) \propto \kappa^{-11/3} \quad (1.6)$$

と表すことができる。

式(1.6)で表されるようなスペクトル密度を用いて Kolmogorov 乱流の位相への影響について考える。位相のばらつき度合いを表す構造関数 $D_\phi(\vec{r})$ は

$$D_\phi(\vec{r}) = |\phi(\vec{x}) - \phi(\vec{x} + \vec{r})|^2 = 6.88 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{5/3} \quad (1.7)$$

で与えられる (Hardy[11])。またパワースペクトルは自己相関関数のフーリエ変換であることを利用すると (ウィーラー=ヒンチンの定理)、位相の構造関数と位相変化のパワースペクトルは

$$\psi_\phi(\vec{\kappa}) = (2\pi)^{-3} \int B_\phi(\vec{r}) \exp(-i\vec{\kappa} \cdot \vec{r}) d^3r \quad (1.8)$$

と書くことができる。ここで $B_{phi}(\vec{r})$ は $\phi(\vec{x})$ の自己相関関数であり $B_\phi = \langle \phi(\vec{x})\phi(\vec{x} + \vec{r}) \rangle$ で表される。自己相関関数と大気構造関数との関係は

$$D_\phi(\vec{r}) = 2[B_\phi(0) - B_\phi(\vec{r})] \quad (1.9)$$

であることを用いると大気構造定数と位相変化のパワースペクトルの関係は

$$D_\phi(\vec{r}) = 2 \int \psi(\kappa) [1 - \cos(2\pi\vec{\kappa} \cdot \vec{r})] d\kappa \quad (1.10)$$

よって式(1.6)と式(1.7)と式(1.10)より Kolmogorov 大気モデルにおける $L_0 \geq l \geq l_0$ を満たすスケール l の乱流による位相変化のパワースペクトルは

$$\psi_\phi(\vec{\kappa}) = \frac{0.023}{r_0^{5/3}} \kappa^{-11/3} \quad (1.11)$$

と書くことができる。

Von Karman 乱流

コルモゴロフ乱流ではエネルギーが流体中を伝搬する時に最大の空間スケール (outer scale L_0) から徐々に小さいスケールに分散され最小のスケール (inner scale l_0) でエネルギーが散逸されている。そのため inner scale に近づくにつれて大気揺らぎの大きさは小さくなるため最小スケール l_0 の大きさの影響は無視できるが、outer scale では揺らぎの大きさが大きく、また数 m から数百 m に渡って変動するため新たに outer scale を考慮したパワースペクトルが必要である。Von Karman は式 (1.3) の位相パワースペクトルに加えて outer scale の効果を考慮した式を提唱している。

$$\Phi(\kappa)_{karman} = 0.023r_0^{-5/3}(\kappa + \kappa_0)^{-11/3} \quad (1.12)$$

ここで、 κ_0 は outer scale によって決まる空間周波数であり $\kappa_0 = 2\pi/L_0$ である。特に inner scale を考慮した Von karman の位相パワースペクトルは $\kappa_m^2 = 5.92/l_0$ として以下のように書くことができる。

$$\Phi(\kappa)_{karman} = 0.023r_0^{-5/3}(\kappa + \kappa_0)^{-11/3} \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2) \quad (1.13)$$

1.1.4 大気揺らぎを特徴づけるパラメータ

大気揺らぎの性質を記述するための代表的な大気揺らぎを特徴づけるパラメータとして以下のパラメータがあげられる。

Fried Parameter r_0

大気揺らぎによって光の波面が乱されるが、波面の位相ゆらぎの RMS が $1rad$ となる長さスケールより小さいスケールでは波面が局所的に平面とみなすことができる。この波面が局所的に平面とみなせるスケールはフリード長 (Fried Parameter) と呼ばれる。フリード長が大きくなると大気ゆらぎの強さは弱いとみなすことができ、大気ゆらぎの強さを表すパラメータとして用いられる。フリード長は天頂角 ζ と波数 k 、高さ h と各乱流層における $C_n(h)$ を用いて次のような式で表される。

$$r_0 = [0.423k^2 \sec(\zeta) \int_0^H C_n^2(h) dh]^{-3/5} (m) \quad (1.14)$$

よって、

$$r_0 \propto \lambda^{6/5} \quad (1.15)$$

Isoplanatic Angle θ_0

isoplanatic angle は波面の位相エラーが $1rad^2$ となるようなスケールの直径で

定義されている。

$$\theta_0 = 0.314r_0/H \quad (1.16)$$

ここで H は乱流層が1層のみだった場合の望遠鏡の開口からの高さである。実際には大気ゆらぎは複数の乱流層で構成されているので各乱流層を高さ方向で重み付けした値を H として以下のような式で定義する。

$$H = \sec(\zeta) \left(\int C_n^2 h^{5/3} dh / \int C_n^2 dh \right)^{3/5} \quad (1.17)$$

seeing

シーイングは大気揺らぎの強さを表す量として天体観測を行う際にその影響を測るパラメータとして使用されている。シーイングは点源が検出器面で像を結ぶ時の像の広がり FWHM の大きさで表され $\theta = 0.98\lambda/r_0$ となる。 r_0 が望遠鏡の口径よりも大きい場合 ($r_0 \geq D$) は像の広がりが λ/D の回折限界を達成した像を得る事ができるが、望遠鏡の口径よりも小さい場合 ($r_0 \leq D$) は像の大きさはシーイング程度の大きさに広がってしまい結果的に空間解像度の悪化につながってしまう。

Coherent Time τ_0

大気揺らぎの時間変動は乱流の各層での風速やその向きで決められており、ある時間スケール以下であれば、位相パターンを保ったまま望遠鏡に対して平行移動しているとみなすことができる、これを frozen flow という。frozen flow を仮定したとき、大気が移動により時間変動するスケールはコヒーレント時間 (Coherent time) と定義されており、以下のような式で書くことができる。

$$\tau_0 \simeq 0.314r_0/V_{wind} \quad (1.18)$$

ここで V_{wind} は H と同様に乱流層を一層とした場合の風速であり、大気揺らぎが複数層であることを考慮すると各乱流層の風速の重み付けで表され、以下の式で書くことができる。

$$V_{wind} = \left(\int C_n^2 v^{5/3} dh / \int C_n^2 dh \right)^{3/5} \quad (1.19)$$

1.2 補償光学

前節で説明したように場所による屈折率の違いを持つ大気揺らぎが光の位相を乱して観測装置での像に影響を与えてしまう。図 1.3 は望遠鏡の口径が 4m と 8m の場合それぞれについて回折限界を達成した場合とフリード長が波長 $0.5\mu\text{m}$ で 10cm と 20cm の値をとるような大気ゆらぎがある場合の観測波長と星像の直径の関係を示し

ている (Hardy[11])。口径の大きさと回折限界像の直径は反比例の関係であり、観測波長と回折限界像の直径は比例の関係にある一方で、大気ゆらぎがある場合には 1.1.4 節の seeing の式より星像の大きさと観測波長の関係は $\theta \propto \lambda^{-1/6}$ と表され、観測波長が短いほど星像の大きさが広がる関係がある。そのため観測波長が短い時や口径が大きい場合には大気ゆらぎの影響が大きくなるので補償光学と呼ばれる、乱れた対象天体からの光の波面を測定して補正する技術が地上にある可視赤外線望遠鏡に必要不可欠なものになっている。この節では補償光学について仕組みを説明する。

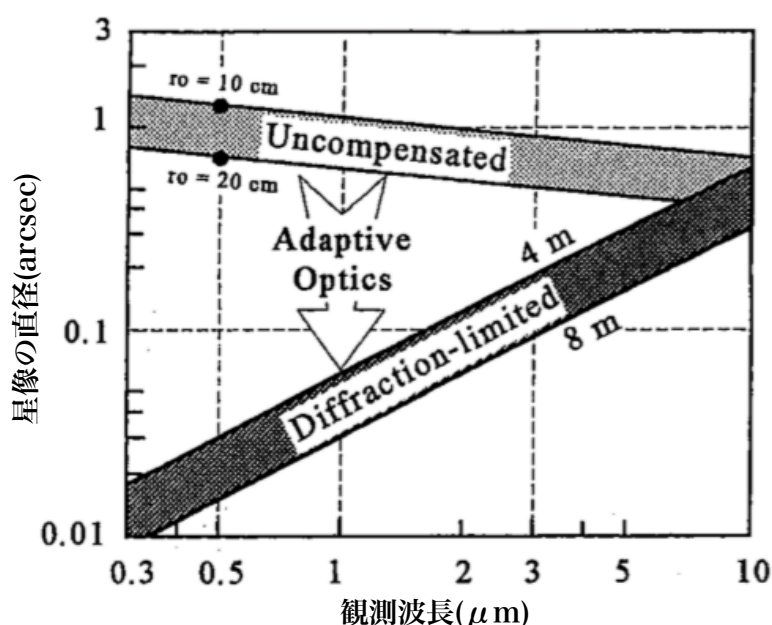


図 1.3 望遠鏡が口径が 4m の場合と 8m を持つ場合のそれぞれについて回折限界を達成した時の観測波長に対する星像の大きさと、波長 $0.5\mu\text{m}$ においてフリード長 $r_0 = 10\text{cm}$ 、 $r_0 = 20\text{cm}$ の大きさを持つ大気ゆらぎがある場合に観測波長と星像の大きさの関係を示した図 [(Hardy[11])]。波長が短いほど、回折限界像と補償光学を用いない場合の星像との差が大きく、また口径が大きいほどその差が大きいがわかる。そのため可視光近赤外線望遠鏡の大口径化に伴い、かつ可視光領域の観測にかけて補償光学が必要不可欠な技術であると言える。

1.2.1 補償光学装置の概要

天体からの光は無遠くにある点源とみなすことができるため地上の望遠鏡に光が届く時には平面波と仮定できる。しかし大気揺らぎの影響によって等位相面 (波面) が乱れた状態で望遠鏡に届く。補償光学では観測するターゲット天体とは別に大気揺らぎ

の測定するのに十分な明るさを持った自然ガイド星、またはレーザーガイド星と呼ばれる、上空 90km 付近のナトリウム原子が多く存在するナトリウム層に向けてナトリウム原子を励起発光させるような波長を持つレーザーを地上から打ち上げることで生成されるガイド星を使って波面センサーで波面を測定し、得られた波面情報を用いて可変形鏡 (DM) と呼ばれる素子数に応じてその形状を変化することができる鏡を使って乱れた波面形状を相殺するように形を変えることで大気揺らぎを補正する。その一連の流れをリアルタイムに行うことで観測装置には常に大気ゆらぎによって乱れた波面が補正された状態の対象天体からの光を入れることができる。図 1.4 に補償光学の仕組みを表した構成図を示す。

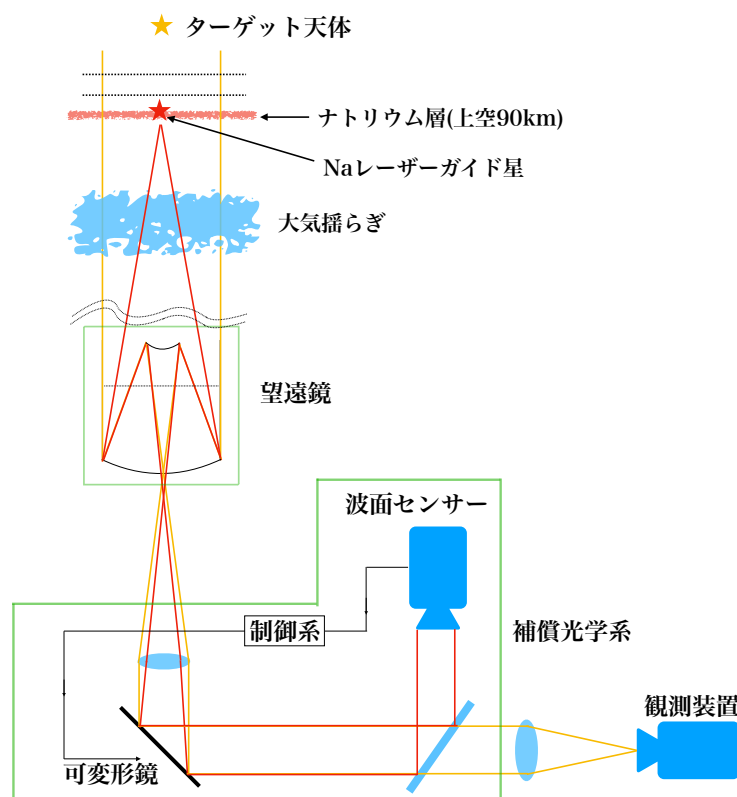


図 1.4 レーザーガイド星を用いた closed loop 制御での補償光学系の構成図。大気揺らぎによって乱れた波面は波面センサーで測定され、波面センサーからの情報を制御系を通してそれを打ち消すように可変形鏡を操作することでターゲット天体からの光を補正している。これらのプロセスはリアルタイムで行われており、ターゲット天体の観測中に大気揺らぎの変動に応じて常に最適に補正されるようになっている。

補償光学のリアルタイム制御には closed loop と open loop の 2 種類がある。それぞれの制御システムについて説明する

closed loop 制御

図 1.4 は closed loop 制御の図になっている。closed loop では波面センサーの前に可変形鏡が置いているため、波面センサーでは可変形鏡との残差を測定することになっている。そのため波面測定を行う時の測定量としての位相差は小さく、また残差を 0 にするように可変形鏡を変形させれば良いので、必要となる波面測定の絶対精度は open loop 制御と比べて低く、高速にループすることで十分な補償が行える。

open loop 制御

open loop 制御では可変形鏡を通るターゲット天体の光と波面センサーで測定されるガイド星の光が別の光路となり波面センサーで測定される波面は補正されていない状態の波面である。そのため closed loop に比べてより絶対精度の高い波面測定を行う必要がある。

1.3 SHWFS

この節では代表的な波面センサーであるシャックハルトマン型波面センサーを説明し、波面測定から波面再構成までの計算過程について説明する。

1.3.1 波面測定の原理

シャックハルトマン型波面センサー (SHWFS) はマイクロレンズアレイと呼ばれる小型レンズがアレイ状に並んだ光学素子とカメラで構成された、補償光学において大気揺らぎを測定するセンサーである。大気の影響がない理想的な場合、天体からの光は平面波とみなすことができるが、大気の影響によって位相が乱されてしまうため波面が平面ではなくなってしまう。図 1.5 は SHWFS を用いて乱れた波面の測定原理を示した図である。大気ゆらぎの影響がない理想的な場合ではマイクロレンズアレイに入射する光は平面波なので、マイクロレンズアレイによって分割された各領域の中心にスポットが結像される (図 1.5 中の上図)。一方大気ゆらぎによって波面が乱れた状態で SHWFS に入射すると、分割された各領域において中心からずれた位置にスポットが結像される (図 1.5 中の下図)。SHWFS ではこの原理を利用して各領域で波面の傾きを測定することで乱された波面を推定を行う。

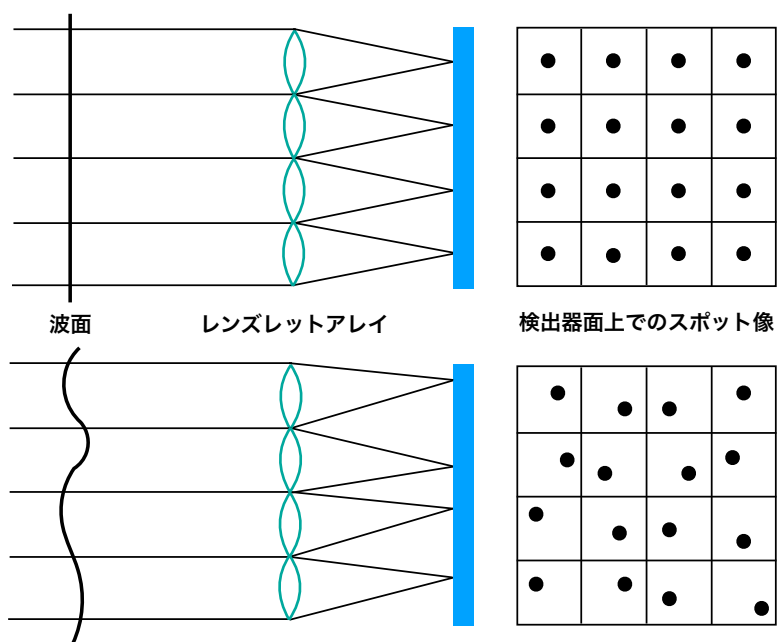


図 1.5 SHWFS の原理。大気の影響がない理想的な場合での検出器面状のスポットの結像の様子 (上) と大気によって波面が乱れた場合での検出器面上でのスポットの結像の様子 (下) である。

各スポットの位置はピクセル座標 $(x_{i,j}, y_{i,j})$ におけるスポットの輝度値 $I_{i,j}$ から下式に基づいて重心座標を計算し定義する。

$$x = \frac{\sum_{i,j} x_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} \quad y = \frac{\sum_{i,j} y_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{i,j} I_{i,j}} \quad (1.20)$$

乱れた波面の測定には理想的な場合のスポット位置と大気によって乱れた場合のスポットの位置の差分から計算される。スポットの移動量と波面形状の関係については次節で説明する。

1.3.2 波面再構成

シャックハルトマン波面センサーによって測定されたスポットの位置から波面を推定するには Fried geometry がよく対応している。

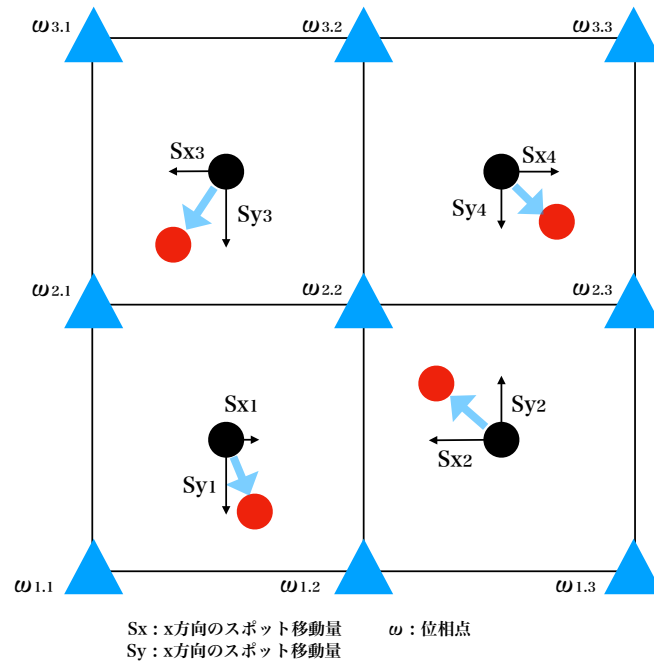


図 1.6 Fried geometry によるスポットの移動と各位相点との関係

Fried geometry では図 1.6 に示したようにサブ開口の各境界を位相点と定義することで、スポットの x, y 方向の移動と各位相点における位相を以下のような式で関係付けることができる。

$$S_{x1} = \frac{1}{2}C(\omega_{1.2} - \omega_{1.1} + \omega_{2.2} - \omega_{2.1}) \quad (1.21)$$

$$S_{y1} = \frac{1}{2}C(\omega_{2.1} - \omega_{1.1} + \omega_{2.2} - \omega_{1.2}) \quad (1.22)$$

$$S_{x2} = \frac{1}{2}C(\omega_{1.3} - \omega_{1.2} + \omega_{2.3} - \omega_{2.2}) \quad (1.23)$$

$$S_{y2} = \frac{1}{2}C(\omega_{2.2} - \omega_{1.2} + \omega_{2.3} - \omega_{1.3}) \quad (1.24)$$

スポットが $N \times N$ 個の正方形を形成している場合、 $(N+1) \times (N+1)$ 個の位相点が決まる。上式のように x, y 方向のスポット移動と位相点の関係ができるのでこの関係を N 個のスポットに対して拡張すると $2N \times N$ 個の要素を持つベクトルと $(N+1) \times (N+1)$ 個の要素を持つベクトルを結ぶ $2N^2 \times (N+1)^2$ の行列を定義できる。ただし、係数 C はスポット移動量の単位は検出面の pixel であり波面を位相差に変換するためのサブ開口とマイクロレンズの焦点距離で決まる値である。図 1 のような 4 つの

スポットと9つの位相点の場合、それらを結びつける行列 G との関係は

$$\begin{pmatrix} Sx_1 \\ Sy_1 \\ Sx_2 \\ Sy_2 \\ Sx_3 \\ Sy_3 \\ Sx_4 \\ Sy_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{2}C \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{1.1} \\ \omega_{1.2} \\ \omega_{1.3} \\ \omega_{2.1} \\ \omega_{2.2} \\ \omega_{2.3} \\ \omega_{3.1} \\ \omega_{3.2} \\ \omega_{3.3} \end{pmatrix} \quad (1.25)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{G}\boldsymbol{\omega} \quad (1.26)$$

で表される。測定量であるスポットの移動量で構成されたベクトル \mathbf{S} から各位相点での位相 $\boldsymbol{\omega}$ を求めるには、行列 \mathbf{G} の逆行列を求めればよいが、この場合 $N \times N$ 個のサブ開口を仮定するとベクトル \mathbf{S} の要素数は $2 \times N \times N$ 個でありベクトル $\boldsymbol{\omega}$ の要素数は $(N+1) \times (N+1)$ 個なので非正方行列となる。そのため、行列 \mathbf{G} から直接逆行列を計算することができない。そこでここでは、最小二乗法を用いて擬似逆行列を求めることで測定量 (ベクトル \mathbf{S}) から $\boldsymbol{\omega}$ を求める。最小二乗法では一般に測定量 $(x_1, y_1, \dots, (x_N, y_N))$ とモデルとなる関数 $(f(x))$ の残差の二乗

$$E = \sum_{n=1}^N (y_n - (f(x_n)))^2 \quad (1.27)$$

で表される式で E が最小となるような関数を求める手法をいう。この手法を行列計算に適用する。

今測定量に対応するのは行列 \mathbf{S} でありモデルなる関数は $\mathbf{G}\boldsymbol{\omega}$ に対応するので、残差の二乗

$$\begin{aligned} E &= (\mathbf{S} - \mathbf{G}\boldsymbol{\omega}) * (\mathbf{S} - \mathbf{G}\boldsymbol{\omega}) \\ &= (\mathbf{S}^T - \mathbf{G}^T \boldsymbol{\omega}^T) * (\mathbf{S} - \mathbf{G}\boldsymbol{\omega}) \\ &= \mathbf{S}^T \mathbf{S} - 2\mathbf{S}^T \mathbf{G}\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{G}^T \mathbf{G}\boldsymbol{\omega} \end{aligned} \quad (1.28)$$

において E が最小となるよう $\boldsymbol{\omega}$ を求めればよい。

E が最小となる条件は

$$\frac{\partial E}{\partial \boldsymbol{\omega}} = -2\mathbf{S}^T \mathbf{G} + 2\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{G}^T \mathbf{G} = 0 \quad (1.29)$$

となるので

$$\begin{aligned} \mathbf{S}^T \mathbf{G} &= \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{G}^T \mathbf{G} \\ \boldsymbol{\omega}^T &= \mathbf{S}^T \mathbf{G} (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \\ \boldsymbol{\omega} &= (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{S} \end{aligned} \quad (1.30)$$

となり最小二乗法によって擬似逆行列 $(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T$ が計算でき、測定量であるベクトル \mathbf{S} から位相 ω を求めることができる。

第 2 章

すばる望遠鏡 LTAO システムの概要

レーザートモグラフィ補償光学 (LTAO) システムはすばる望遠鏡赤外ナスミス焦点に実装予定の AO システムである。赤外ナスミス面には既に 188 素子の可変形鏡を持つ AO188 と呼ばれる補償光学系が搭載されており、LTAO はこの AO188 のアップデート版として補償精度の向上を目指した新システムになっている。この章では既存の AO 装置である AO188 の概要と、補償精度向上のポイントとなるコーン効果を説明し、我々が開発を目指している LTAO システムの概要を紹介する。

2.1 AO188

2.1.1 装置概要

AO188 はすばる望遠鏡に既に搭載されており 2006 年より観測が開始されているレーザーガイド生成システムを用いた 188 素子補償光学である。制御素子数が 188 素子からなり、レーザーガイド星生成システムによって R バンドで 12 等級相当のガイド星を一つ生成することが可能である。図 2.1 に装置の全体図を示す。望遠鏡から入射した光は回転補正系 (IMR) で視野回転が補正された後、可変形鏡を通り、ビームスプリッターにて Tip-Tilt、focus ガイド星 (NGS) は低次元波面センサー (LOWFS) に、レーザーガイド星は高次元波面センサー (HOWFS) にそれぞれ送られ波面情報を取得し、DM にそれぞれの成分を独立にフィードバックすることで波面補正を行なっている。AO188 は closed loop で閉じられているため DM フィードバックが理想的な場合と仮定すると、それぞれの波面センサーは前ステップの測定結果との残差をモニターしている。

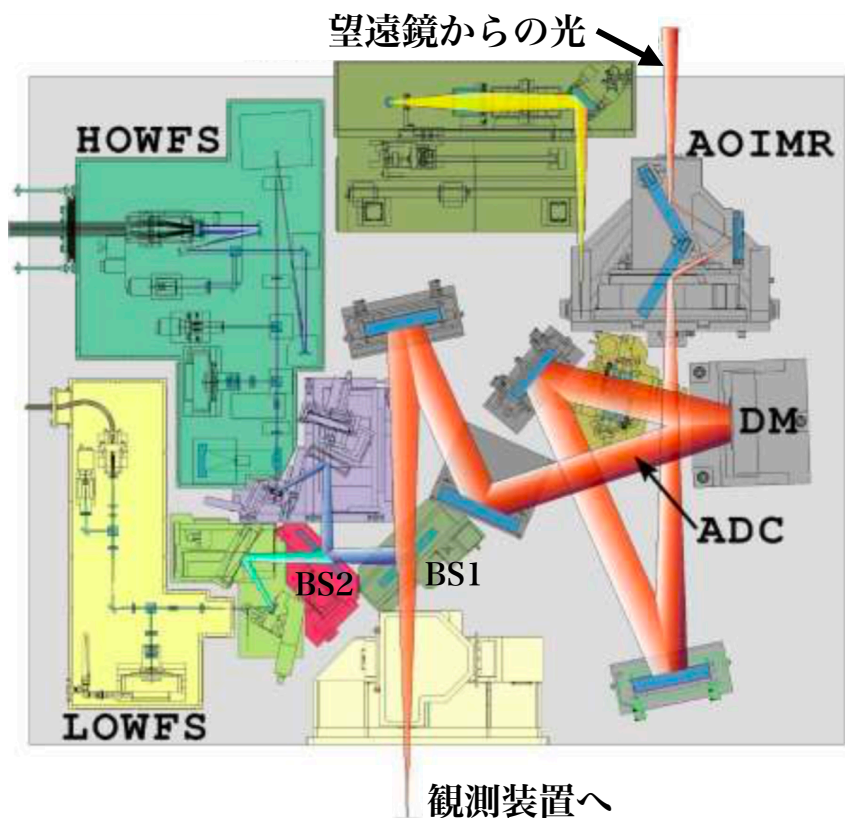


図 2.1 AO188 の装置全体図。図中 AOIMR は視野回転を補正するための回転機構、DM は可変形鏡、ADC は色分散を補正する大気分散補正素子、BS1、BS2 はビームスプリッター、LOWFS は低次波面センサー、HOWFS は高次波面センサーである。望遠鏡からの光はレーザーガイド星の光と Tip-Tilt、focus ガイド星の光、ターゲット天体の光が含まれており、回転補正系で視野回転が補正されると、DM にて大気揺らぎが補正される。その後 BS1 にてターゲット天体とガイド星を分離し BS2 にてレーザーガイド星と Tip-tilt、focus ガイド星を分けてそれぞれ HOWFS、LOWFS に送られ DM との残差が計測される。AO188 の制御ではこのルーチンを 1kHz 程度の時間周波数で回している。

2.1.2 Angular Anisoplanatism とコーン効果

AO188 は一つの自然ガイド星のみを用いた自然ガイド星モードとレーザーガイド星と tip-tilt ガイド星を用いたレーザーガイド星モードの二つのモードで波面補正を行うことができる。しかしガイド星一つのみで波面補正を行う場合、ターゲット天体がガイド星から離れると補償精度が落ちるといった弱点がある。図 2.2 は一つのガイド星と用いた場合に補償精度が落ちる原因となる、Angular Anisoplanatism とコーン効果について示した図である。Angular Anisoplanatism はターゲット天体が通ってくる

大気揺らぎとガイド星が通ってくる大気揺らぎの領域が距離を大きくなるほど重なり合う共通の領域が減少するために補償精度が落ちる、ガイド星を用いた補償光学において発生する波面測定エラーの要因の一つである。

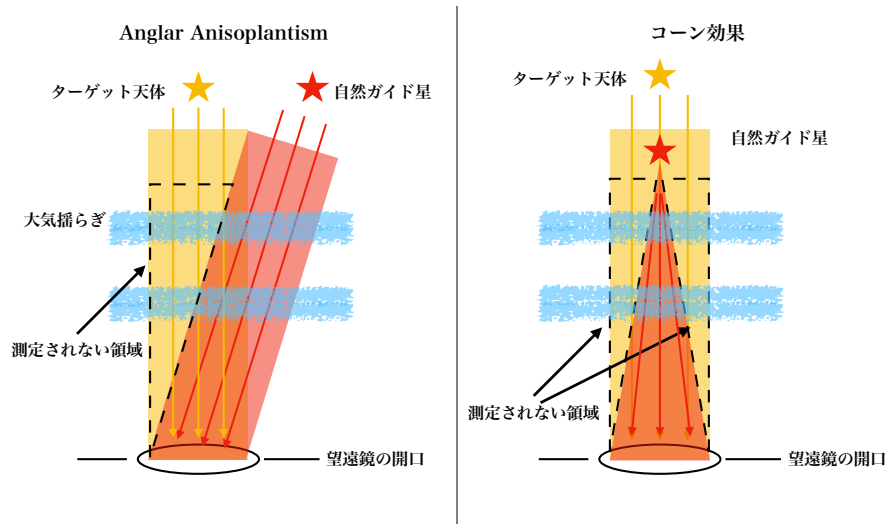


図 2.2 Angular Anisoplanatism とコーン効果の模式図。ターゲット天体からの光の光路を黄色、ガイド星からの光の光路を赤色で示している。それぞれの光が大気揺らぎを通過した後、望遠鏡まで届くが、光路がガイド星の位置が横方向や縦方向にずれていることからターゲット天体を通る大気揺らぎの全てをカバーすることができず、測定できない領域ができている。

さらにレーザーガイド星補償光学における波面測定エラーの要因がコーン効果である。レーザーガイド星の光は上空 90km 付近にあるナトリウム層を励起発光させているため有限距離からの光である。この時ターゲット天体とレーザーガイド星が同じ方向にあっても無限遠からの光と上空 90km からの光では通ってくる大気揺らぎの領域が異なっているため、波面測定エラーとなる。一つのレーザーガイド星で補正を行う場合、コーン効果により可視光領域になると補償がほとんど効かなくなってしまう。図 2.3 は AO188 で自然ガイド星モード球状星団を観測した時に自然ガイド星からの距離とストレル比との関係を示している。Angular Anisoplanatism によって自然ガイド星からの距離が大きいほどストレル比が悪くなっている。図 2.4 は AO188 のレーザーガイド星モードで到達できる星像のストレル比と観測波長との関係を示している。観測波長が短いほどコーン効果により補償精度が悪くなっている。

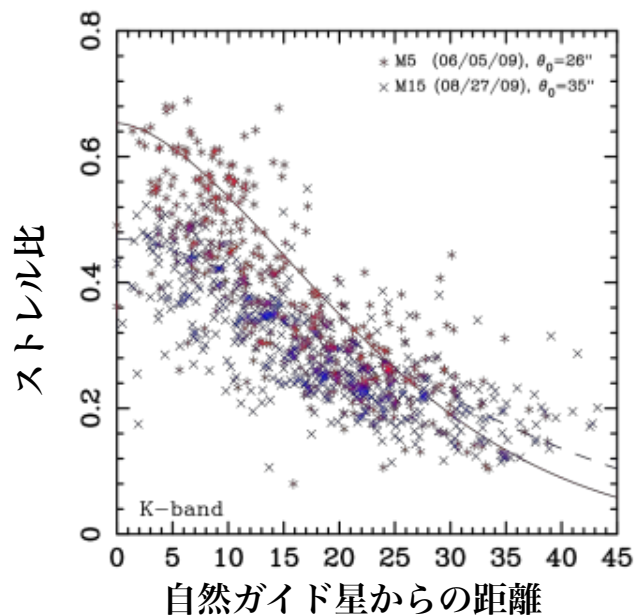


図 2.3 AO188 の自然ガイド星モードで球状星団 M5 と M15 を観測した時の自然ガイド星からの距離とストレル比の関係 ([9])。Anglar Anisoplanatism の効果によって自然ガイド星から距離が離れていくとストレル比が悪化していることがわかる。

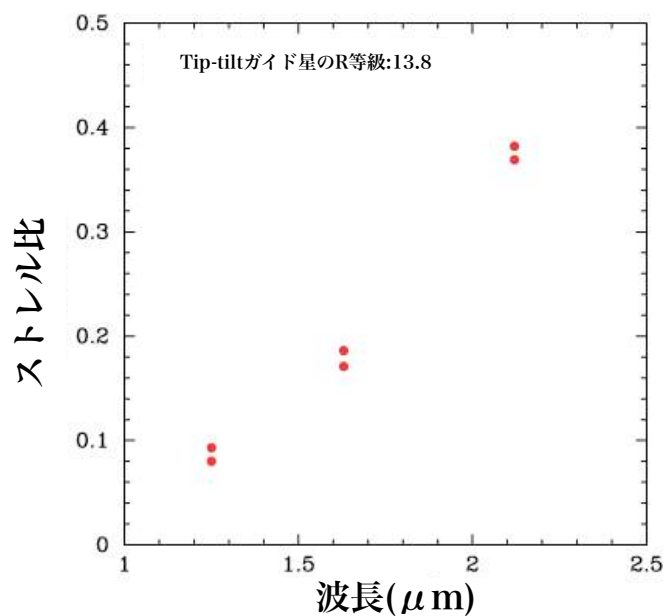


図 2.4 AO188 のレーザーガイド星モードで Tip-tilt ガイド星の R 等級=13.8 の時に到達できる星像のストレル比と波長の関係 ([9])。2 μm 付近のストレル比に比べて 1 μm 付近のストレル比は約 1/3 に落ちていることがわかる。

2.2 レーザートモグラフィ補償光学

AO188 では観測天体の補正に対して一つのレーザーガイド星を用いるがコーン効果によってその補償精度に限界がある。レーザートモグラフィ補償光学は補償精度の向上のために複数のレーザーガイド星を用いてそれぞれのガイド星に対応した波面センサーで測定された複数方向の波面に対してトモグラフィ計算を行うことで観測天体方向の大気揺らぎの3次元構造を推定することでより精度の良い補正をかける。すばる望遠鏡のレーザートモグラフィ補償光学システムでは合計4つのレーザーガイド星を用いて推定を行う。レーザートモグラフィ補償光学では波面情報の他に大気揺らぎの高さ方向のプロファイルの事前情報を測定量に加えることでより精度高く大気揺らぎの3次元構造の推定を行う。

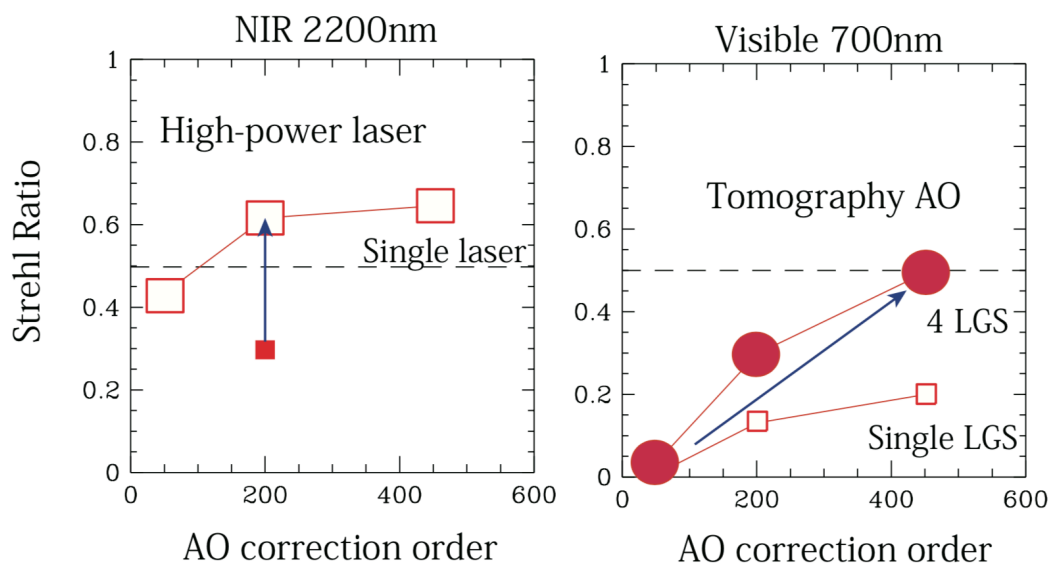


図 2.5 近赤外線 (2200nm) と可視光 (700nm) それぞれにおいて、波面センサーの素子数とストレル比の関係を表した図 (Akiyama [3])。

図 2.5 はすばる望遠鏡における従来の補償光学システムとレーザートモグラフィ補償光学の精度について素子数とストレル比の関係を表した図である。左図中の赤で塗りつぶされた四角形は現在の補償光学システムにおけるストレル比であり、白抜き四角形はレーザー光源を 20W の強さにアップグレードした場合に得られるストレル比を表している。ストレル比が 0.5 を超えると回折限界に近い像が得られるとされており、近赤外線では従来通り一つのガイド星のみでレーザー光源の強さをアップグ

リードすることで補償精度が上がりストレル比 0.5 を達成することができる。しかし可視光ではコーン効果から同じストレル比を達成するのに必要となる波面誤差が小さくなり一つのレーザーガイド星だけではストレル比 0.5 を達成できない (右図中白抜き)。レーザートモグラフィー補償光学を用いてガイド星を 4 つに増やし、さらに DM の素子数を増やすことでストレル比 0.5 を得ることが期待されている (右図中赤丸)。

2.2.1 ハードウェア設計

すばる望遠鏡におけるレーザートモグラフィー補償光学システムの特徴として既存の AO188 との併用することが挙げられる。図 2.6 はレーザートモグラフィー補償光学波面センサーの構成を示しており、AO188 と併用して IRCS や Kyoto3DII や SCExAO といった観測装置との運用が検討されている。AO188 と併用することで NGS-低次元波面センサーを AO188 の光学そのまま用いて使うことができるため LTAO の光学系を単純化できる他、観測装置がすでに AO188 に最適化されていること、AO188 で既に使われている光学素子を引き継ぐことができる点でコストを抑えることができる。

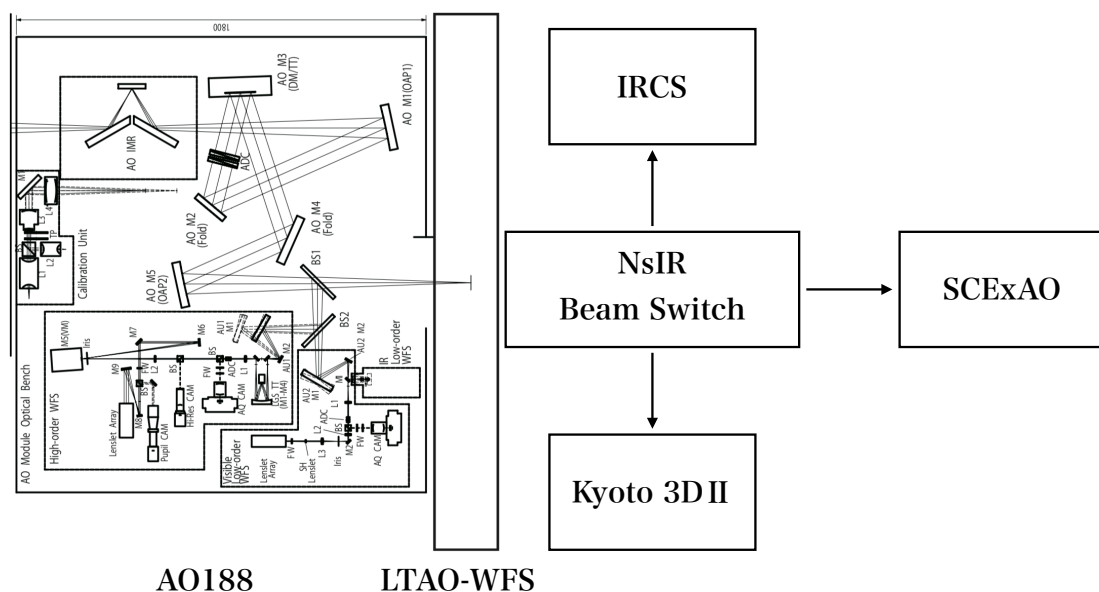


図 2.6 AO188 と LTAO 波面センサーユニットの構成図 (Akiyama [3])。波面センサーユニットは既存の AO188 と IRCS や kyoto3D II といった観測装置の間に配置され、波面センサーを通った光はビームスイッチャーによって各観測装置に入る仕組みになっている。

レーザーガイド星の配置

LTAO ではレーザーガイド星を4つ用いてトモグラフィー推定を行うが4つのガイド星の対象天体からの距離によってそれぞれのガイド星が観測天体の光路をカバーする領域が変化する。そのためレーザーガイド星の配置間隔が波面測定精度に影響することが考えられる。

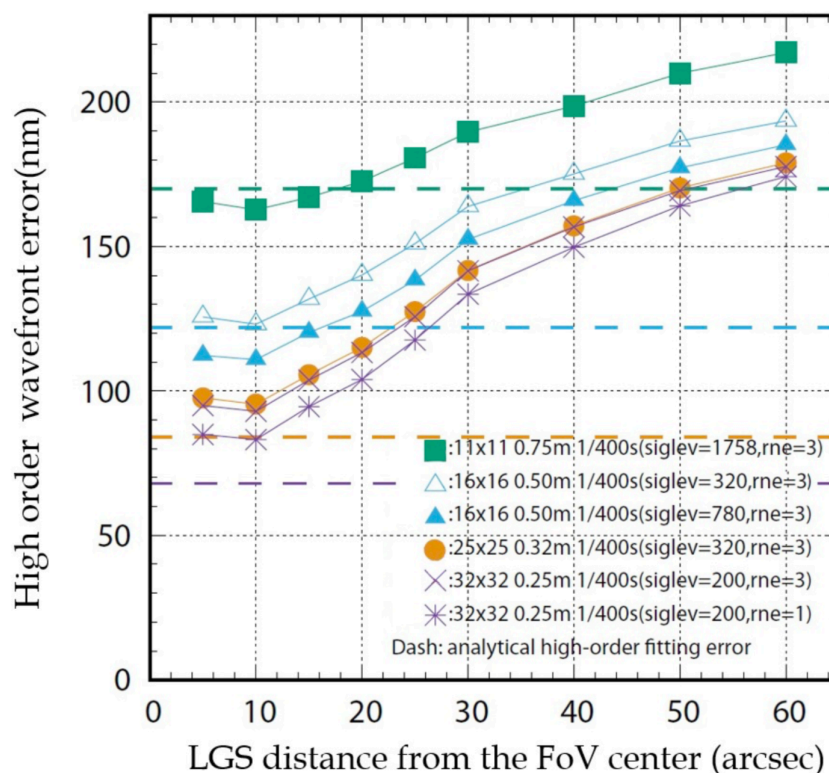


図 2.7 レーザーガイド星を天頂方向に配置した場合の高次元波面測定のみを考慮した時の波面測定誤差である (Akiyama [3])。凡例はそれぞれ DM の素子数、サブ開口の主鏡における大きさ、FPS、ガイド星の明るさ、読み出しノイズを表す。

図 2.7 は MAOS と呼ばれる補償光学のシミュレーションソフトを用いて tip-tilt 成分を除いた高次元の波面のみを考慮した波面測定誤差である。どのケースも共通してガイド星の配置間隔が大きくなると波面測定誤差が大きくなっている一方、配置間隔を対象天体から 10" とする距離付近で誤差が最小になることがわかる。また DM の素子数を増やしても誤差は減るが同じ素子数でも読み出しノイズが大きく、またはガイド星の明るさが暗くなると測定誤差が大きくなっていることがわかる。図 2.8 はガイド星を対象天体から r " だけ離れた時の観測天体のビームの大きさと 4 つのガイド星のビームの占める領域を表している。 $r = 23$ " の時は観測天体のビームよりも外側よりの領域にガイド星のビームが出ているのに対し、 $r = 7.1$ " の時は観測天体のビー

ム内にガイド星が通らない領域が生まれている。これらが波面測定誤差を生んでおり $r = 10.6''$ の時のような観測天体のビームとガイド星が埋めるビームの領域の大きさがちょうど等しくなるような場合に誤差が小さいことがわかる。よって LTAO のガイド星配置間隔は $10.6''$ を基準とする。

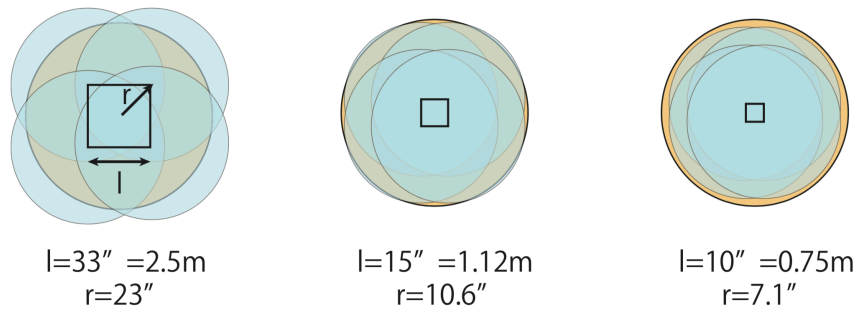


図 2.8 ガイド星の配置間隔を対象天体から $r=23''$ 、 $r=10.6''$ 、 $r=7.1''$ の場合にガイド星と観測天体が 16km 上空で通るビームの様子である (Akiyama [3])。オレンジが観測天体のビーム、水色がガイド星のビームを表す。l は隣り合うガイド星同士の距離を示す。対象天体から $23''$ だけ離れた位置にガイド星を配置するとガイド星が通る光のビームの領域が観測天体のビームの外にまで広がっている様子が見られる。また対象天体から $7.1''$ だけ離れた位置にガイド星を配置するとガイド星のビームが観測天体のビームの領域全てをカバーしていないことがわかる。

WFS 分割数

図 2.7 より、波面センサーの分割数を増やせば増やすほど波面測定誤差が小さくなっている。波面センサーの分割数は増やすほど小さい空間スケールまで波面測定を行えるが一方でそれぞれのサブ開口に入るフォトンの総量が少なくなるので SN が悪くなるため装置によって最適な分割を決めなければならない。シミュレーションの結果では波長 700nm でストレル比 0.5 を達成するには波面測定誤差が RMS で 92nm 未満が要求されている。図 2.7 では 25×25 の時と 32×32 の読み出しノイズが $3e^{-1}$ の時の波面測定誤差があまり差がなくガイド星 $10''$ 付近で測定誤差 RMS で 92nm 近くを満たしている。そのため SN 比の高い 25×25 の分割数が LTAO において最適であると考えられる。LTAO の可変形鏡は AO188 のものを用いるが AO188 の可変形鏡の素子数は 188 個である。4 つのレーザーガイド星を用いるだけで 2 倍近くの精度向上が期待されるが 0.5 のストレル比に近づけるためには可変形鏡素子数の増加も必要不可欠である。そのため LTAO システム、さらに将来のすばる望遠鏡補償光学に向けて可変形鏡素子数を 500 素子にまで増やすことが検討されている。

2.2.2 ソフトウェア設計

この節では LTAO のソフトウェア設計について説明する。

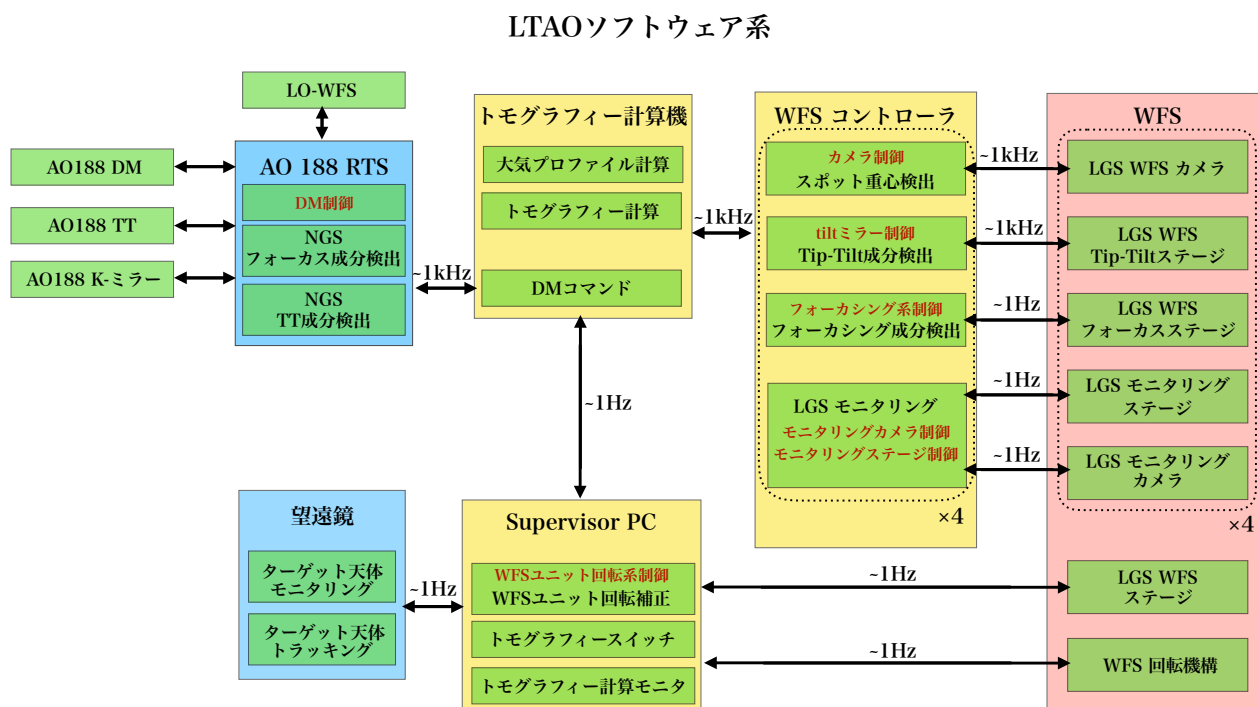


図 2.9 LTAO ソフトウェア系全体の構成図 (Akiyama[3])。4 つの波面センサーはそれぞれ約 1kHz の速さでフレームを取得しそれぞれの WFS コントローラでスポット重心と低次元波面成分とフォーカス成分を検出する。検出された低次元波面成分とフォーカス成分は WFS 内の Tip-tilt ステージとフォーカスステージにフィードバックすることで補正をリアルタイムに行う。4 つの WFS コントローラからスポットの情報はトモグラフィー計算機で 4 つの波面情報と大気プロファイルの事前情報を使ってトモグラフィー波面推定を行う。推定された波面は DM コマンドとして AO188 に渡され、自然ガイド星で測定された大気揺らぎの低次元波面成分の信号と合わせて最終的に可変形鏡を制御している。また望遠鏡のエレベーションに伴うナスミスの回転は Supervisor PC にてモニターし、WFS 全体の回転の制御を行う。

LTAO では closed loop でリアルタイム補償を行う。そのため波面センサーで取得する波面は前のステップで測定された波面との残差を見ている。図 2.9 に LTAO 全体のソフトウェア系を示す。LTAO では合計 4 つの WFS があるので、合計 4 つの WFS コントローラが必要になる。リアルタイム制御のためすべての構成系は PC プログラムから制御を行う。WFS の時間周波数は図に基づいて 1kHz に近いスピードで波面情報を取得してアップデートしていくが図 2.10 のシミュレーション結果から 400Hz

のサンプリングでも十分な補償ができると期待されるので 400Hz での制御も 3 章や 4 章の実験とシミュレーションで考慮する。以下、それぞれの構成系について説明する。

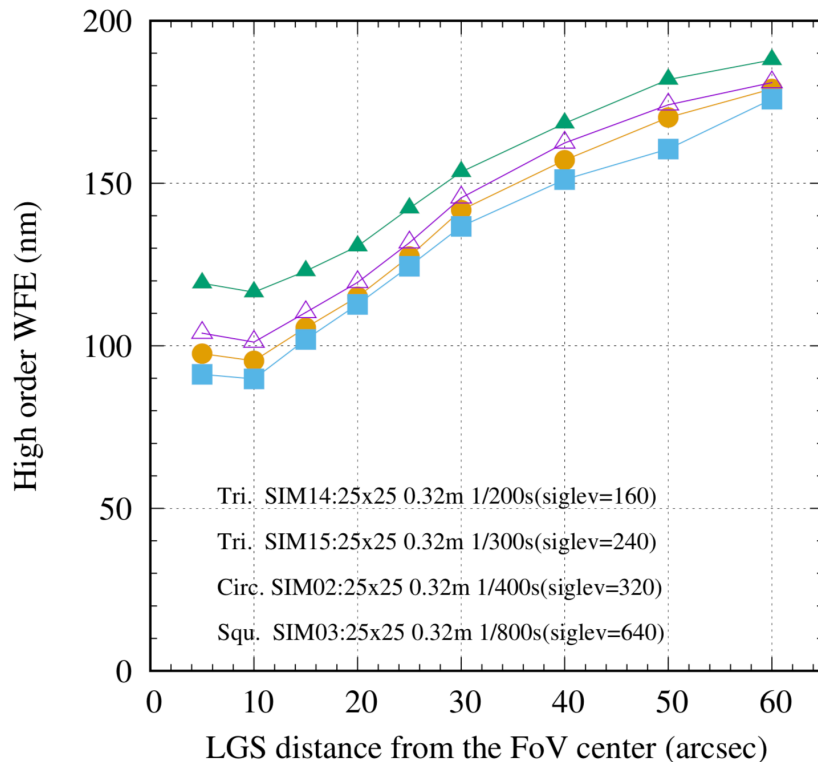


図 2.10 25 × 25 の分割数でガイド星配置間隔を変化させた時の波面測定誤差 (Akiyama [3])。DM の素子数は 500 素子を想定している。0.32m はサブ開口の主鏡上での大きさ、各凡例は波面測定の時間周波数とガイド星の明るさを表している。800Hz サンプリング時が測定誤差が最小となっているがガイド星の明るさを考慮すると 400Hz と 800Hz サンプリングではあまり測定誤差に差がないことがわかる。

WFS コントローラ

高次波面測定に必要な WFS カメラは浜松フォトニクス社の CMOS カメラを用いる。このカメラは 200 × 200 ピクセルの画素数で 800Hz の FPS を達成している (詳しくは 3 章) ため LTAO の WFS カメラとして用いるのに適正である。高次波面測定を行うためには残差の原因となる低次成分を取り除く必要がある。低次成分は LGS それ自身のジッタや望遠鏡内の機械的な振動による Tip-Tilt 成分と、ナトリウム層の高さ方向の時間的な変動、または望遠鏡のエレベーションによって変化するフォーカシング成分がありこれらを 1Hz 程度のスピードで補正を行うことで高次波面成分を取り出している。前述したように低次成分を取り除いた波面は前ステップの波面情報との残差になっている。

WFS ユニットの回転補正系

4つのWFSは一つの回転軸上に配置されている。これはLTAO系がすばる望遠鏡の赤外ナスミス焦点に設置されるために、望遠鏡の方位角に応じてターゲット天体に対する4つのLGSの配置関係が変化するため、機械的にWFSの位置も変える必要があるためである。望遠鏡の移動は高速でないので回転系は1Hz程度のスピードでアップデートしていく。

トモグラフィー計算機とAO188制御系

4つのWFSによって得られた波面の情報はトモグラフィー計算機によってトモグラフィー推定される。トモグラフィー計算では大気揺らぎを高さ方向に何層かに分けてそれぞれの高さの層の大気揺らぎを推定することができるが、4つの波面情報のみでは十分な精度のトモグラフィー推定が行えないため、大気プロファイルをリアルタイムにモニタリングすることで大気揺らぎ情報を事前に取得し、それらを拘束条件としてトモグラフィー演算に加えることで高精度な推定を行う。しかしLGSのみで推定された波面情報は大気揺らぎのTip-tilt成分を検出できないため、AO188の低次波面センサーを用いてNGS-Tip-tilt成分を測定し、最終的な波面を再構成する。

2.3 可視光近赤外線天文学へのフィードバック

LTAOは赤外ナスミス台に設置されるためLTAOと組み合わせることで可視光から近赤外にわたって高空間分解観測が可能になる。LTAOと組み合わせで使用できる観測装置はKyoto 3D II(可視光面分光装置)とIRCS(近赤外線撮像分光装置)である。特にLTAOを用いた可視光での補償光学は世界的に見るとチリのアタカマにあるVLT(Very Large Telescope)にGALACSIと呼ばれる補償光学装置で既に実装されているが北半球における口径8m級の地上望遠鏡では、LTAO補償光学を用いた可視光での補償はまだ実装されていない([16][18][19])。そのため将来TMTなど30m級の望遠鏡建設が予定されている中で、すばる望遠鏡のLTAOシステムは可視光での補償の先駆けとして期待される。

すばる望遠鏡で補償光学を用いた高空間分解観測の成果の一つにAO188とIRCSの組み合わせによって遠方銀河の銀河形態を明らかにし、現在の宇宙の銀河の進化過程を明らかにした観測例が挙げられる([21])。 $z \sim 1$ から $z \sim 4$ は銀河の星形成率が最も活発な時期であるため([22])、銀河を構成する星はこの時期に多く形成され銀河形態の確立に重要な時期とされている。LTAOと近赤外線観測を組み合わせるとAO188の約2倍近いストレル比を達成できるので、 $z \sim 1$ から $z \sim 4$ にある遠方銀河の形態をより多く観測することができ、銀河形態の歴史に迫ることが期待される。またLTAOの実装によって近赤外線だけでなく可視光でも高空間分解能で観測が可

能になることで期待されるサイエンスケースの一つに銀河とブラックホールの共進化の解明があげられる。銀河とブラックホールの進化過程の記述には活動銀河核からの outflow によってガスが外側に向かって飛ばされ、星形成やブラックホールへの降着が抑制されることで銀河とブラックホールが共進化していくモデルが考えられている (AGN feedback[23])。しかし AGN feedback を説明する outflow の状態や空間分布は十分に空間分解できておらず、活動銀河核付近の高空間分解観測が求められている。高空間分解で可視面分光観測が可能になると $z \leq 1$ における近傍宇宙における AGN の物理状態がより詳細に観測でき、AGN Feedback による銀河とブラックホールの共進化を明らかにすることが期待される。

第 3 章

CMOS センサーの読み出しタイミングの評価

LTAO システムに用いられる CMOS カメラはローリングシャッター読み出しと呼ばれる特有の読み出し方式を採用している。そこでこの章では CMOS カメラをコンピュータ制御しカメラの読み出し時間の性能評価を行った他、LED を高速に点滅させて像を取得することでローリングシャッター読み出しタイミングを評価した結果を示す。また LTAO システムでは複数の波面センサーの波面データからトモグラフィー波面推定するため、それぞれのカメラからのデータの同時性が求められている。そこでこの章の最後に 2 台のカメラを同時制御を行いデータ同時性のテストを行った結果を示す。

3.1 CMOS

3.1.1 ローリングシャッター読み出し

CMOS カメラの構造を図に示す。CMOS カメラは 1 画素の中にフォトダイオードと増幅器があり電荷信号を画素内で電圧信号に変換してから各画素の信号を読み出す方式をとっている。そのため電荷をそのまま転送して読み出す CCD で見られるような、スミアやブルーミングといった現象は CMOS カメラでは見られないが 1 画素の中で信号増幅を行なっているため開口率が低く、天体のような弱い信号の取り出しには不向きとされてきた。しかし近年では開口率の弱点を補うことができる技術によって CCD にも劣らない高感度を実現している。特に本研究で読み出し評価を行った Orca flash 4.0 v2 では各ピクセルの前にマイクロレンズを配置することで効率よく集光することで、弱い光に対しても CCD に劣らない感度を保つことができる (Hamamatsu [1])。そのため CMOS は CCD に比べて安価に低ノイズで高速読み出しの行える撮像

デバイスとして近年の天文学装置でも使われ始めている。CMOS カメラは水平走査回路と垂直走査回路を用いて各画素の選択と信号の取り出しを行なっているが、全画素一度に水平走査と垂直走査を行うと各列方向の電圧信号が重複してしまう。そのためある一行をまず選択したのち水平走査で各列を選択することで信号を取り出している。図 3.1 に CMOS カメラの回路模式図を示す。

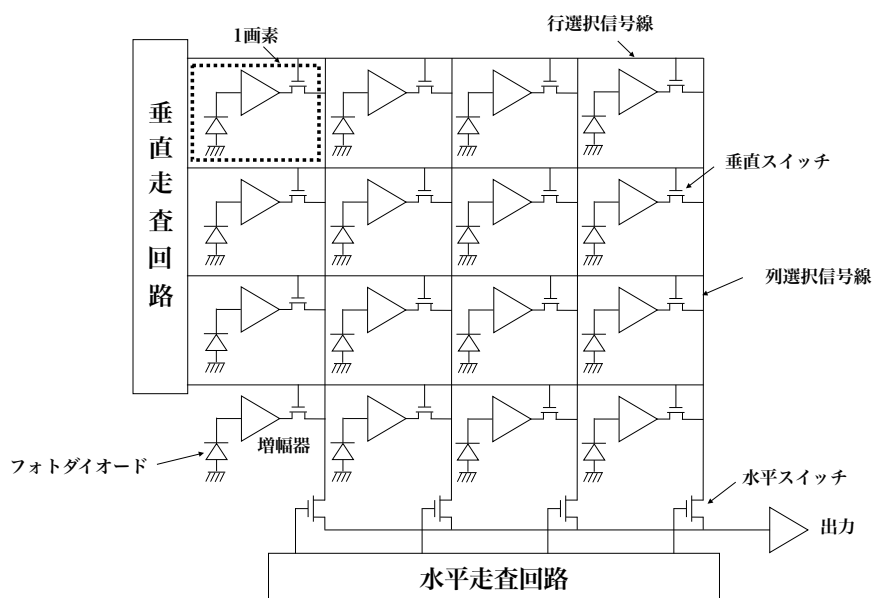


図 3.1 CMOS カメラ回路の模式図。フォトダイオードに入ってきた光は光電効果によって電荷信号として取り出されさらに増幅器にて電圧に変換して増幅される。垂直走査回路によって行が選択されると垂直スイッチの役割を持つトランジスタによって各行で信号が転送され、さらに水平走査回路によって列選択されると水平スイッチの役割を持つトランジスタによって各列の信号が順次読み出されていく。

読み出しの高速性を保つために各行の露光タイミングと読み出しをずらして露光が終わると各画素で増幅、各行ごとに信号の取り出しを順次行なっている。これらの操作をローリングシャッター読み出しと呼ばれている。ローリングシャッターの様子は特に早い速度で移動する被写体に見られ、各行の露光と読み出しタイミングがずれているため、その効果が像の歪みとして現れる。

LTAO で使用される CMOS カメラは浜松ホトニクス社製の CMOS カメラ (Orca flash 4.0 v2) を予定している。図 3.2 に LTAO システムで使用される CMOS カメラにおけるローリングシャッターのタイミングを示す。左図に示すグローバルシャッター読み出しの場合では全画素が同じタイミングで露光と読み出しを行なっているのに対して、右図に示すローリングシャッター読み出しの場合では一枚のフレームの中で露光と読み出しのタイミングが異なっている。Orca flash 4.0 v2 ではフレームの中央の行から露光を開始し、両端に向かって上側と下側それぞれ一行ずつ順次露光を行

い、読み出しも同様に中央の行から両端に向かって一行ずつ読み出しを行っている。そのため露光と読み出しを各行順次行なっている間に被写体が動いてしまうと像の歪みを生んでしまう。

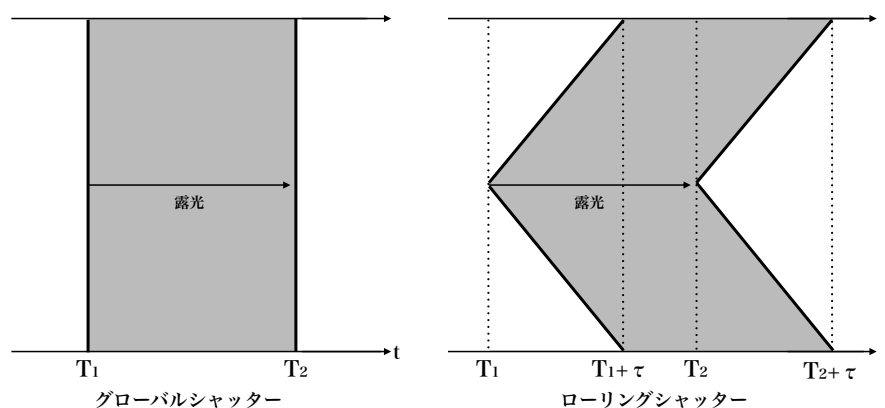


図 3.2 左図にグローバルシャッター、右図にローリングシャッターの時間と露光、読み出しタイミングの関係を示した図。縦軸は行の位置を示す。グローバルシャッターは全画素を同時のタイミングで露光と読み出しを行なっているため時間 T_1 での露光開始と T_2 での読み出し開始のタイミングは各行で同じである。一方ローリングシャッターでは行ごとに露光と読み出しのタイミングが異なっている。Orca flash4.0 v2 の場合、検出面の中心の行から両外に向かって行選択を行なっており中心と端の行では τ だけずれている。

3.1.2 Orca flash 4.0 v2 の撮像モード

CMOS カメラの評価に向けて、Orca flash4.0 v2 の撮像モードについて説明する。CMOS カメラの制御方式は内部同期モードと外部同期モードの大きく二つに分けられる。内部同期モードは外部機器を使用しない場合でカメラ内部で露光タイミングの制御を行う。外部同期モードでは外部機器からトリガ信号と同期を行い露光タイミングと読み出しの制御を行うことができる。この節では外部トリガモードでの制御方式についてまとめる。

エッジトリガモード

エッジトリガモードは外部からのトリガ信号に同期して露光の開始を行う。露光時間は外部で設定を行うが露光開始のタイミングはトリガ入力のタイミングによって制御することができる。

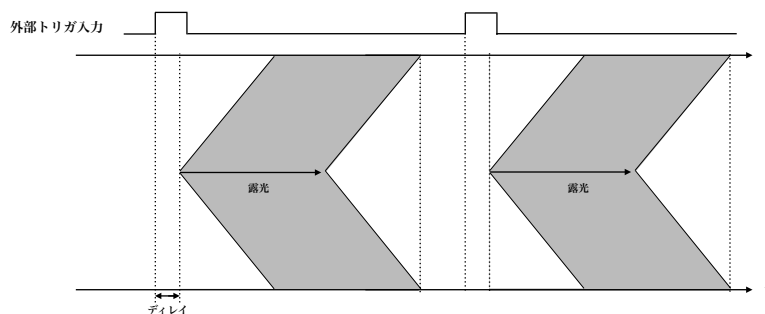


図 3.3 エッジトリガモードにおける外部トリガと撮像のダイアグラムを示した図。図中の遅延は外部トリガの立ち上がりを認識してから露光を開始するまでの遅延時間を示す。

読み出し同期モード

読み出し同期モードはトリガ信号に同期して露光の終了と読み出しの開始を行う。そのためトリガ信号の間隔で露光時間とタイミングを制御することができる。

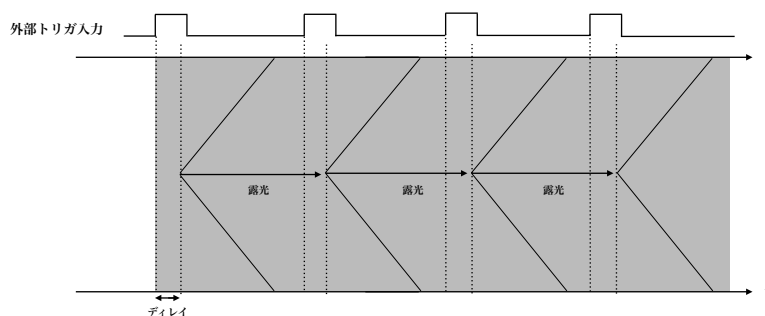


図 3.4 読み出し同期モードにおける外部トリガと撮像のダイアグラムを示した図。

スタートトリガモード

スタートトリガモードは1回の外部からのトリガ入力で連続で画像を取得するモードである。露光時間は外部の設定から行い最初の露光タイミングのみトリガ入力すると後は内部同期に切り替わり連続的に画像を取得していく。

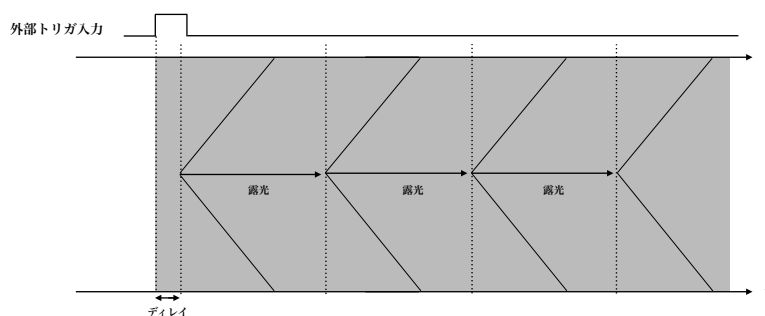


図 3.5 スタートトリガモードにおける外部トリガと撮像のダイアグラムを示した図。

3.2 CMOS センサーの評価

3.2.1 カメラの制御

波面測定から可変形鏡への信号出力までのプロセスは全て linux 環境での C 言語ソフトウェアによって制御される。LTAO システムでは波面測定から可変形鏡制御までのプロセスをリアルタイムで行うため、既存のソフトウェアではなくコンピュータプログラムでの制御が求められる。そこで Orca flash 4.0 v2 を linux の Fedora 21 のディストリビューションを用いて C 言語で制御を行い、c 言語上のコマンドとカメラ側の応答を評価した。まず CMOS カメラの基本的なスペックについて表にまとめる。

[1]

表 3.1 CMOS カメラ (Orca Flash 4.0 v2) の基本的な性能

最大画素数	2048 × 2048pixel
画素サイズ	6.5 μ m
有効素子サイズ	13.312mm × 13.312mm
読み出しノイズ	1.6e ⁻¹ RMS
読み出し速度 (最大画素数)	約 100Hz
ダイナミックレンジ	37000:1
露光時間	1ms ~ 10s
読み出し方式	ローリングシャッター (グローバルリセット)
外部トリガモード	エッジトリガ 読み出し同期トリガ スタートトリガ

CMOS カメラの制御は浜松ホトニクス社提供の C 言語ライブラリ、DCAM-API を

使用した。性能評価は以下の項目について行った。なお最終的に4台のカメラを同時に制御するため、それを想定して外部からのトリガー入力を用いて制御を行った。

- 各モードにおける Frame Per Second
- 画像サイズと Frame Per Second の関係
- 露光時間サンプリング

3.2.2 1秒間のフレーム数 (Frame Per Second)

計測手法

Frame Per Second(以後 FPS) は1秒の間に pc のメモリに何枚のフレームが保存されるかで定義できる。LTAO システムでは波面測定を行なってから可変形鏡への波面のフィードバックのサンプリング周波数はカメラの FPS で決まっている。FPS の計測は pc 上で露光開始コマンドの入力からフレームが取得されたことを示すコマンドが帰ってくるまでの時間を `get_time()` 関数を用いることで行った。`DCAM - API` の関数にある、`dcam_wait(DCAM_EVENT_FRAMEEND)` は1フレームが pc のメモリ上に保存された状態になるイベントが発生するまで待機する関数でありこの関数が呼ばれると `get_time()` と組み合わせることでその時の時間が取得される。連続で複数枚のフレームを取得するにはその枚数だけ `dcam_wait` 関数をループさせることで可能になる。そのため、今回の FPS 測定では100フレームを連続的に取得した時に得られた時間を平均することで各トリガモードについて FPS を求めた。露出時間は全てのモードについて 1ms(読み出し同期モードを除く) とし 256×256 pixel の画素数で測定を行った。

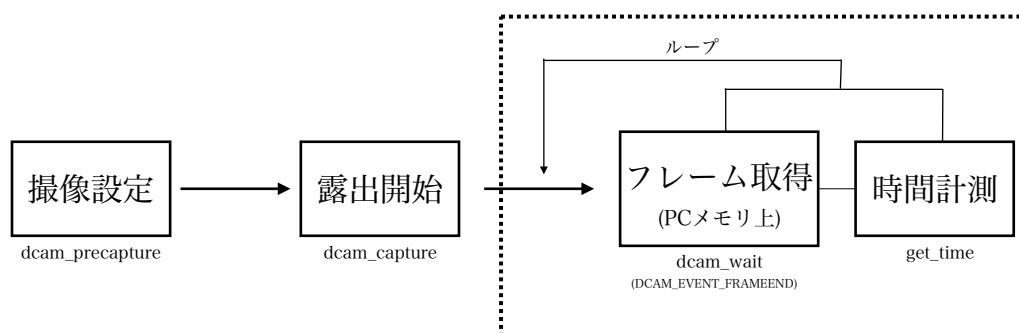


図 3.6 FPS 計測の流れを示した図。 `dcam_capture()` のコマンドでカメラが露光を開始するとローリングシャッター読み出しで指定した枚数のフレームが取得される。 `dcam_wait(DCAM_EVENT_FRAMEEND)` のコマンドを指定した枚数だけループさせることで取得したフレームが pc 上の RAM に保存されるごとにこの関数が呼び出される。 `get_time()` を `dcam_wait()` の後に呼び出すことで RAM に保存された時の時間を取得することができる。

結果

各トリガモードで計測した結果を示す。

トリガモード	計測時間 (FPS)
内部同期モード	1.246ms(802.5Hz)±0.0102
スタートトリガモード	1.246ms(802.5Hz)±0.0088
エッジトリガモード	2.345ms(426.5Hz)±0.0124
読み出し同期モード	1.421ms(704.2Hz)±0.0087

表 3.2 256 × 256 において各外部トリガモードで得られた FPS を示した表。内部同期モードは外部からのトリガ制御ではなくカメラ単体で露光と読み出しの制御を行うモードである。外部トリガ入力ファンクションジェネレータを用いて周期的なパルス波を入力した。

4つのトリガモードについて FPS の計測を行った結果、内部同期モードとスタートトリガモードが最も高くまた仕様値に近い FPS を計測し、次いで読み出し同期モードが高い結果となった。読み出し同期モードとエッジトリガモードに 800Hz 近い周波数のトリガ入力をするとカメラ側がトリガをスキップしてしまい、結果的に 400Hz 程度の FPS となった。そのため外部トリガ入力の処理よりも、内部同期モードやスタートトリガモードのようなカメラ単体でのカメラの露光や読み出しの制御を行う処理の方が速いことわかる。しかし LTAO のような複数台同時制御が求められている場合にはカメラ単体での露光と読み出し制御では得られるフレームのデータの同期性を保証できない。そのためカメラを複数台制御を行う場合にはデータの同期性を高めるため、外部トリガ入

力によってカメラの画像取得を制御を行うことが妥当である。ここでは読み出し同期モードが LTAO システムに最適なモードであると考えられる。

3.2.3 画像サイズと FPS との関係

各モードについて FPS を計測した結果、計測方法が有効であり、読み出し同期モードが最適なモードであることを確認した。LTAO システムでシャックハルトマンのスポット像は検出器の 200×200 pixel の領域を使用することがわかっている。そこでさらに画像サイズのサンプルを増やし 256×256 pixel から 200×200 pixel に至るまでの FPS 値の変化を読み出し同期モードで計測を行った。尚サンプリングについては Orca flash4.0 v2 のリファレンスに基づいて 8pixel きざみで変化させることにする。

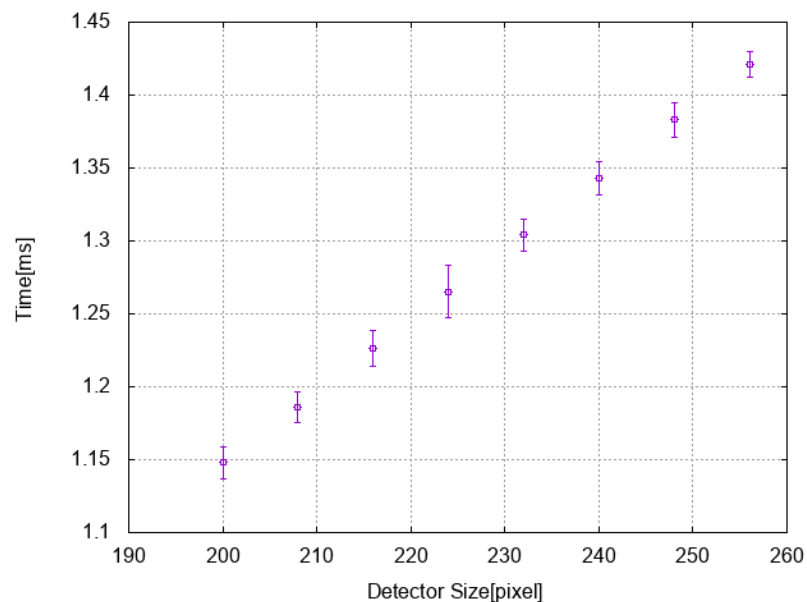


図 3.7 横軸に画像サイズ (pixel) 縦軸に 1 フレーム取得にかかる時間を表し 8pixel サンプルで測定を行った結果。

画像サイズ	1 フレームの取得時間 (FPS)
200 × 200	1.148ms(871Hz)±0.011
208 × 208	1.186ms(843Hz)±0.0107
216 × 216	1.226ms(815Hz)±0.0123
224 × 224	1.265ms(790Hz)±0.018
232 × 232	1.304ms(767Hz)±0.0109
240 × 240	1.343ms(745Hz)±0.0117
248 × 248	1.383ms(723Hz)±0.0119
256 × 256	1.421ms(704Hz)±0.0087

図 3.8 各画像サイズに対する 1 フレームを取得するのにかかる時間 (Hz)

読み出し同期モードでは 256 × 256pixel の時に LTAO システムの要求値である 800Hz を達成していないが 216 × 216pixel より画像サイズが小さくなると要求値を達成する結果となった。

3.2.4 露光時間サンプリング

C 言語環境でのカメラ制御の最後の評価項目として露光時間のサンプリングの閾値を評価する。pc プログラムで露光時間を設定した時のカメラ側のフレームの輝度値の分布によって評価した。光源は LED の連続光を用い、得られた画像を 1 次処理を行った後に評価した。

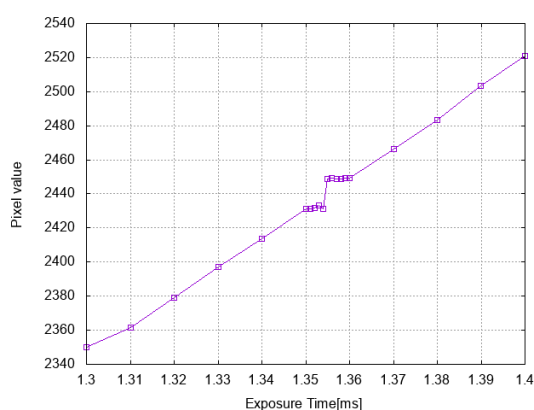


図 3.9 1.3ms から 1.4ms にかけて露出時間を変化させた時の輝度値の関係。

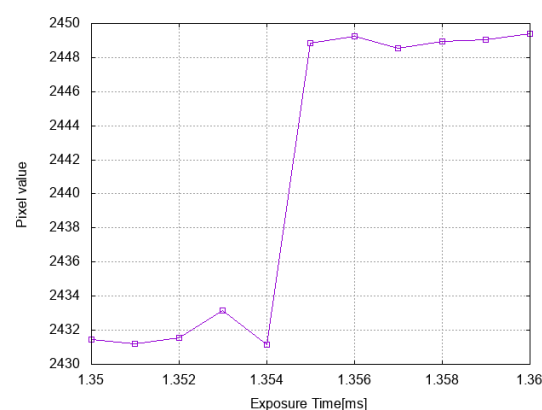


図 3.10 1.35ms から 1.36ms にかけて露出時間を変化させた時の輝度値の関係

図 3.8 と図 3.9 は露光時間 1.3ms から 1.4ms の間で 10 μ s だけ露光時間を変化させた場合の輝度値の変化と、特に 1.35ms から 1.36ms の間で 1 μ s だけ露光時間を変化させた時の輝度値の変化を示したグラフである。10 μ s サンプリングの露光時間の変化

では、カウント値が線形な応答を示すのに対し、 $1\mu s$ サンプリングの露光時間の変化では $1.355ms$ 付近でカウント値が線形な応答を示さず、ある露光時間で急激にカウント値が変化する挙動が見られた。

3.2.5 ローリングシャッターの評価

この節では LTAO システムで用いられる Orca flash4.0 v2 のローリングシャッターの効果を実際に測定するために行った実験についてその手法と結果をまとめる。

原理と手法

ローリングシャッターは行によって露光タイミングが異なるため、高周波で LED を点滅させると得られる画像には明るさに変動が起こる。図 3.11 は実験の原理を示した図であり、左図は LED 点滅のタイミングと各行の露光タイミングの関係を示し、右図は左図に対応した行方向における予想される輝度分布を示し横軸に pixel の列、縦軸に pixel 値で示す。図 3.11 において、②と④の行の領域では pixel 値が変動しており、この②の領域を占める行数 n と②の領域の経過時間を測定することで一行読み出し開始してから次の行の読み出し開始するまでの時間を求めることができる。

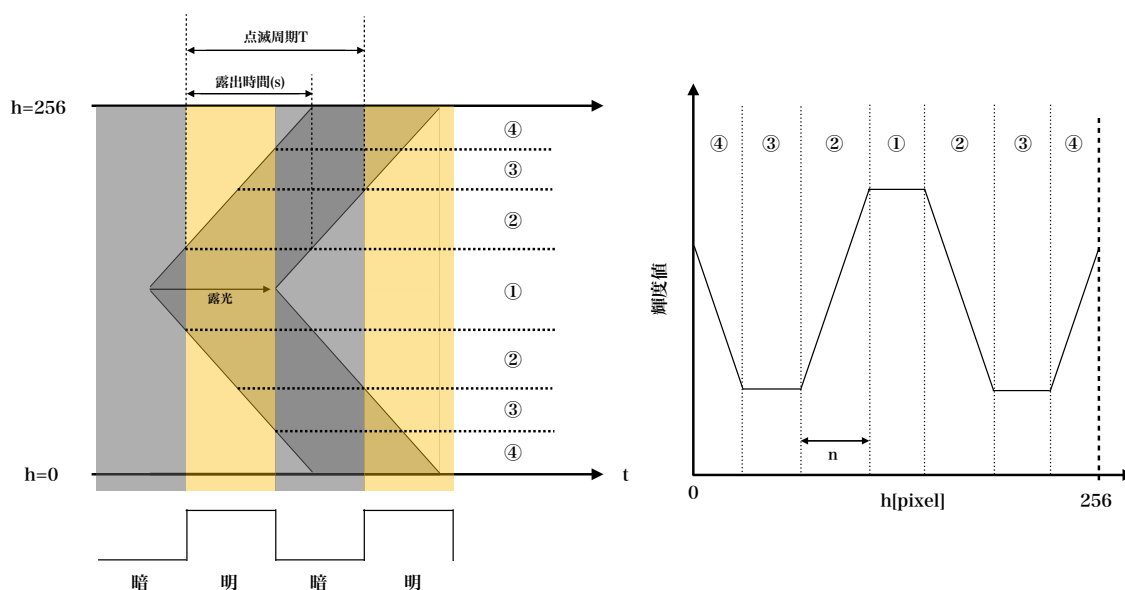


図 3.11 左図は LED の点滅と露光タイミングの関係を示した図であり、右図は各行における輝度値の変動のイメージを示した図である。各 ①,②,③,④ は左図と右図に対応している。① の領域では LED が光る時間領域が全て露光時間に含まれているため輝度値としては最も大きな値をとっている。② の領域では LED が光っている領域に変わって LED が消えている時間が増えていくため、それに応じて輝度値も中心から外側に向かって単調に下がる様子が見られる。③ の領域では LED が消えている時間領域が全て露光時間に含まれているため輝度値は最も低い値をとっている。④ の領域では LED が消えている領域に変わって LED が光っている時間が増えていくため、輝度値は単調に増えていく様子が見られる。

LED の点滅周期がカメラの露出時間より長いことを前提として LED の点滅周期を $T(s)$ としてカメラの露出時間を $ex(s)$ と定義すると pixel 値が変動する時間 $t(s)$ は

$$t = T - ex(s) \tag{3.1}$$

となる。

よってこの間に n 行が読み出しを開始したとすると、1 行読み出し開始してから次の行の読み出しを開始するまでの時間 $t_d(s)$ は

$$t_d = t/n(s) \tag{3.2}$$

となる。

この式に画像サイズの半分である 128pixel をかけることで 256×256 pixel において実際に最初の行が読み出し開始してから最後の行が読み出し開始するまでの時間 (図 3.2 中の τ) が求めることができる

実験と結果

今回の実験ではカメラの画素数を 256×256 pixel、露出時間 1ms でフレームを

取得した。LED の点滅にはファンクションジェネレータを用いて 700Hz の周波数の矩形波で点滅させ、検出器に各周波数で一様光を入射させた時の画像をそれぞれ 50 枚取得した。バイアスやフラットの画像処理を行なったのち、原理に基づいて各フレームごとに t_d を計算しそれらを平均して露光タイミングのずれを算出した。

次に本実験により得られた 256×256 pixel 画像を図 3.12 に示す。図 3.13 は各列ごとに値の平均を求めて各列と pixel 値の関係をプロットしたものである。図 3.13 から pixel 値の変動している pixel の行数 n を求めた (表 3.4)。

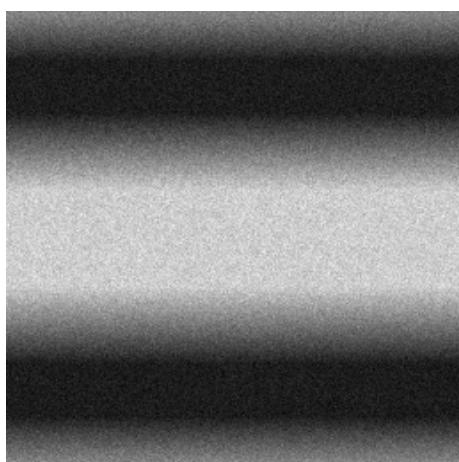


図 3.12 点滅周波数 700Hz で取得されたフレーム

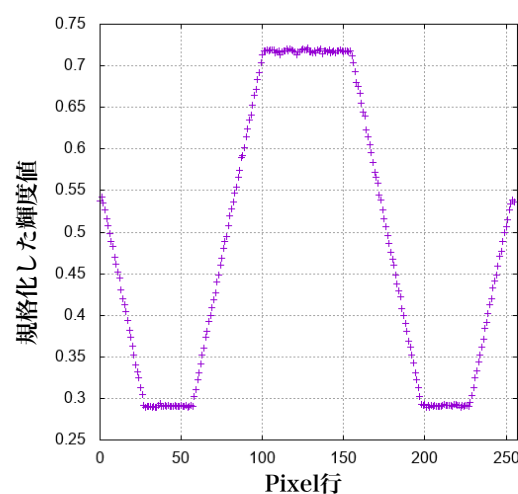


図 3.13 各行と pixel 値の関係

周波数 (Hz)	pixel 行数 (平均値)
700	43.956

表 3.3 各 LED 周波数における読み出し pixel 行数を示した図。行数は 50 枚のフレームの行数の平均を取ったものである。

輝度値が最大値から最小値になるまでにかかる時間は式 3.1 から $1/700 - 0.001s$ であり、図 3.11 の右図における ② の範囲の pixel 数 n が 43.956 なので行間の露光読み出しの時間ズレは $0.00972ms$ と求められる。特に $N \times N_{pixel}$ の画素数を持つ検出器においてはローリングシャッターによる時間ズレは

$$\tau = 0.00972 \times N/2 \text{ (ms)} \quad (3.3)$$

という結果が得られた。図 3.11 右図の ② 領域で見られるように横軸に対して輝度値が線形的に変化しているとするとローリングシャッターによる時間ズレは画素数に比例して大きくなるのがわかる。

3.2.6 行方向に対する読み出しのズレの測定

前節ではローリングシャッターによって一枚のフレームの中で読み出しと露光のタイミングが行数に比例してずれていることがわかった。この章では1フレームの中の行方向に対して露光タイミングにずれがあるのか評価を行った。行方向における露光と読み出しのタイミングのズレの測定はLED点滅によって得られたフレームの輝度分布を用いて評価した。今回の実験で得られたフレームはこの節の結果で示す。図3.15の左図はLEDを800Hzで点滅させて得られたフレーム50枚をフラット、バイアス処理を行い平均して得られたフレームである。図3.15の右図は左図中の緑枠内の領域について、図3.14のような方法を使って1行ずつ展開した時に得られた輝度分布図である。この輝度分布図について各行に最小二乗法により回帰直線を求め、各行の傾きの相関を評価する。

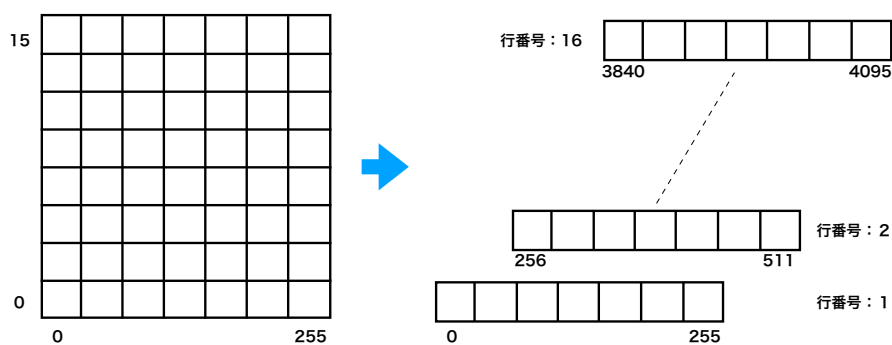


図 3.14 行方向の評価は図のように1つのフレームを各行ごとに展開することで各行における輝度分布から露光タイミングと読み出しタイミングズレの評価を行った。

結果

図3.15の左図はLEDを800Hzで点滅させた時に得られたフレームを50枚平均したものであり、緑線で囲われた領域は列方向において輝度値が変化している。右図はこの緑線の領域内のピクセルについて輝度分布の関係を横軸に図3.14の右図のように各行のpixelに割り振られた番号、縦軸に輝度値としての時の分布図である。横軸において256ごとに輝度値が離散的な振る舞いをしている様子が見られ、行ごとに輝度値が単調に増加していることがわかる。

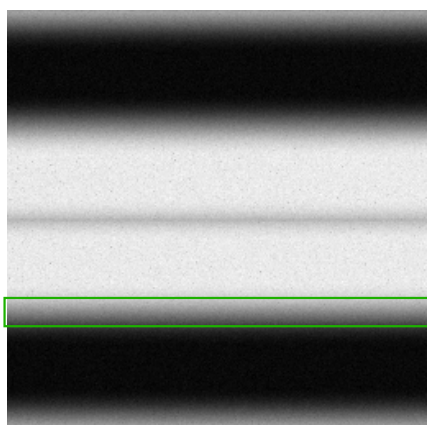


図 3.15 点滅周期 800Hz で 50 枚平均した画像

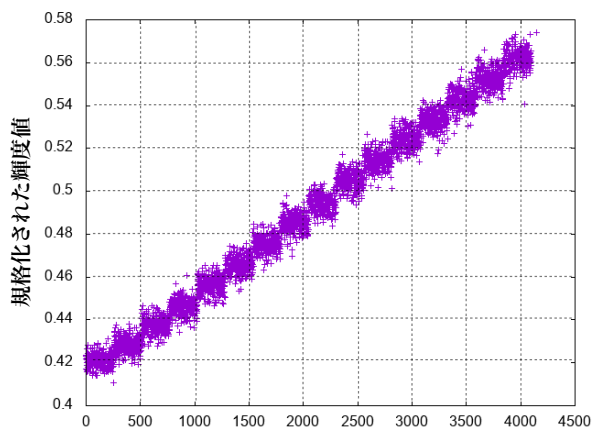


図 3.16 図 3.15 の緑の四角に囲まれた輝度値が変化する領域について図 3.14 のように展開した時の輝度分布

各行において輝度値を回帰直線を用いて評価した。図 3.17 は各行における回帰直線の傾きを表した表となっている。ここで回帰直線の傾きは

$$\text{回帰直線の傾き} = \frac{d \text{ 輝度値}}{d \text{ pixel}} \tag{3.4}$$

で表され、1pixel の変化に対する輝度値の変化量を表すパラメータである。列方向における輝度値の変化量と比べると行方向の輝度値の変化量は 10^{-6} スケールで小さい。また図 3.17 において行同士の傾きの関係性を見ると系統的な関係性は見られないことがわかる。よってローリングシャッターの効果による行方向における露光と読み出しのズレは見られないと考えることができる。

行番号	回帰直線の傾き	行番号	回帰直線の傾き
1	1.08013e-06	9	-4.06265e-06
2	-6.38796e-07	10	-1.51415e-07
3	-5.54532e-07	11	5.60123e-07
4	-1.4684e-06	12	2.61942e-06
5	1.06679e-06	13	4.4348e-06
6	2.52155e-06	14	2.55821e-06
7	1.50059e-06	15	8.62598e-07
8	-1.11272e-06	16	6.48161e-06

図 3.17 LED を 800Hz の周波数で点滅させた時に各行における輝度分布を回帰直線でフィッティングした時の傾き

3.2.7 トリガ制御の評価

この説ではカメラでフレーム取得を行ってから pc の RAM にデータが送られるまでの時間計測を行った。この結果からフレーム取得から波面測定を行うまでのレイテンシーが測定されることになる。トリガ制御方式は読み出し同期モードで行なった。

測定方法

本実験における Latency は各画素の信号が読み出されてから波面測定が行われるまでの時間として定義する。しかしローリングシャッター読み出しの場合には行ごとに読み出しのタイミングが異なっているので厳密な Latency は各行ごとに異なる。各行における Latency の違いは読み出しタイミングのずれによるものなので 1 行ごとの Latency のずれを $9.72\mu\text{s}$ として、各行における Latency を計算した。下図に latency の測定方法のダイアグラムを示す。

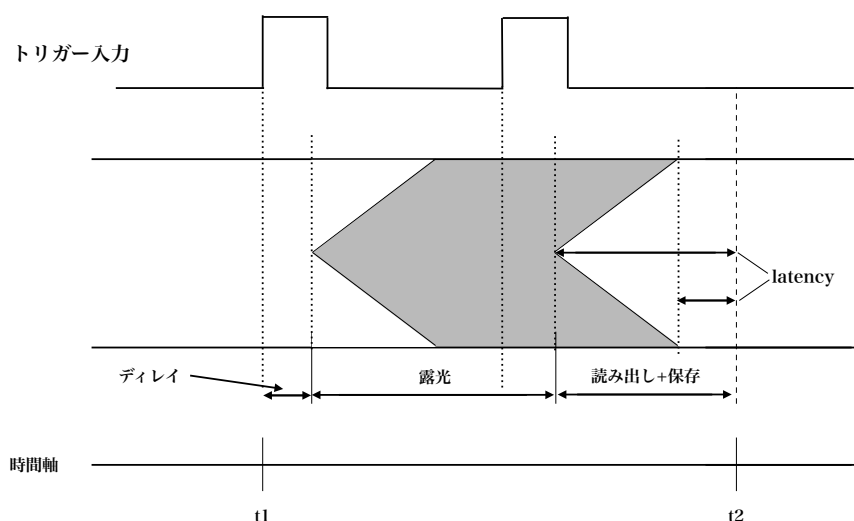


図 3.18 データの読み出しから pc メモリ上に保存されるまでの時間は外部からのトリガがカメラに入力される時の時間 (t_1) とデータがメモリ上に保存される時の時間 (t_2) の時間差を計測することで得られる。上図はトリガの入力に対するカメラの露光状態と時間計測のタイミングを表したダイアグラムである。トリガが入力されると、ディレイ時間だけ遅れてカメラが露光を開始する。読み出し同期モードではパルスの周期が露光時間に対応するので次のトリガが入力されるとカメラは行ごとに読み出しを開始し、データがメモリ上に保存される。したがって t_2 と t_1 の時間差にはディレイの時間と露光時間とローリングシャッターに基づく読み出し時間とデータの転送から、pc メモリに保存されるまでの時間が含まれていることになる。

読み出し同期モードでは露光時間はパルスの周期と等しくなっている。またローリングシャッターによる読み出し時間のズレについては前節での測定値を

用いることにする。そのため latency の測定には上図におけるディレイの時間を測定する必要がある。

ディレイの測定

ディレイの測定には LED とファンクションジェネレーターを用いて行なった。測定はカメラに入力されるトリガーパルスと、LED に入力するパルスの間隔を変えていくことで得られるフレームの輝度分布の変化を利用してディレイの計測を行う。測定方法については下図に示す。

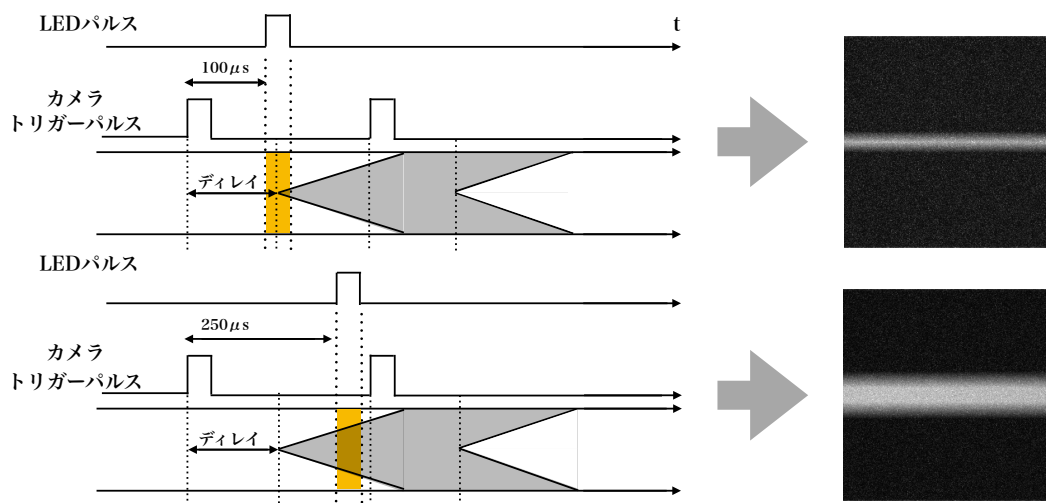


図 3.19 ディレイの測定には LED とカメラに入力するパルスの間隔を変えた時の中央の行の輝度値の振る舞いを用いた、上図はパルスの間隔を $100\mu\text{s}$ と $250\mu\text{s}$ にした時に輝度分布がどのように振る舞うかを示している。

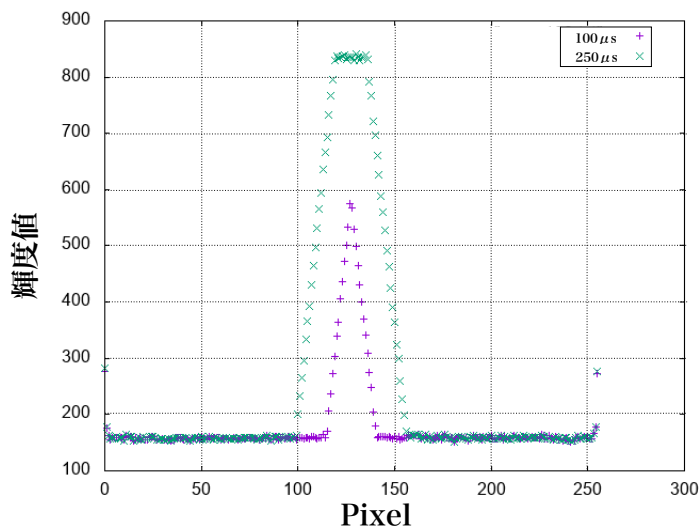


図 3.20 図 3.19 の右図の LED とカメラに入力するパルス間隔が $100\mu\text{s}$ と $250\mu\text{s}$ の時の画像の各行における輝度値の振る舞いをそれぞれ示している。パルス間隔が $100\mu\text{s}$ の時には LED が光っている時間領域がカメラが露光している時間領域に全て含まれていないため、全て含まれている $250\mu\text{s}$ の場合に比べて中央の行の輝度値が小さくなっていることがわかる。

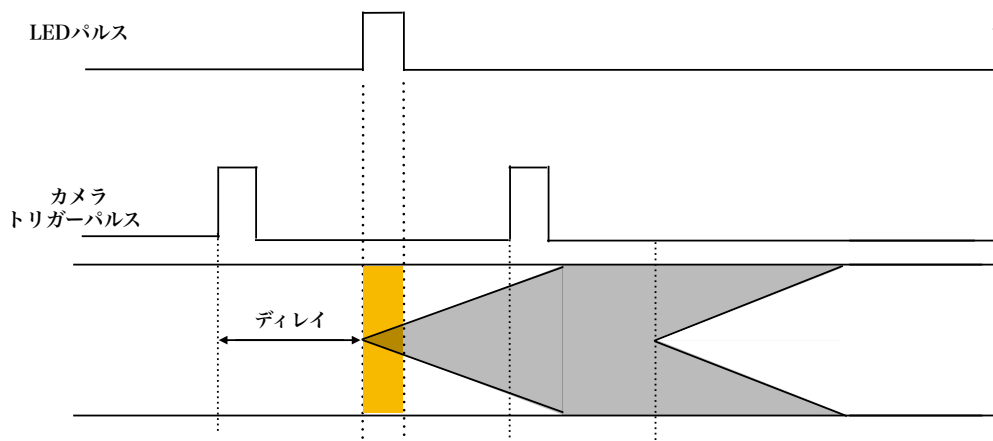


図 3.21 カメラと LED に入力されるパルスの間隔がディレイと一致している場合

カメラと LED に入力されるパルスの間隔を $100\mu\text{s}$ から徐々に大きくしていった時に輝度値が初めて最大の値を示した時のパルス間隔がディレイと定義できるとし (図 3.21)、図 3.22 に横軸をパルス間隔 ($10\mu\text{s}$ サンプリング)、縦軸に各フレームの画像中央の行の輝度値を平均したものを示した。

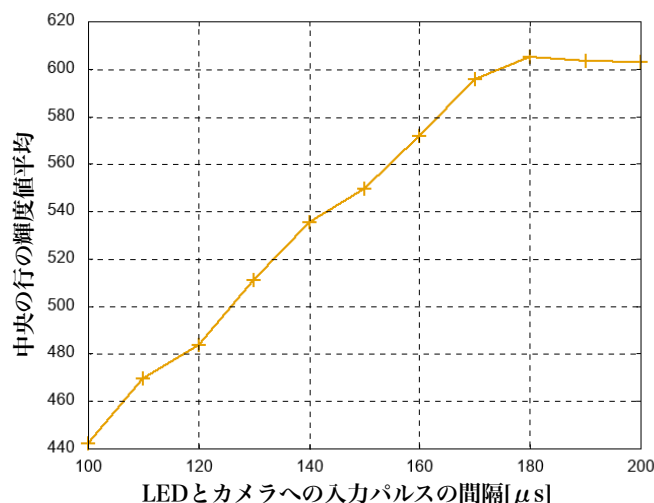


図 3.22 カメラと LED に入力されるパルス間隔と画像中央の行の輝度値の関係 (10 μ s サンプルング)

上図より 100 μ s~170 μ s の区間ではパルスの間隔に対して輝度値の応答がある程度線形に振舞っているが 170 μ s~180 μ s の間で輝度値が最大に達し、この区間内でパルス間隔とディレイが一致していると考えられる。そこで 170 μ s~180 μ s の区間についてより細かいサンプルングでパルス間隔を変化させた時の輝度値の応答を調べた。図 3.23 は 1 μ s サンプルングで輝度値の関係を示したグラフである。

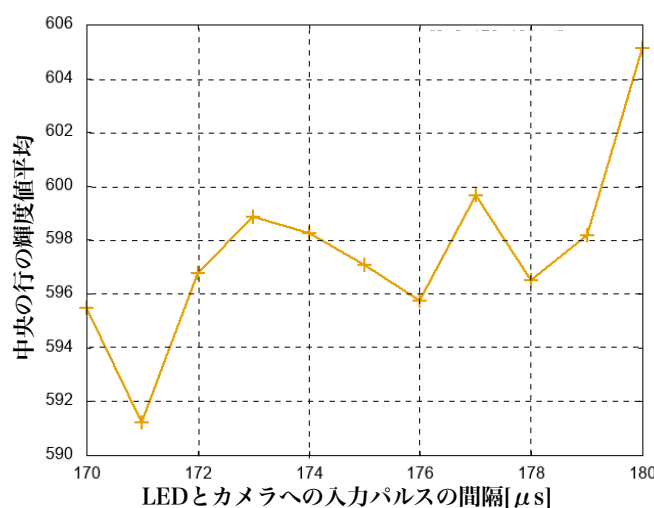


図 3.23 カメラと LED に入力されるパルス間隔と画像中央の行の輝度値の関係 (1 μ s サンプルング)

1 μ s サンプルングではパルス間隔に対して輝度値が線形に応答していないこと

がわかる。これはディレイにジッタ ($9.75\mu\text{s}$) があることにより正確に露光時間に反映できていないことによるものと考えられる。そこで図 3.22 で線形応答している区間から回帰直線を求めることにより輝度値が最大になる時のパルスの間隔を概算した。

輝度値最大 (平均)	603.829
パルス間隔	$174.089\mu\text{s}$

線形フィッティングの結果によりパルスの間隔を変えた時にフレーム中央の行の輝度値が最大になる、つまり今回測定したディレイと一致しているのは $174.089\mu\text{s}$ と求められた。

latency の計算

ディレイが求められたのでここで図 3.18 における t_1 と t_2 の時間差から露光時間、ローリングシャッターに基づく読み出し時間、さらにディレイを引き算することで画像データが pc メモリ上に保存されるまでの時間を計算する。

画像数 (pixel)	$t_2 - t_1$ (ms)	露光時間 (ms)	ローリングシャッター (ms)	ディレイ (ms)	latency (ms)
256×256	3.178	$1.506(\pm 0.0158)$	1.245	0.174	0.253
512×512	5.538	$2.624(\pm 0.0042)$	2.489	0.174	0.251
1024×1024	10.715	$5.302(\pm 0.0061)$	4.978	0.174	0.261
2048×2048	20.729	$10.315(\pm 0.0142)$	9.956	0.174	0.284

この結果から latency が画像サイズに依存しないことがわかる。これは読み出しとデータを pc メモリ上に保存するまでのプロセスを 1 行読み出し毎に随時行っているためと考えられる。またローリングシャッターの効果で露光タイミングと読み出しのタイミングにはずれがある。この測定結果から特に 256×256 では、フレーム端の行はフレーム中央の行に比べて 1.2448ms 遅れて読み出されていることから、フレーム全体の latency としては最大はフレーム中央で 1.442ms 、最小はフレーム端で 0.25311ms となる。

3.2.8 LTAO に向けたカメラの複数制御

この説では LTAO に向けてカメラ 2 台を同時に制御を行なった結果を示す。LTAO のソフトウェア構築は 2 章で説明したように 1 つのガイド星につき 1 つの波面センサーが必要となるので合計 4 つのカメラが必要になる。図 2.9 では制御用の WFS コントローラを 4 つ必要であるとしたがすばる望遠鏡の赤外ナスミス台に WFS コント

ローラ 4 つを含めた制御 pc を置く十分なスペースの確保が不透明であるため、4 つの WFS を 1 つの WFS コントローラで制御することも検討されている。1 つの WFS コントローラで制御を行うことで、それぞれのカメラから得られる波面情報の同期性も向上すると期待されている。そこで 2 台のカメラを Openmp の並列処理ライブラリを用いて 1 つの pc で同時に制御することでデータの同期性をチェックした。カメラのトリガ制御方式は高い FPS に加えてデータの同期性が最も期待できる読み出し同期モードでの制御を行った。図 3.24 は 2 台のカメラの同時制御について説明した図である。それぞれの関数の役割については APPENDIX で述べる。

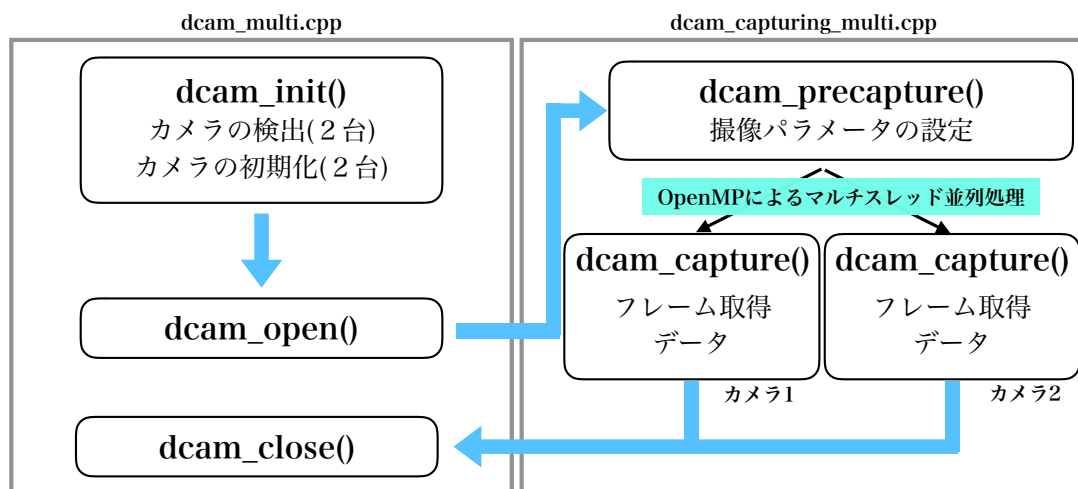


図 3.24 1 台の pc で 2 つのカメラの制御を行った時の全体のルーチンを示した図。
dcam_multi.cpp で 2 台のカメラを初期化し、*dcam_capturing_multi.cpp* で撮像
パラメータの設定を行った後 OpenMP を用いてカメラ 1 台につき 1 スレッドを割
り当て、それぞれのスレッドでカメラ制御とフレーム取得を行なっている。

2 台のカメラの同期性チェックは、1 つの LED を高速に点滅させその像を二つのカメラを同時に制御にしてフレームの取得を行うことで、それぞれのカメラで得られたフレームの輝度分布の整合性から評価する。

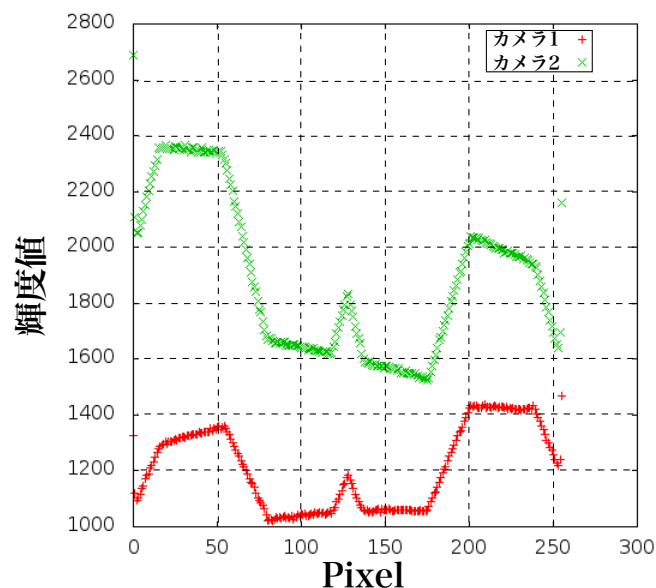


図 3.25 今回の実験で得られた画像の輝度分布を示した図。1つのLEDの点滅を2つのカメラの同時制御により観測。それぞれのカメラの輝度分布から得られたフレームがどれだけ同期性が取られているかを測定することができる。

上図の輝度分布において輝度の振る舞いに変化する pixel 座標の位置をカメラ1とカメラ2で求めることで2つのカメラの間の遅延時間を測定した。

平均値	$7.5744\mu\text{s} \pm 2.3774$
中央値	$7.7041\mu\text{s}$

平均値と中央値の算出にはそれぞれの座標差の絶対値を用いて計算している。この二つのカメラにおいてどちらかのカメラが常に先行して露光している等の振る舞いは見られなかった。本実験による両カメラの遅延はトリガ入力から露光開始されるまでのジッタの範囲であるため、データ同期性は十分に保たれていると考察できる。

第 4 章

シミュレーションのセットアップ

ローリングシャッターが LTAO システムにおける波面測定にどの程度影響するのか考察するために OOMAO という AO シミュレーターを用いて LTAO システムにおけるシャックハルトマンの像をシミュレーションを通して取得して評価した。シミュレーションのセットアップは ULTIMATE-START(akiyama.2017[3]) をもとにパラメータ設定した。その章ではシミュレーションに用いたパラメータとともに、ローリングシャッターの像の作成法について説明する。

4.1 シミュレーションパラメータ

この説では LTAO のデザインを考慮して OOMAO 上で設定したシミュレーションパラメータについて説明する。

大気揺らぎ

大気揺らぎはマウナケア山頂のサイト調査 (Els[4]) で得られた大気プロファイルの値を用いて OOMAO 上で Kolmogorov 大気揺らぎモデルに基づいて作成された大気揺らぎを用いる。Kolmogorov 乱流における outer scale の値は Ono[15] の観測結果から得られた 25.5m を用いる、また inner scale の値は乱流の強さを無視できるとし考慮していない。

風速

風速は大気揺らぎモデルの時間変動を記述するために重要なパラメータとなる。風速は wind shear の効果によってガウシアン of 振る舞いを示すことが知られている (Hardy[11])。また Hardy[11] によると風速のモデルは v_G を低い高度での風速、 v_T を対流圏界面付近での風速、 ζ を天頂角、 H_T を対流圏界面の高さ、 L_T を対流圏界面の厚さ、 ϕ を望遠鏡の向きと定義すると、以下のような式

で表すことができる。

$$v(h) = v_G + v_T \exp\left[-\left(\frac{h \cos(\zeta) - H_T}{L_T}\right)^2\right] \times [\sin^2(\phi) + \cos^2(\phi) \cos^2(\zeta)] \quad (4.1)$$

今回のシミュレーションでは、 $v_G = 5m/s$ 、 $v_T = 20m/s$ 、 $\zeta = 0$ 、 $H_T = 11km$ 、 $L_T = 5km$ 、 $\phi = \pi/2$ として上式に基づいて風速を各高さについて定義した。また風向は各高度の層においてランダムとした。

本研究で作成した大気揺らぎのプロファイルを以下の表にまとめる

Height(km)	$C_n^2 dh(m^{1/3})$	fractionalR0	windSpeed(km/s)	windDirection(rad)
0.0	19.737e-14	0.596	0.0052	1.57
0.5	3.19e-14	0.0963	0.0052	2.33
1.0	1.074e-14	0.0325	0.0054	0.74
2.0	1.233e-14	0.0372	0.0058	2.52
4.0	2.879e-14	0.0869	0.0078	1.33
8.0	2.264e-14	0.0684	0.0189	0.20
16.0	2.734e-14	0.0826	0.0123	1.32

表 4.1 大気揺らぎプロファイル

ガイド星

LTAO システムのレーザーガイド星は上空 90km 付近に一つのレーザーガイド星につき 5.5W の (R=11mag に相当) の出力で合計 4 つ打ち上げる。それぞれのレーザーガイド星は視野中心から約 10" 付近に正方形に打ち上げられるが今回は単純な系を考えるため一つのレーザーガイド星を天頂方向に打ち上げた場合を考える。また自然ガイド星は AO188 の波面センサー内でフォーカス成分、TT 成分を測定するためこのシミュレーションでは考慮していない。

望遠鏡

すばる望遠鏡 LTAO システムのため、マウナケア山頂 (4000m) にある円形の口径 8.2m の望遠鏡を想定する。またローリングシャッターの影響のみをシミュレートするため、望遠鏡の主鏡の歪みや AO188 や LTAO 内の光学系で発生する収差は無視できる理想的な場合とする。

可変形鏡

可変形鏡は本来素子数や、鏡の構成に応じて推定波面に対して可変形鏡の応答にエラーが生じるが、ここでは推定した波面を可変形鏡が完全に再現するような理想的な場合を考える。

波面センサー

波面センサーでは光学系は収差のない理想的な場合とする。またカメラは今回

制御を行った Orca flash 4.0 v2 に基づき CMOS センサーを想定し、シャックハルトマンの像は次説で説明するアルゴリズムを使ってローリングシャッターの効果を考慮したものを作成した。その他の詳細な波面センサーのパラメータ設定は以下の表にまとめる。

表 4.2 CMOS カメラのインプットパラメータ

WFS 分割数	25 × 25
pixel scale	0.5"/pixel
サブアパーチャーの視野	4"
検出範囲	200 × 200pixel
FPS	約 400Hz ~ 850Hz
読み出し方式	ローリングシャッター
外部トリガモード	読み出し同期モード

pixel scale は 1 ピクセルが占める視野で定義されており、最適な pixel scale を決めることでサブアパーチャーの視野とスポット検出範囲が定まる。図 4.1 は pixel scale を変化させた時のサブアパーチャー内の傾き成分の誤差を示しており、縦軸が大きくなるほど、スポット重心検出精度が悪くなっている。各項目に共通して pixel scale が 0.4" の時に最も精度よく重心検出が行われているがここでは 0.5" と設定した。これは pixel scale 0.4" と 0.5" で推定誤差に差が少ないこと、また 0.4 に比べて 0.5" は 1 ピクセルあたりに入ってくる光子数が多くなるために SN 比が良くなることを考慮した。

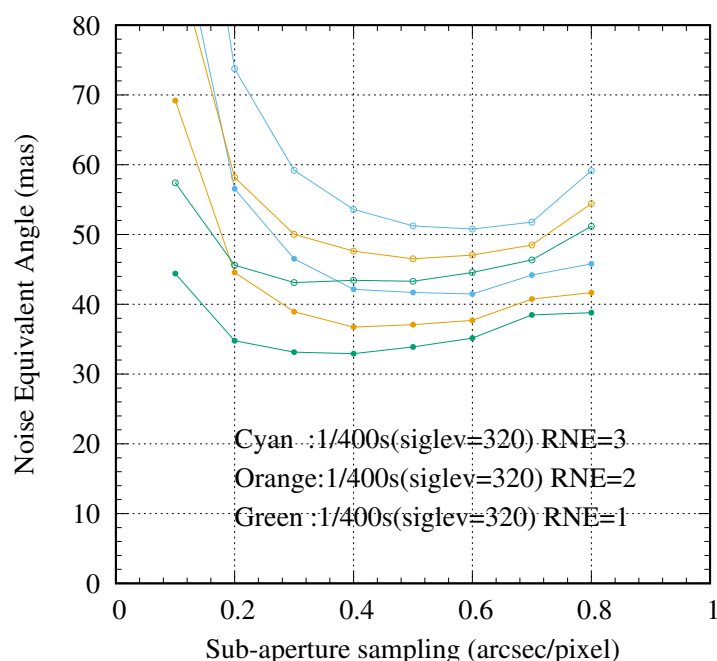


図 4.1 pixel scale(横軸)を変化させた時の各サブアパーチャーでの Tip-Tilt 測定誤差 (縦軸) 関係を各読み出しノイズについて示した図 (Akiyama[3])。青、オレンジ、緑はそれぞれ読み出しノイズ $3e^-$, $2e^-$, $1e^-$ の場合を示し、同じ色でグラフが異なっているのは重心検出精度の違いを示している。全てのグラフに共通して 0.4" 付近で最も測定誤差が小さくなっている。

4.2 シミュレーションの流れ

この説では OOMAO におけるシミュレーションの流れを説明する。OOMAO では 4.1 章で説明したシミュレーションパラメータを設定することで望遠鏡、ガイド星、大気揺らぎ、波面センサーを作成する。ガイド星からの光は上空 90km からの有限な光であり、この光が作成した大気揺らぎを通過して望遠鏡、波面センサーに入射し最終的に位相の乱れた波面の SHWFS 像を作成している。しかしシミュレーション上で作成された SHWFS 像はグローバルシャッター像を想定しているため、次の節で説明するローリングシャッター像の作成アルゴリズムを適用してローリングシャッターの SHWFS 像を取得する。作成されたローリングシャッターの SHWFS 像から再構成された波面の精度評価についても次の節で説明する。シミュレーションの流れをまとめた図 4.2 を示す。

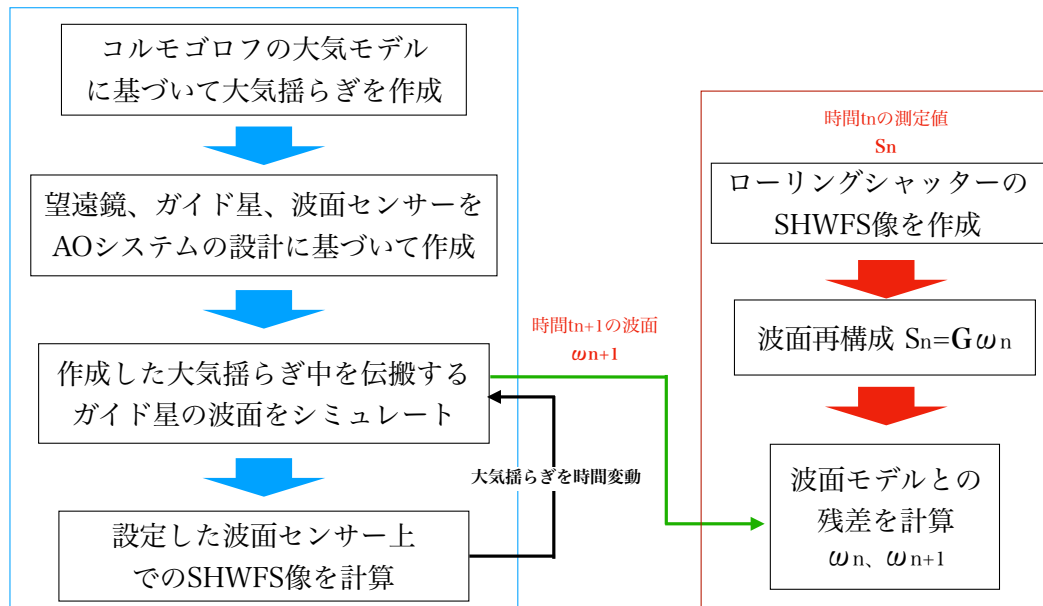


図 4.2 シミュレーションの流れを示した図。OOMAO のシミュレーションでのルーチンを青で囲み、赤く囲った内容が本研究で作成したルーチンである。OOMAO ではガイド星の波面と SHWFS 像が得られる。n ステップにおける SHWFS 像を 1.3 章で説明した波面再構成アルゴリズムを用いてスポットのズレから波面を計算を行う。波面測定精度を評価するのは n ステップの波面計算により得られた波面と n+1 ステップのガイド星の波面との残差である。

次にローリングシャッター像の作成方法について説明する。ここではローリングシャッター像を作成するために考慮した OOMAO での SHWFS 像取得の方法と合わせて説明していく。

OOMAO における SHWFS 像取得

まず OOMAO でのカメラの画像取得は図 4.3 のような方法で行われている。OOMAO では大気揺らぎが時間変動するたびに波面と SHWFS 像を作成している。また波面センサーの露光時間は以下の式で定義されている。

$$\text{カメラの露光時間} = (\text{大気揺らぎの変動サンプリング}) \times (\text{指定した枚数}) \quad (4.2)$$

例えば 1ms のサンプリングで大気揺らぎを変動させ 10 枚取得して足し合わせると、最終的に 10ms の露光時間の SHWFS 像が取得できる。ここで大気揺らぎは 1ms で変動しており 1ms ごとに変動する大気揺らぎの波面を取得することができる。図 4.3 に SHWFS 像の取得の流れを示す。

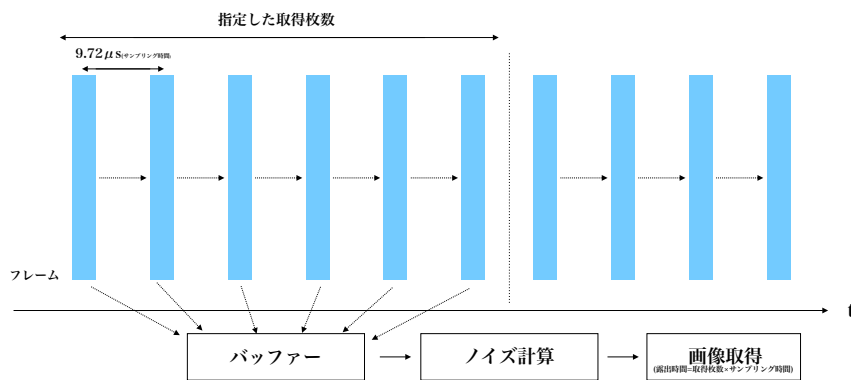


図 4.3 OMAO での SHWFS 像と大気ゆらぎの波面の取得の流れを示した図。OMAO 上では大気変動のサンプリングを設定することで大気変動するたびに SHWFS 像と大気ゆらぎによって歪んだガイド星の波面のフレームを取得することができる。図中の水色はフレームを表す。各フレームを指定した枚数分足し合わせることで式 4.2 のような露光時間を持った SHWFS 像を得ることができる。

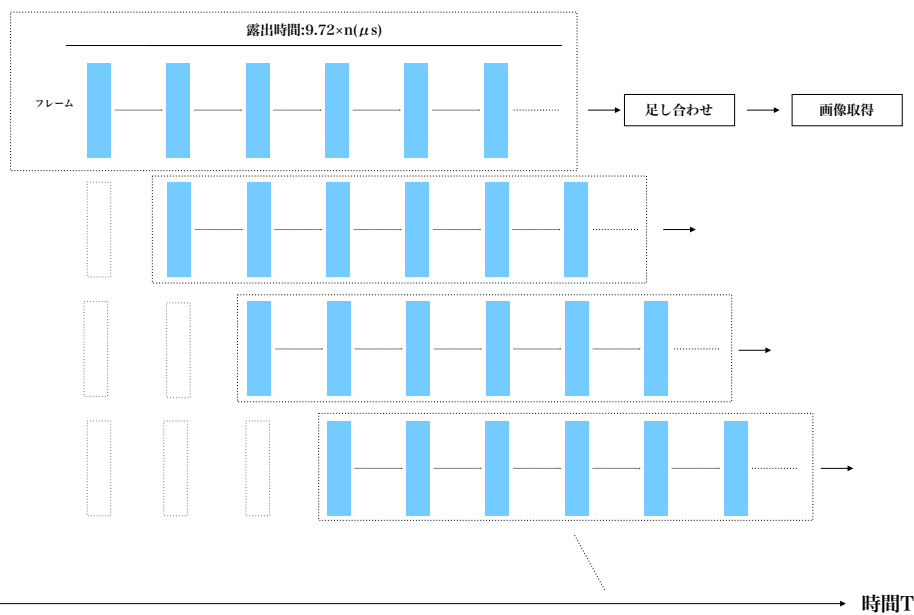


図 4.4 $9.72\mu\text{s}$ だけ大気揺らぎを時間変動させて画像を取得する時のイメージ。1 枚の画像を取得した後に大気揺らぎを 1 ステップだけ進め、同じように画像を作っていくループを繰り返す。LTAO では検出器上 $200 \times 200\text{pixel}$ の領域を使用してシャックハルトマン像を取得するのでこのループを 100 回繰り返す。

ローリングシャッター像の作成方法

Orca flash4.0 v2 ではローリングシャッターの効果により 1 行につき $9.72\mu\text{s}$ だけずれて露光と読み出しが行われており、中央の行から露光を開始し上下に向

かって順次露光を開始していく。LTAO の波面センサーでは検出領域のうち 200×200 pixel の領域を使うことがわかっているため、図 4.4 に示したように一枚の画像を取得した後に大気を 1 ステップだけ変動させて同じように画像を取得するループを合計 100 回繰り返して各行に当てはめることでローリングシャッター読み出しによって得られる SHWFS 像の作成を行った。

波面測定精度の評価方法

波面測定精度の評価方法について説明する。OOMAO では大気揺らぎによって乱れた波面の SHWFS 像以外にガイド星の波面を得ることができるので、シミュレーションから得られた SHWFS 像を 1.3 章で説明した方法を用いて波面再構成を行い残差 RMS 値から波面測定精度の評価を行う。リアルタイム補償光学では SHWFS 像から波面再構成された波面が実際に補正するのは次のステップの大気揺らぎである。本シミュレーションにおける波面測定精度は波面再構成された波面と次のステップでカメラの露光中にガイド星が通ってくる波面の平均との残差 RMS の値で評価する。

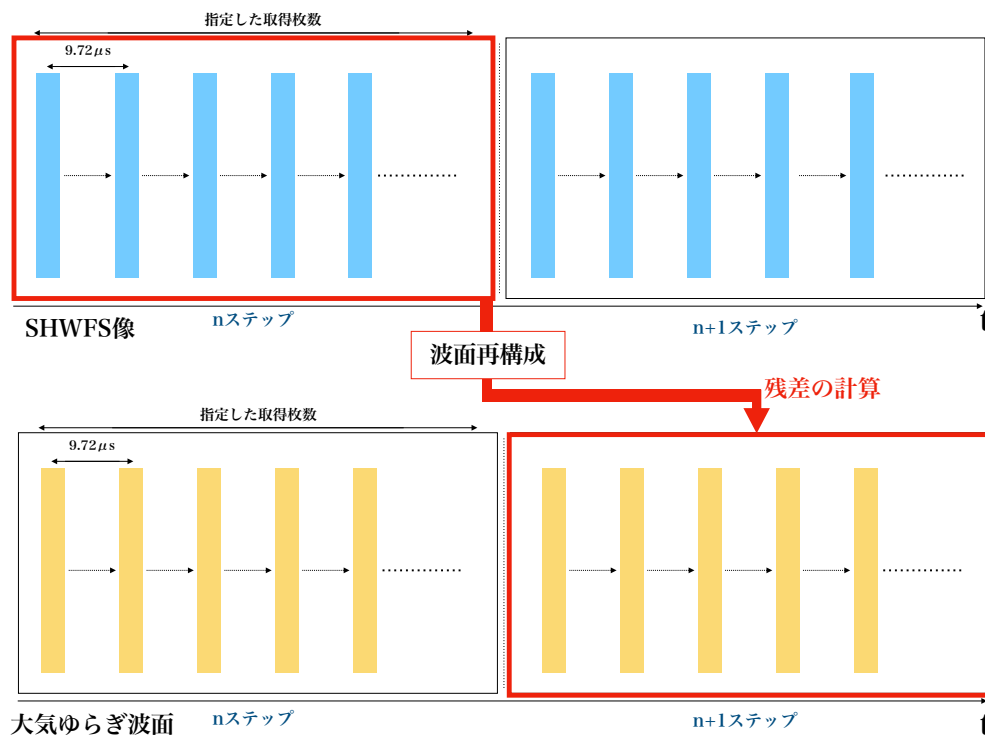


図 4.5 波面測定精度の方法について示した図。図中の上図の水色の四角は SHWFS 像のフレームを表しており、赤く囲った四角の中のフレームを足し合わせることで SHWFS 像を取得する。下図の黄色の四角は大気ゆらぎ波面のフレームを表しており、赤い四角で囲った中のフレームを平均することで大気ゆらぎの波面を取得する。

第 5 章

シミュレーション結果

この章ではシミュレーションの結果を示す。

5.1 波面推定の誤差

補償光学では波面センサーで得られた像から波面を測定して可変形鏡にフィードバックすることで大気揺らぎによって歪んだ波面の補正を行うが、歪んだ波面を完全に補正することはできない。これは波面測定から補正に至る途中でエラーが乗ってしまうことによるものである。本研究ではシミュレーションコードを用いて波面測定と測定精度の評価を SHWFS 像から再構成された波面と補正する大気ゆらぎの波面との残差 RMS の値を用いて行うがその際の残差の原因となるエラーについて説明する。本シミュレーションにおいてエラーの原因となるものは望遠鏡開口の分割サイズよりも小さいスケールの波面は測定できないことによるエラー (fitting error) と大気揺らぎが常に時間変動していることによって測定した波面と補正する波面の大気揺らぎが時間的に異なっていることによるエラー (temporal error) が挙げられる。図 5.1 に本シミュレーションにおける波面測定エラーについて示す。図 5.2 は fitting error と temporal error の様子を示した図である。また本シミュレーションでは、SHWFS 像は $9.72\mu\text{s}$ のサンプリングで得られたフレームを指定した枚数分だけ足し合わせているのに対して、残差を測定する大気ゆらぎの波面は $[9.72\mu\text{s} \times \text{指定した枚数}]$ で定義される露光時間の間の波面の平均である。そのため実際は常に変動している大気ゆらぎの測定と補正をしているが本シミュレーションでは常に変動している大気ゆらぎを露光時間の間隔で平均化しているため、この操作が波面残差 RMS のエラーになることが考えられる。5 章ではグローバルシャッター読み出しとローリングシャッター読み出しでの波面測定精度に加えて、エラーの大きさについても評価した結果を示す。

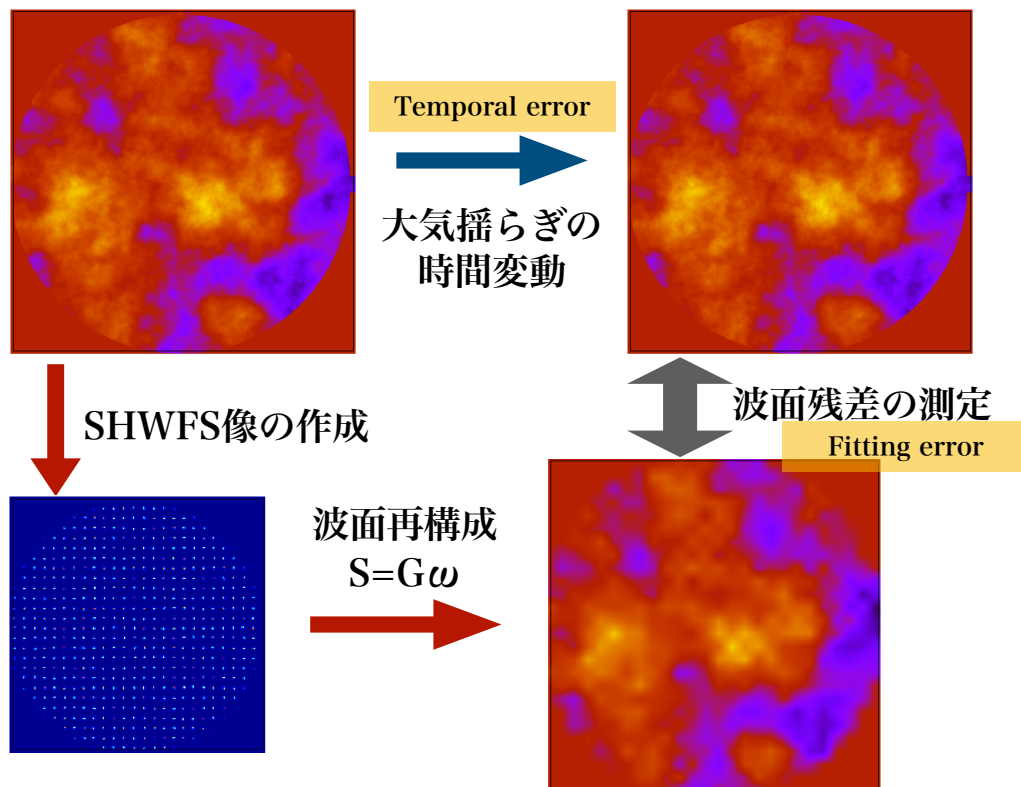


図 5.1 fitting error と temporal error の要因について示した図。本シミュレーションでは望遠鏡の開口を 25×25 に分割してサブ開口で波面の傾きを測定している。そのためサブ開口のサイズよりも小さいスケールは測定できない。また SHWFS 像から再構成された波面が残差を測定する波面は大気揺らぎを時間変動させた後の波面である。そのため波面測定を行う波面と残差を測定する波面は時間軸が異なっている。

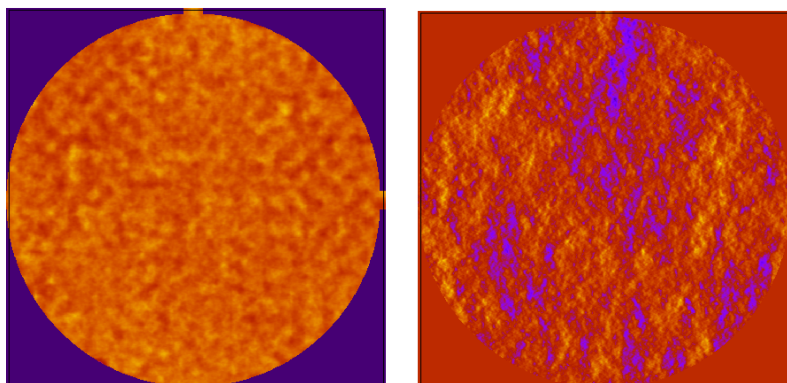


図 5.2 左図は fitting error、右図は 1 秒間に 400 回の速さで大気揺らぎを時間変動させた時の temporal error の様子を示した図

5.2 グローバルシャッターのみの場合

結果

最初にグローバルシャッターのシミュレーションの結果を示す

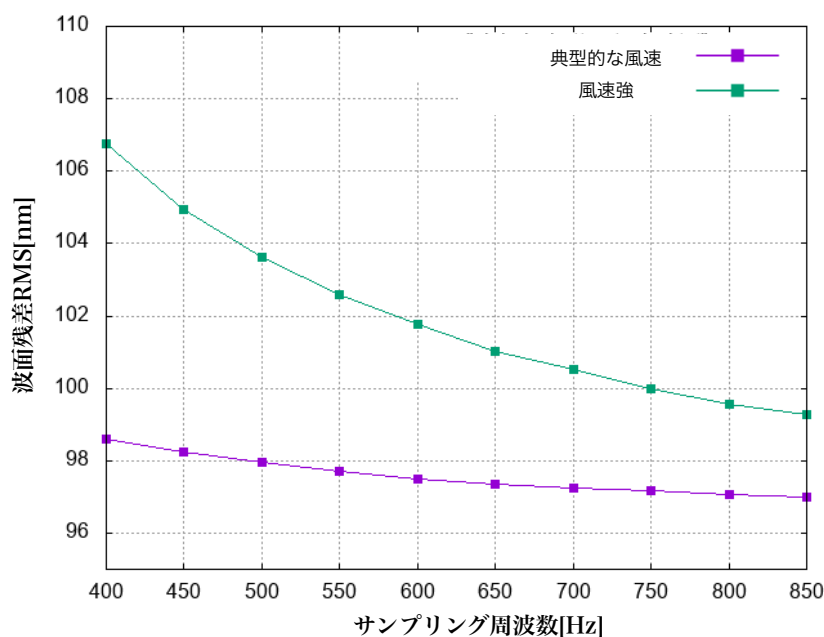


図 5.3 グローバルシャッター読み出しで波面再構成を行った場合の残差 RMS を示した図。横軸は 1 秒間に可変形鏡を更新する頻度を表しており、読み出し同期モードで制御を行う本研究においては FPS を表している。紫線で示した典型的な風速は表 4.1 の風速を与えている。緑線で示した風速強は表 4.1 で示した各高度の風速を 2 倍したものである。

図 5.3 はグローバルシャッター読み出しで波面再構成を行い補正する波面との残差 RMS を結果を示したグラフである。横軸のサンプリング周波数は AO ループを回す速度を表しており、可変形鏡を更新する頻度を表している。サンプリング周波数が大きい場合には AO ループを回す速度が速くなり風速の強さに関わらず temporal error が小さくなるため波面残差 RMS の値が小さくなっている。また風速を大きくすると大気揺らぎの時間変動が大きくなるため temporal error が大きくなり波面残差が大きくなっている。

波面測定誤差の評価

グローバルシャッターで波面測定を行った時の残差の原因は fitting error と temporal error と残差を計算する大気ゆらぎを平均化したことによるエラーである。各エラーの大きさについて評価する。

まず fitting error と temporal error について考える。図 5.4 は図 5.3 のシミュレーション結果を得るときの SHWFS 像と大気ゆらぎによって歪んだ波面の選択方法について示した図である。図 5.4 の上図は SHWFS 像の選択について示し、水色の四角が $9.72\mu\text{s}$ サンプルングで取得したフレームを表しており赤い枠で囲まれた部分のフレームの足し合わせを SHWFS 像として選択する。また図 5.4 の下図は大気ゆらぎ波面の選択について示し、横軸 t は時間軸を表しており上図と下図は同じ時間軸を考えている。本シミュレーションにおいて残差を計算する大気ゆらぎ波面は取得された SHWFS 像に対して次のステップの大気ゆらぎ波面である。そのため下図の赤い枠で囲まれた部分のフレームが選択される大気ゆらぎの波面になる。

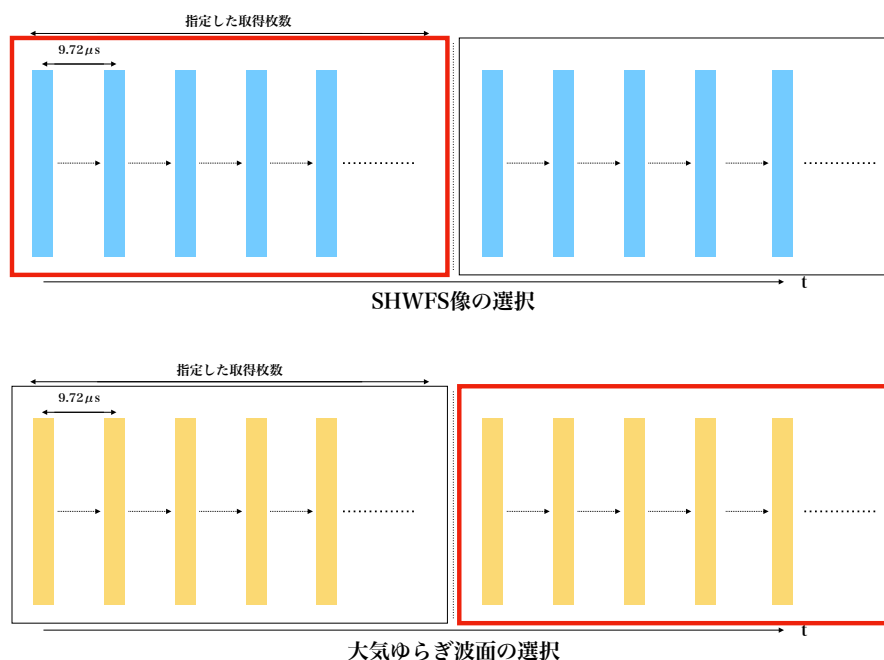


図 5.4 図 5.3 のシミュレーション結果を得るときの残差を計算する時に選択した SHWFS 像と大気ゆらぎ波面の選択について示した図。上図は SHWFS 像の選択について示し、下図は同じ時間軸の大気ゆらぎ波面の選択について示しており、水色とオレンジの四角が $9.72\mu\text{s}$ サンプルングで取得したフレームを表している。図中の赤い枠で囲まれたフレームが選択されたフレームを表している。SHWFS 像は上図の赤い枠内の各フレームの足し合わせによって一枚の画像を取得した。また大気ゆらぎ波面は下図の赤い枠内の全てのフレームを平均して一枚の波面を取得した。

fitting error による位相誤差 $\sigma_{fitting}^2(rad)$ は Hardy[11] によれば

$$\sigma_{fit}^2 = a_F \left(\frac{d}{r_0}\right)^{5/3} \quad (5.1)$$

で表される。ここで a_F は可変形鏡の構造によって決まる係数であり、fitting

error は d で表される可変形鏡の分割サイズと r_0 フリード長だけで決まり時間には依存していない。そこで本シミュレーションにおける fitting error は図 5.5 で示したように SHWFS 像と同じステップの大気ゆらぎ波面を選択して残差を計算することで評価した。

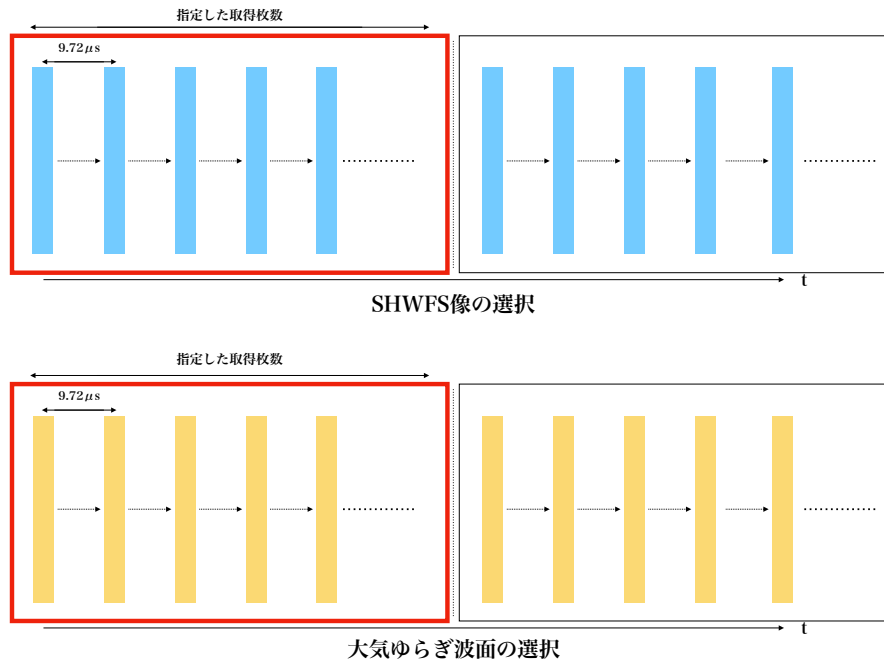


図 5.5 fitting error の評価のために残差を計算する時に選択した SHWFS 像と大気ゆらぎ波面について示した図。赤い枠で囲まれた部分が選択されたフレームを表している。ここでは fitting error のみを評価するため、SHWFS 像と大気ゆらぎ波面は同じ時間軸 (ステップ) で取得されたものを選択する。

この評価方法によって求められた各サンプリング周波数における fitting error を図 5.7 に示す。

次に temporal error について評価する。temporal error は波面センサーのパラメータに依存せず、大気ゆらぎの変動スケールとサンプリング周波数のみに依存している。そのため temporal error は図 5.6 に示したように隣あうステップの大気ゆらぎを選択し残差を求めることで評価した。

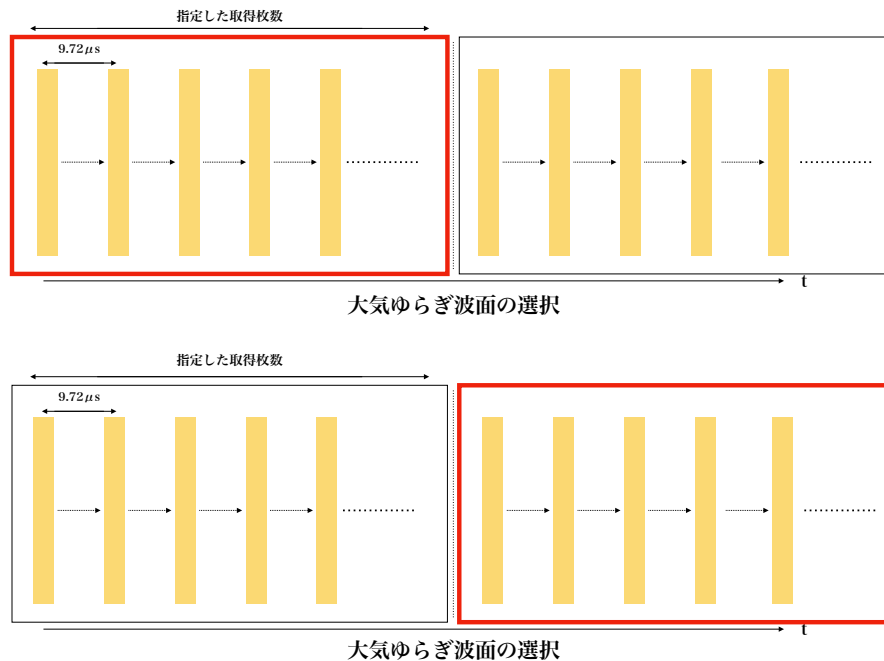


図 5.6 temporal error の評価のために残差を計算するときを選択した大気ゆらぎ波面について示した図。図 5.5 と同様に赤い枠で囲まれた部分が選択されたフレームを表している。temporal error は波面センサーに関わらず、大気ゆらぎ変動の時間スケールと DM を更新する頻度に依存している。そのため temporal error の評価のために選択されるフレームは隣あうステップの大気ゆらぎ波面同士である。

図 5.7 は fitting error と temporal error を示した図である。fitting error は時間に依存せず波面センサーのパラメータとリード長に依存するので各サンプリング周波数においてほぼ一定の値をとっている。また temporal error は緑線に典型的な風速、水色線に典型的な風速の 2 倍の強さの風速の場合を示している。サンプリング周波数が低い場合では DM の更新頻度が低く、SHWFS 像から再構成された波面情報が DM に反映されるまでの時間と補正される大気ゆらぎ波面の時間的なずれが大きくなってしまいうため、temporal error が大きくなっている。また風速を強くした場合には大気ゆらぎの変動が早くなることから典型的な場合に比べて 2 倍風速を強めた場合では temporal error が 2 倍近く大きくなっている。

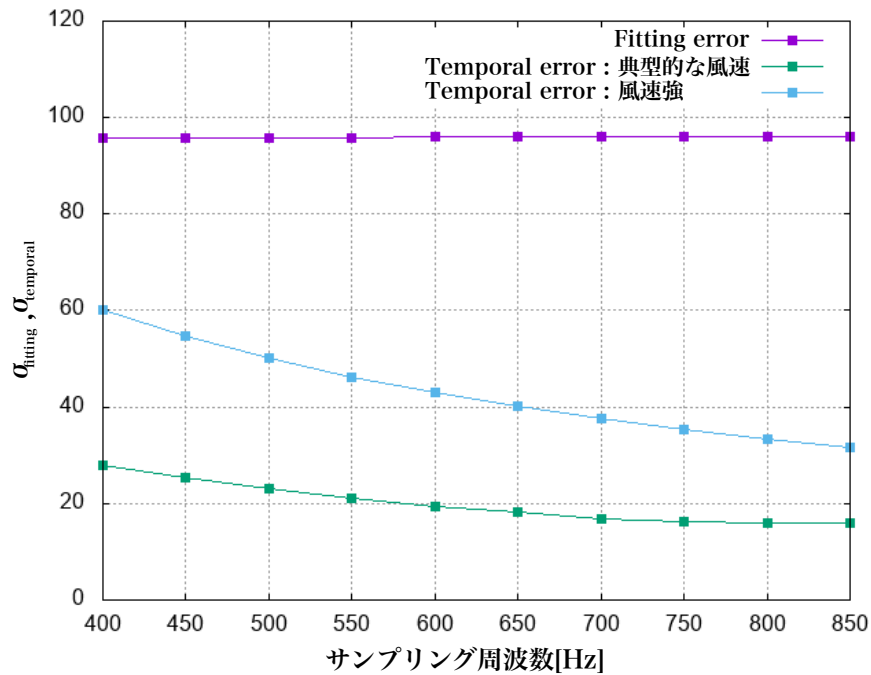


図 5.7 fitting error と temporal error のそれぞれについて示した図、紫線が本シミュレーションにおける fitting error を示しておりサンプリング周波数によらずほぼ一定の値をとっている。temporal error については典型的な風速と風速を 2 倍にしたときのそれぞれの大きさを緑線と紫線で示している。サンプリング周波数が低く、風速が大きくなると temporal error が大きくなる振る舞いが見られる。

最後に大気ゆらぎを平均したことによる誤差について考える。図 5.3 の結果において残差を計算した大気ゆらぎによる波面は露光時間の間隔で平均している。しかし実際には常に変化している大気揺らぎを可変形鏡を使って補正しているので、各サンプリング周波数において平均からどのくらい残差の値に振り幅があるのかを評価する必要がある。そこで大気ゆらぎの波面を $9.72\mu\text{s}$ サンプリングで取得したフレームの中で最初のフレームと最後のフレームを選択して残差を計算することで各サンプリング周波数において波面残差 RMS の値がとりうる範囲を評価した。結果を図 5.9 に示す。各番号は図 5.8 中のフレームの番号に対応しており ① は最初のフレーム、② は中央のフレーム、③ は最後のフレームに対応している。大気ゆらぎの波面を平均した場合の波面残差に比べて最初のフレームでは残差 RMS の値が小さく、最後のフレームでは残差 RMS が大きくなっている。図 5.8 中の赤い枠で囲った SHWFS 像に時間軸が一番近い ① のフレームは temporal error が小さく、SHWFS 像から時間軸が一番遠い ③ のフレームは temporal error が大きくなっているため、図 5.9 のように平均で計算された波面残差 RMS に対して幅を持っており、常に変動する大気ゆらぎに対して波面残差 RMS を計算すると、各サンプリング周波数において ① と ③

の間の値をとることがわかる。

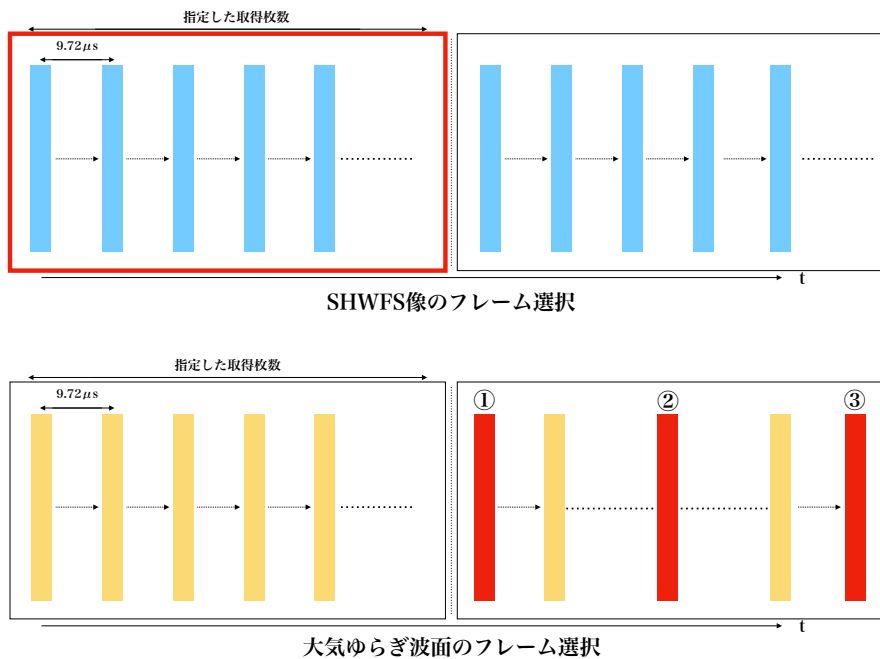


図 5.8 実際の大気ゆらぎは常に変動しているため大気ゆらぎによる波面を平均する操作に対するエラーを評価する必要がある。SHWFS 像は上図の赤い枠で囲われた領域に表され、 $9.72\mu\text{s}$ サンプルングで取得したフレームを露光時間分だけ足し合わせたものを用いた。一方残差を計算する大気ゆらぎの波面は上図の赤く塗りつぶされた四角のフレームで計算した。赤く塗りつぶされた各フレームはそれぞれ平均された大気ゆらぎのうち最初のフレーム、中央のフレーム、最後のフレームを表しており、それぞれについて残差を計算することで図 5.3 の結果に加えて各サンプル周波数における波面残差 RMS ととりうる値域を評価した。

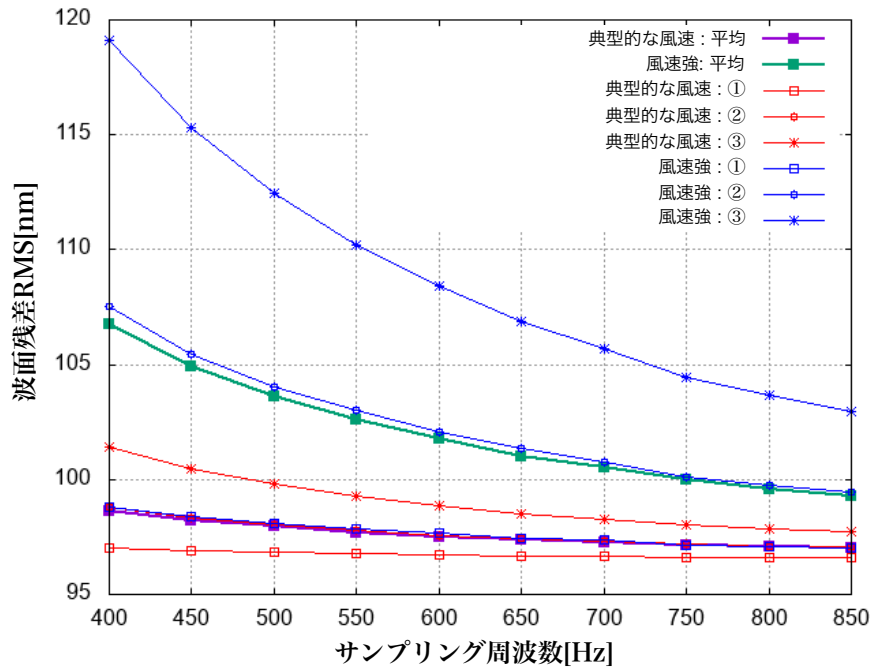


図 5.9 図 5.7 で選択したフレームそれぞれについて波面残差 RMS を計算した結果を示した図。紫の線と緑の線はそれぞれ典型的な風速とその 2 倍を与えた時の波面残差 RMS を示しており、図 5.3 のグラフと一致している。①と②と③はそれぞれ図 5.7 中のフレームの番号に対応している。

5.3 ローリングシャッターのシミュレーション結果

結果

ローリングシャッター像を作成して波面残差を測定した結果を示す。

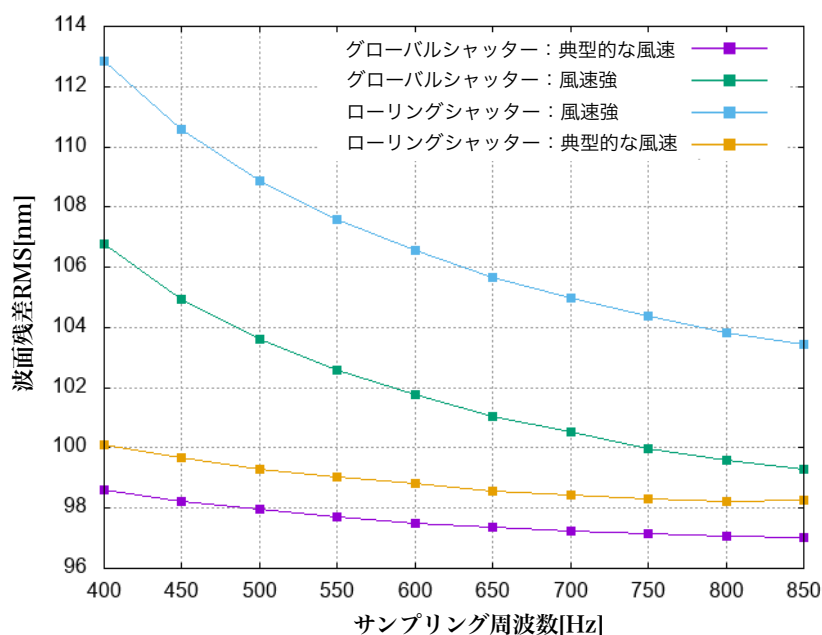


図 5.10 ローリングシャッターの場合のシミュレーション結果を示した図。図 5.1 のグローバルシャッターの場合に加えてオレンジと水色にローリングシャッターの場合の結果を示す。

図 5.10 より、サンプリング周波数を変化させて時と風速を変化させた時の波面残差の振る舞いはグローバルシャッターの場合と違いは見られないが、ローリングシャッターで SHWFS 像を取得するとグローバルシャッターの場合に比べて風速に関わらず波面残差が大きくなるという結果となった。そのため 5.2 節で評価したエラー以外にローリングシャッターによるエラーの大きさについて考察する。

ローリングシャッターエラーの評価

ローリングシャッターエラーについて評価する。図 5.9 からローリングシャッターで SHWFS 像を取得した場合とグローバルシャッターで SHWFS 像を取得した場合を比べると、各サンプリング周波数において波面誤差 RMS はローリングシャッターの場合で大きい値を示し、また RMS 値の差はサンプリング周波数によらず、一定していることがわかる。また風速を大きくすると差が広がっている振る舞いが見られる。本シミュレーションで想定した CMOS カメラは一行ごとに $9.72\mu\text{s}$ だけ露光と読み出しのタイミングがずれていると仮定しており、フレーム全体でのタイミングのズレはフレームの画素数のみに依存している。そのためローリングシャッターによる RMS 値の変化量はサンプリング周波数によらず一定していると考えられる。また風速を大きくすることで露光と読み出しのタイミングのずれの間の気流変動が大きくなるためロー

リングシャッターエラーが大きくなっていることから、ローリングシャッターエラーの大きさはフレームの画素数と大気ゆらぎ変動の大きさに依存すると考えられる。

次にローリングシャッターエラーの大きさを評価する。ローリングシャッター読み出しの特徴は一枚の画像にあっても場所によって露光と読み出しのタイミングが異なっていることである。そのためローリングシャッターエラーの大きさは図に示したように同じ露光時間、同じ時間軸(ステップ)で得られたグローバルシャッター読み出しの SHWFS 像との残差で評価するのが妥当と考えられる。

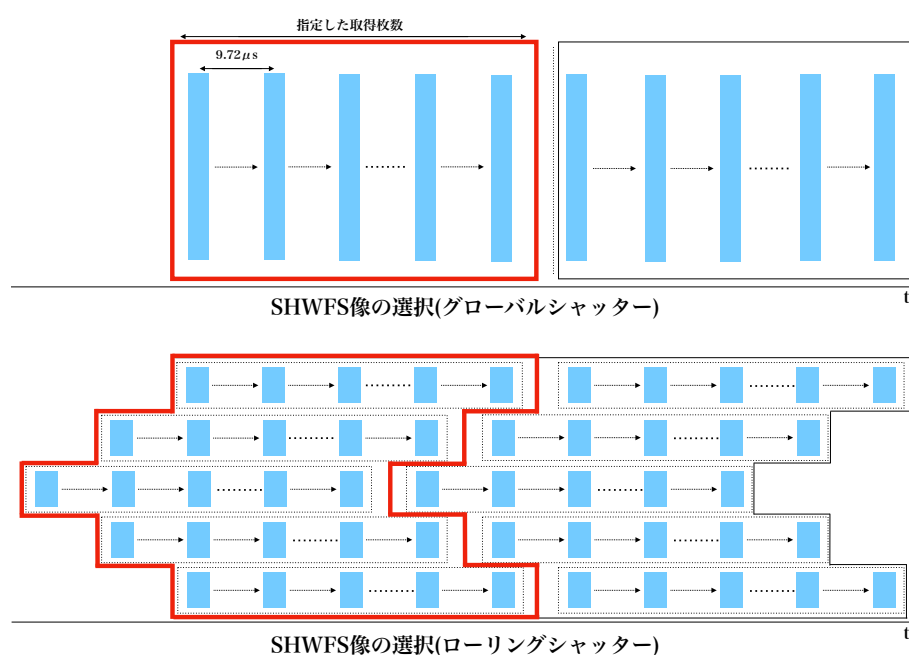


図 5.11 ローリングシャッターエラーの評価のために残差を計算するときを選択したグローバルシャッターとローリングシャッター像について示した図。ローリングシャッターによるエラーは露光と読み出しのタイミングのずれが原因であるため、同じ時間軸(ステップ)で取得されたグローバルシャッターの SHWFS 像との残差でエラーを評価する。

図 5.12 にローリングシャッターエラー評価の結果を示す。前述したようにローリングシャッターエラーの大きさはフレームの画素数と大気ゆらぎ変動の大きさに依存していることから、サンプリング周波数に依存せずそれぞれの風速においてほぼ一定の値を示しており風速の違いによってエラー値が変動している様子が見られる。

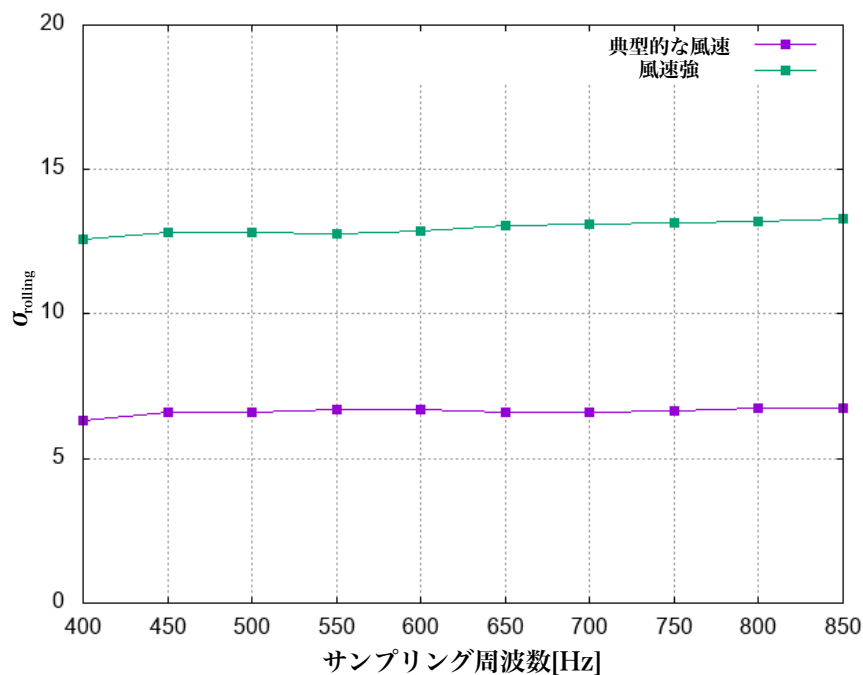


図 5.12 ローリングシャッターエラーの評価結果を示した図。どちらの風速の場合においてもサンプリング周波数に対してほぼ一定の値をとっていることがわかるが風速が大きい場合はエラー値が大きくなることがわかる。

5.4 シミュレーションの考察

本章でのシミュレーションの結果からローリングシャッター読み出しによって波面測定が悪くなるという結果になった。図 5.13 に本章で評価した各エラーの大きさをまとめる。ローリングシャッターによるエラーは fitting error や temporal error に比べると小さいが、サンプリング周波数を大きくすると fitting error を除いた、波面誤差の要因の中でローリングシャッターエラーの割合が大きくなる。そのため早いスピードで補償を行おうとすると、ローリングシャッターによる影響が強くなるという結果になった。そのためこの節ではローリングシャッターの原因を考察し補正の可能性について考える。

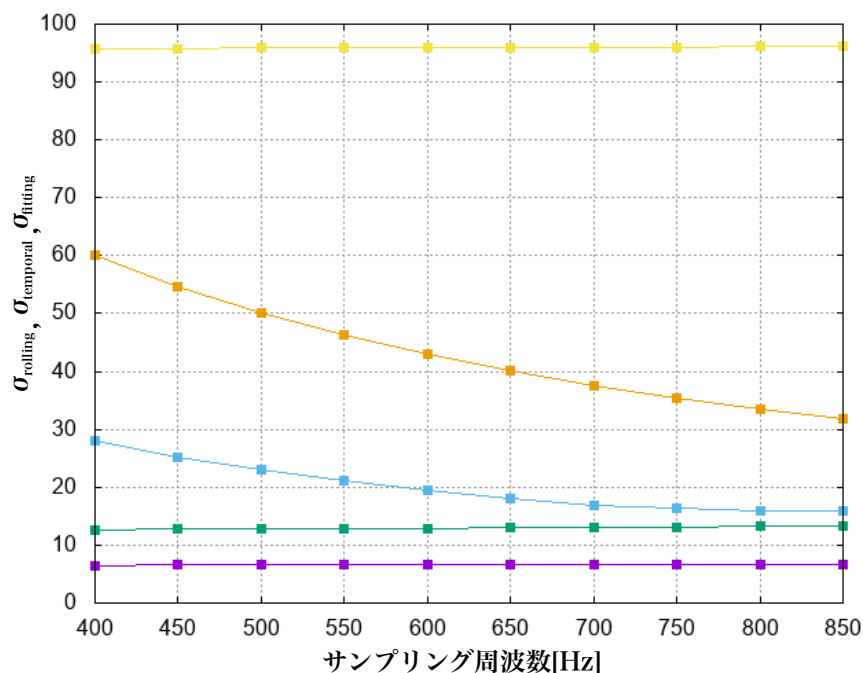


図 5.13 各エラーの評価結果を示した図。黄色線は fitting error、オレンジと水色線は temporal error、緑と紫線はローリングシャッターエラーの大きさを示す。

図 5.14 にローリングシャッターエラーの原因を表した図を示す。図 5.14 はグローバルシャッター (上図) とローリングシャッター (下図) のそれぞれについて SHWFS 像として波面測定される大気ゆらぎの時間領域 (灰色の領域) と測定された波面を用いて補正される大気ゆらぎの時間領域 (水色の領域) を表す。ローリングシャッター読み出しの場合ではグローバルシャッターと異なり、露光と読み出しタイミングが同じフレームの中でずれているためグローバルシャッター読み出しで測定される大気ゆらぎの時間領域よりも前の大気ゆらぎの情報が波面の測定量に含まれてしまう一方で水色で示した補正される大気ゆらぎに近い領域の大気ゆらぎの情報が測定量に含まれていない (赤色の領域)。そのためローリングシャッターエラーを補正するためには図 5.14 中の測定されない大気ゆらぎの情報を測定量に加える必要がある。次章ではこれをふまえて検討したローリングシャッターエラーの補正アルゴリズムについて説明する。

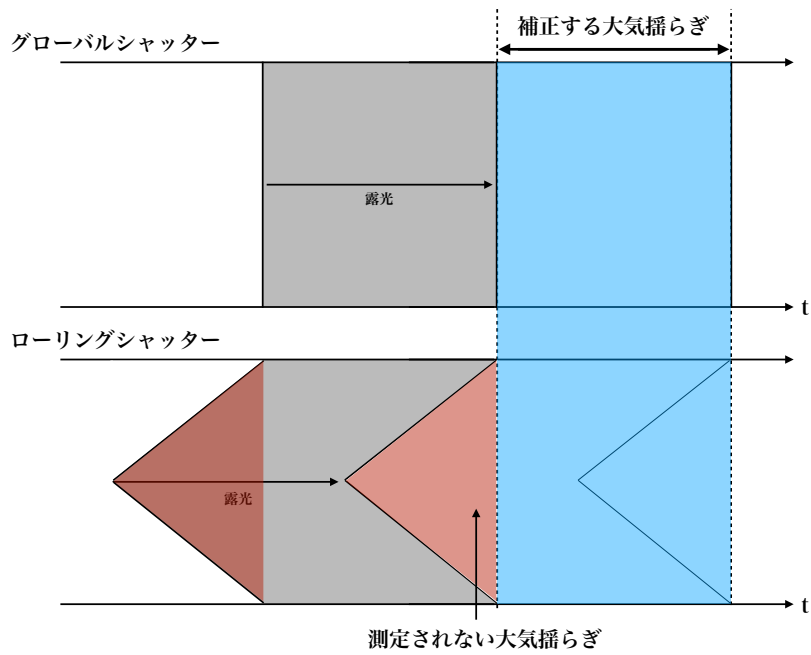


図 5.14 ローリングシャッターとグローバルシャッターの測定領域と補正領域の違いについて示した図。水色の四角は灰色の領域で測定された波面を使って補正をする領域である。ローリングシャッターでは露光タイミングが異なっているたグローバルシャッターで測定される領域よりに比べて補正する領域よりも遠い(昔の) 大気揺らぎの情報を測定量に含み、反対に補正する大気揺らぎの時間領域に近い領域は測定量に含まれていない (図中赤の領域) ことがわかる。

第 6 章

議論

前章ではローリングシャッター読み出しで波面測定を行うと、グローバルシャッターの場合と比べて波面測定の精度が悪くなるという結果になった。これはローリングシャッターの効果により露光と読み出しのタイミングがずれていることで測定できない大気揺らぎとより昔の大気揺らぎの情報を測定量に含めてしまっていることが原因である。そこでこのローリングシャッターによるエラーを軽減するために大気揺らぎを予測するアルゴリズムを考える。この章では、アルゴリズムの理論と実装結果を示し、考察に大気予測のアルゴリズムの現実性について述べる。

6.1 大気揺らぎの予測アルゴリズム

5.3 章で考察したようにローリングシャッターのエラーの原因は補正する大気揺らぎに近い大気揺らぎの領域を測定量に含めていないことにある。そこでローリングシャッターの影響を軽減するためのアルゴリズムについて考える。補償光学では波面測定と波面補正をリアルタイムで行なっている。今、波面センサーで波面を測定された大気揺らぎを n ステップ目の大気揺らぎと定義すると、 n ステップ目の波面の情報が可変形鏡に送られ可変形鏡の形を変え補正を行う大気揺らぎは $n+1$ ステップ目の大気揺らぎになる。temporal error は波面を測定した n ステップ目の大気揺らぎと補正する $n+1$ ステップ目の大気揺らぎが時間変動していることによるものでありローリングシャッターの影響もこの変動が関わっている。そこでローリングシャッターの影響を軽減するには大気揺らぎを n ステップ、もしくはそれよりも前ステップの大気揺らぎの情報を使って $n + 1$ ステップ目の大気揺らぎを予測するアルゴリズムを考える必要がある。図に今回の考察をまとめる。最初にグローバルシャッターのシミュレーションの結果示す

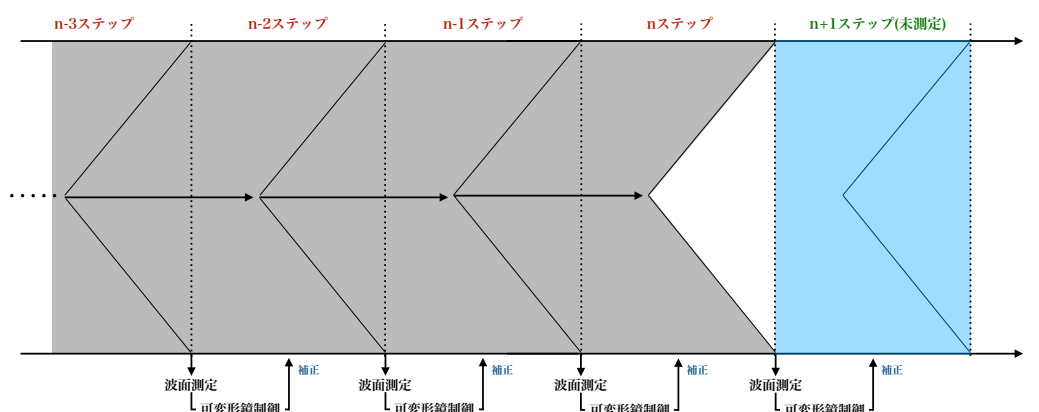


図 6.1 リアルタイム制御の流れを示した図。波面測定から可変形鏡の制御に至るまでの遅延時間を無視すると、波面測定で得られた波面は次のステップの大気揺らぎ(点線で仕切られた範囲)を補正することになる。n ステップで測定した波面が補正を行う波面は n+1 ステップの波面であるが temporal error とローリングシャッターのエラーを軽減するためには n+1 ステップの大気揺らぎを n ステップ、それ以前の大気揺らぎの情報を使って予測を行う。

本研究は単純な方法として n ステップの波面と n-1 ステップの波面の変動から n+1 ステップの大気揺らぎの予測を試みた。n-1 ステップと n ステップ SHWFS 像の輝度値の変動を波面の変動として n ステップの SHWFS 像からその分変動させて n+1 ステップの SHWFS 像を予測する。

n-1 ステップの SHWFS のフレームにおいて i 番目のピクセルの輝度値を I_i^{n-1} とすると i 番目のピクセルの n-1、n ステップ間の変動は

$$dI^n = I_i^n - I_i^{n-1} \quad (6.1)$$

である。この変動量を n ステップの波面にそのまま適用することで n+1 ステップの SHWFS 像を予測した。

$$\begin{aligned} I_i^{n+1} &= I_i^n + dI^n \\ &= 2I_i^n - I_i^{n-1} \end{aligned} \quad (6.2)$$

この手法を用いて n+1 の SHWFS 像を作成し、波面再構成を行い n+1 ステップの大気揺らぎの波面との残差 RMS を求め 5.1 章と 5.2 章の結果と比較した。

6.2 実装結果と考察

6.1 章のアルゴリズムを実装した結果を示す。

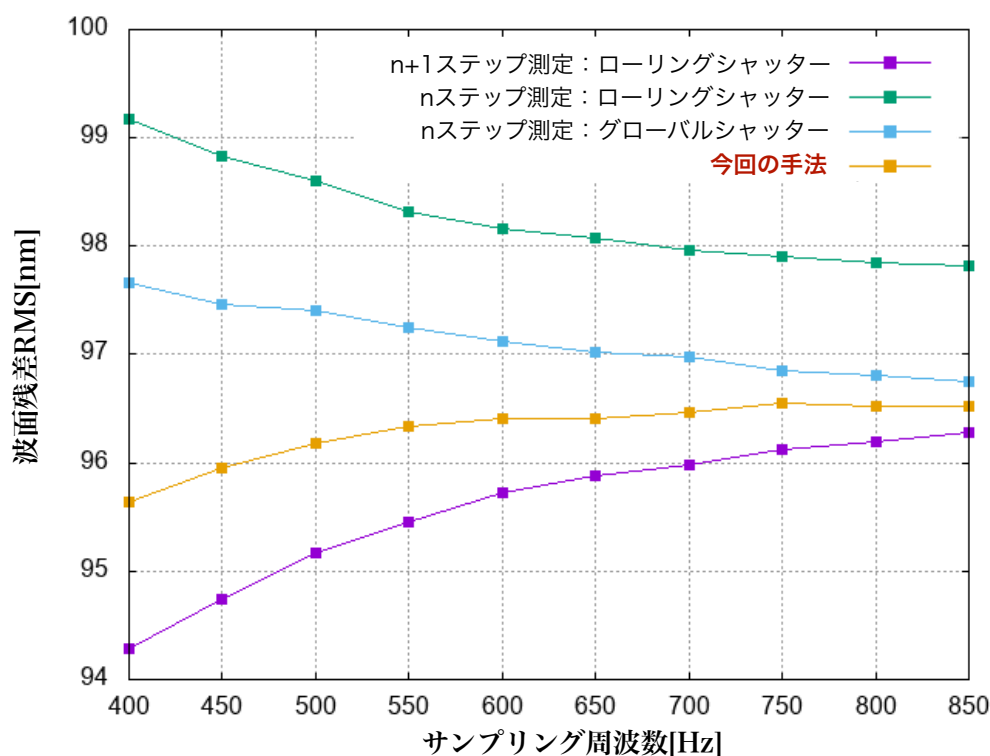


図 6.2 実装を結果を示した図。オレンジ線が 6.1 章でのアルゴリズムの結果である。比較のために水色線に n ステップのグローバルシャッターで得られた SHWFS 像を測定量とした場合、緑線に n ステップのローリングシャッターで得られた SHWFS 像を測定量とした場合、紫線に $n+1$ ステップのローリングシャッターで得られた SHWFS 像を測定量とした場合を示す。今回の手法は $n-1$ 、 n ステップのローリングシャッター像から $n+1$ ステップ像を予測しているので紫線の RMS の値が目標値である。

今回の手法を実装した結果、 n ステップのローリングシャッター、グローバルシャッターそれぞれを測定量とした場合に比べて波面残差が小さくなり、測定精度が向上する結果となった。大気揺らぎの変動は frozen flow を仮定しており、大気揺らぎは各高度の層でパターンを変えずに望遠鏡開口に対して平行に移動していると仮定している。この実装結果から大気ゆらぎが frozen flow の仮定を満たしている場合に $n-1$ 、 n ステップの SHWFS 像の情報から $n+1$ ステップの SHWFS 像を予測することがある程度可能であるという結果になった。しかし実際の大気揺らぎは無数の層を仮定しており本シミュレーションで大気揺らぎを 7 層とおいていることを考慮すると、現実と比べてかなり単純化していると言える。

また $n+1$ ステップのローリングシャッターで得られた SHWFS 像を測定量とした場合 (図中紫線)、サンプリング周波数を低くすると (可変形鏡の更新頻度下げる) 波面残

差 RMS が小さくなるという結果が得られた。紫線で示した残差は temporal error が無視できるため、fitting error とローリングシャッター読み出しによるエラーのみが残差に寄与する。しかし図 5.13 にあるように各 fitting error とローリングシャッター読み出しによるエラーの大きさはサンプリング周波数によらずほぼ一定の値をとるので紫線の振る舞いは図 5.13 の前提を考慮すると不自然である。

そこで6章の結果を得るために取得した SHWFS 像の大气を変動させていった時の大气の変動回数に対する fitting error の振る舞いを確かめた。

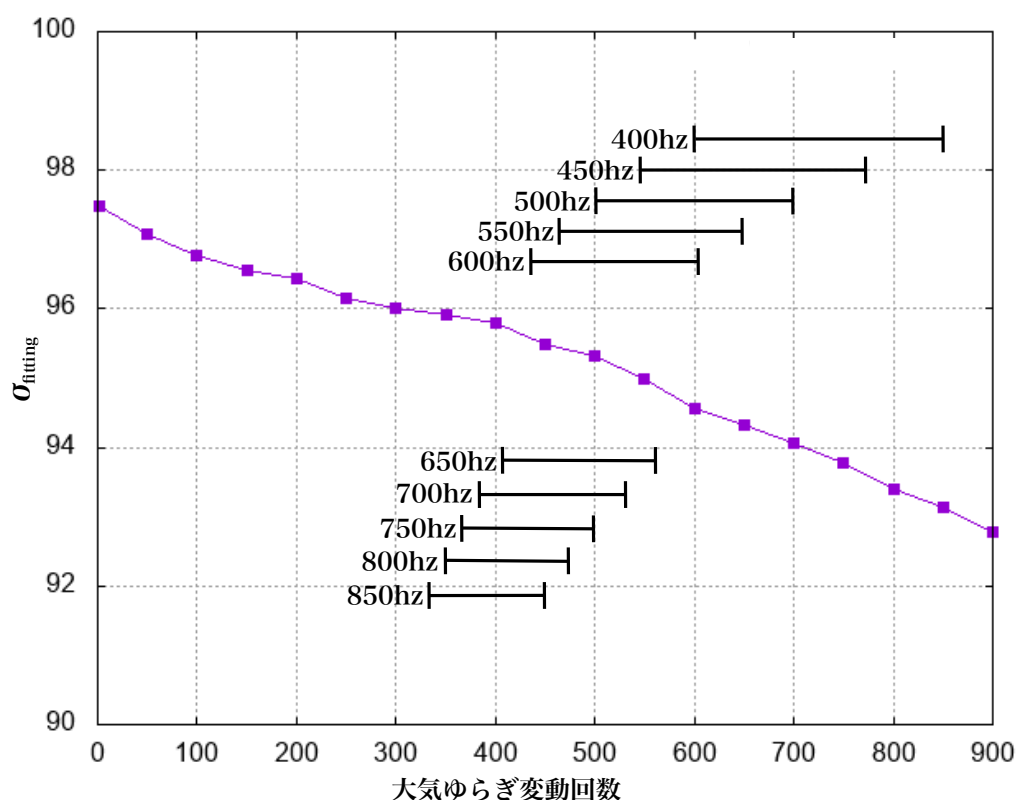


図 6.3 横軸に大气ゆらぎを変動させた回数、縦軸に fitting error を示した図。図中の周波数の幅は図 6.2 の各周波数における紫線の結果の計算に用いた $n+1$ ステップのフレームの領域を示している。

図 6.3 は横軸に大气ゆらぎを変動させた回数、縦軸に fitting error を示した図である。このグラフから大气ゆらぎを変動させていくにつれて fitting error が小さくなる振る舞いが見られる。図中の各周波数は図 6.2 におけるサンプリング周波数に対応しており、その幅は $n+1$ ステップにおける SHWFS 像の足し合わせと大气ゆらぎの波面の平均の計算に使用したフレームの領域を表している。周波数が低くなると fitting error が比較的小さいフレーム同士を足し合わせや平均をとっているのによって図 6.2 に置いて周波数が高い場合よりも周波数が低い場合で波面残差が小さくなっていると考えられる。

今回の手法によって得られた角周波数における残差 RMS の振る舞いも大気ゆらぎ変動回数に対する fitting error の振る舞いの影響から周波数が低くなるにつれて残差 RMS が低くなっていると考えることができる。

第 7 章

まとめ

本研究ではすばる望遠鏡の新しい補償光学装置であるレーザートモグラフィ補償光学装置 (LTAO) の開発の中で LTAO に使用される CMOS カメラのコンピュータによる制御を行い性能評価を行った。その結果、読み出し同期モードと呼ばれる外部からのトリガ制御が 200×200 画素で 800Hz 以上の FPS を達成し、2 台同時制御の結果でも十分にデータ同期性が保たれている結果となり、LTAO において最適なモードであることが評価できた。また CMOS カメラに特有のローリングシャッター読み出しの評価を行ったところ、一枚のフレームのなかで中央の行から両端に向かって露光と読み出しのタイミングが異なっており $N \times N$ 画素に対して最大で $0.00972 \times N/2(\text{ms})$ のタイミングのずれがあり、画素数に応じてズレ量が大きくなる結果が得られた。

このタイミングのずれはリアルタイム補償光学において波面測定精度に影響を及ぼすと考えられる。そのため OOMAO と呼ばれる AO シミュレーションを用いてグローバルシャッター読み出しの場合とローリングシャッター読み出しの場合でサンプリング周波数 $400 \sim 850\text{Hz}$ の範囲で波面測定精度を評価した。その結果ローリングシャッターによるエラーが fitting error と temporal error に比べて小さい値を示し、またサンプリング周波数によらずほとんど一定に振る舞い大気変動の時間スケールによることがわかった。またローリングシャッターエラーの原因を考察した結果、ローリングシャッターで補正ループを回す場合ではグローバルシャッターで補正ループを回す場合よりも昔の大気の情報 SHWFS 像に含み、補正を行う大気ゆらぎに近い領域の一部が SHWFS 像の測定量に含まれていないことが挙げられる。そのためローリングシャッターエラーを軽減するためには測定量に含まれていない領域を測定量に加えなければならない、また測定されていない大気ゆらぎの波面を予測する必要があると考えた。そこでまだ測定されていない大気ゆらぎの波面をそれよりも数ステップ前に測定された SHWFS 像の輝度の変動量から線形的に外挿することで予測ができると考えた。図 6.2 の結果からこの手法によりシミュレーションで作成された大気ゆらぎ

の環境においては予測がある程度可能であるということが示すことができた。

このシミュレーションを通して考察されていないパラメータに読み出しノイズが挙げられる。本研究における読み出しノイズは全くないものとして扱っている。読み出しノイズは露光時間が短い場合やフォトン数が小さい場合で SN 比が悪くなるため、波面測定精度が悪くなる (Akiyama[3])。しかしローリングシャッターエラーはサンプリング周波数に依存せず検出器の画素数と大気変動の時間スケールにのみ依存するので、ローリングシャッターエラーのみの大きさの評価には読み出しノイズの有無は影響ないと考えられる。

また本シミュレーションでは一つの CMOS カメラのみで波面測定精度の影響の評価を行っているので、4つの波面情報を使ってトモグラフィー推定を行う LTAO におけるローリングシャッターエラーの影響も評価できていない。本シミュレーションから波面測定誤差全体に対するローリングシャッター読み出しによるエラーは小さい結果となったのでトモグラフィー推定を行う際の波面推定誤差全体に対するローリングシャッターの寄与は小さいと予想できるがトモグラフィー推定におけるローリングシャッターエラーの定量的な評価を行うことが求められる。

謝辞

まず本研究を進めるにあたり、3年間ご指導いただきました秋山正幸教授に心より感謝申し上げます。海外出張などの貴重な経験をさせて頂いたことにも深く感謝いたします。また国立天文台ハワイ観測所大野良人助教授をはじめ、ゼミを通して多くの方々にアドバイスや知識をいただきました。この場をお借りして感謝申し上げます。また天文学専攻で4年間学び、支えあった同期のみなさんをはじめ研究室の諸先輩方や後輩の皆さん、そして研究を応援してくれた家族にも心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Hamamatsu.2015 “Orca Flash 4.0 v2 技術資料”
- [2] Julija Zvavlav. 2010. “ADAPTIVE OPTICS ON GROUND-BASED TELESCOPE” *University of Ljubljana : Faculty of Mathematics*
- [3] Akiyama. 2017“ULTIMATE-START:Subaru Tomography Adaptive optics Research experiment Scope,Overview,and Schedule”
- [4] S.G.Els,T.Travouillon. 2009. “Thirty Meter Telescope Site Testing VI:Turbulence Profiles” *Publication of the Astronomical Society of the Pacific,121:527-543*
- [5] T.Travouillon,S.Els. 2009. “Thirty Meter Telescope Site Testing VII:Cohenece Time” *Publication of the Astronomical Society of the Pacific,121:787-796*
- [6] 竹村裕夫.2008. “CCD.CMOS カメラ技術入門” コロナ社
- [7] 相澤清晴、浜本隆之.2012 “CMOS イメージセンサ” コロナ社:映像情報メディア基幹技術シリーズ9
- [8] Steven J.Meller “The Method of Least Squares” *Mathematics Department,Brown University*
- [9] 家 正則. 2012 科学研究費補助基盤研究 ‘(s) 研究成果報告書”レーザーガイド補償光学系による銀河形成史の解明”
- [10] 黒田 隆男. 2014 映像情報メディア学会誌 Vol. 68, No. 3, pp.216 222”CMOS 撮像デバイスの基礎”
- [11] John W.Hardy. 1998 OXFORD SERIES IN OPTICAL AND IMAGING SCIENCE ”Adaptive Optics for Astronomical telescopes”
- [12] R.Conan, C. Correia ”Object-Oriented Matlab Adaptive Optics Toolbox”
- [13] R.Conan 2013 ”Adaptive Object-Oriented Matlab Adaptive Optics User Guide”

- [14] Andreas Quirrenbach "The effects of Atmospheric Turbulence on Astronomical Observations"
- [15] H. Ono, M. Correia. 2016 "Statistics of Turbulence Parameters at Maunakea using multiple wave-front sensor data of RAVEN"
- [16] Peter L. Wizinowich, David Le Mignant, Antonin H. Bouchez, Randy D. Campbell, Jason C. Y. Chin, Adam R. Contos, Marcos A. van Dam, Scott K. Haptman, Erix M. Johansson, Robert E. Lafon, Hilton Lewis, Paul J. Stomski, and Douglas M. Summers, 2006. "The W.M.Keck Observatory Laser Guide Star Adaptive Optics System: Overview"
- [17] Keck Observatory. Keck I And Keck II Telescopes.
<http://www.keckobservatory.org/about/telescopes-instrumentation/>
- [18] S. Esposito, A. Riccardi, E. Pinna, A. Puglisi, F. Quiros-Pacheco, C. Arcidiacono, M. Xompero, R. Briguglio, G. Agapito, L. Busoni, L. Fini, J. Argomedo, A. Gherardi, G. Brusa, D. Miller, J. C. Guerra, P. Stefanini, P. Salinari, 2012. "Large Binocular Telescope Adaptive Optics System: New Achievements and perspectives in adaptive optics"
- [19] Gemini Observatory.Instruments.
<https://www.gemini.edu/sciops/instruments/>
- [20] NASA. NIRspec IFU spectroscopy.
<https://jwst-docs.stsci.edu/display/jti/nirspec+ifu+spectroscopy/>
- [21] Mariko Kubo, Masayuki Tanaka, Kiyoto Yabe, Sune Toft, Mikkel Stockmann, and Carlos Gomez-Guijarro,2018. "The Rest-Frame Optical Sizes of Massive Galaxies with Suppressed Star Formation at $z\sim 4$ "
- [22] Andrew M. Hopkins, John F. Beacom, 2006. "On The Normalisation of The Cosmic Star Formation History"
- [23] A.C. Fabian, 2012. "Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback"
- [24] A.N.Kolmogorov, 1941. "Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence"