

# 乱流監視：安全距離から カラシニコフ銃を見つける方法

グレブ・ヴドヴィン、ミハイル・ロクテヴ、オレグ・ソロヴィエフ

乱流大気を通じた撮像は1つの技術だけでは不可能だが、適応光学、システムパラメータの実時間適応、多重化画像処理、実時間処理などを組み合わせると、改善された画像の取得が可能になる。

長距離監視は軍用、安全、航法などへの数多くの応用がある。最近のニュースでは、危険が発生する可能性からは遠い時点で、疑わしい人物が手にしているのがカラシニコフ接近戦用ライフルかそれともボートのオールなのかの識別がとくに重要になった事例がある。

直感的に言えば、この問題は容易に解決できそうだ。確かに、今日の物理学は口径50cmの望遠鏡が1kmの距離にある1mmの蚊を発見できると教えている。しかし、しばしば起こることだが、より大きな物体、例えば、遠距離のりんご、小火器、人の顔などは今でも識別が難しい。

これらの画像の解像力は乱流により制約される。コルゴモロフ乱流モデル

によると、太陽放射は広い面積で吸収され、大規模な熱気流を発生する。この熱気流はいくつかの小さい旋風や渦流として散らばり、この過程は温度差が最終的に一様となり、内部スケールと呼ばれる状態になるまで続く。

空気中の屈折は温度に依存するため、乱流中の屈折率の不均一に変化する分布は光学的にはぼやけたベールとなり、鋭い結像を妨げる。ほとんどの熱交換は地面に近い場所で起こるため、より強い光学的乱流は境界層、つまり地上からわずかに数百メートルの高度で観測され、さらに強い乱流は太陽光に直に曝露される領域に生じる。

乱流を通過する撮像の特性評価は、一般に単一パラメータ $r_0$ を用いて行わ

れる。このパラメータは乱流条件下でも回折限界に近い結像が得られる最大開口サイズで定義される。天文学の場合、地表からの観測が大気の比較的薄い乱流層を通して行われると、通常の $r_0$ は5から50cmまでの値になる。しかし、太陽が明るい水平方向の撮像の場合は、比較的短い1km程度の観測距離であれば、数ミリメートルの $r_0$ が容易に得られる。

典型的な水平方向の撮像は、一般に開口と物体の両方のサイズが $r_0$ に比べるとはるかに大きい(図1)。異なる物体点から放射された光束は乱流の異なる領域を通過し、異なる物体点の位相分布が統計的に相関のないアニソプラナティズムと呼ばれる状態になる<sup>(1)</sup>。

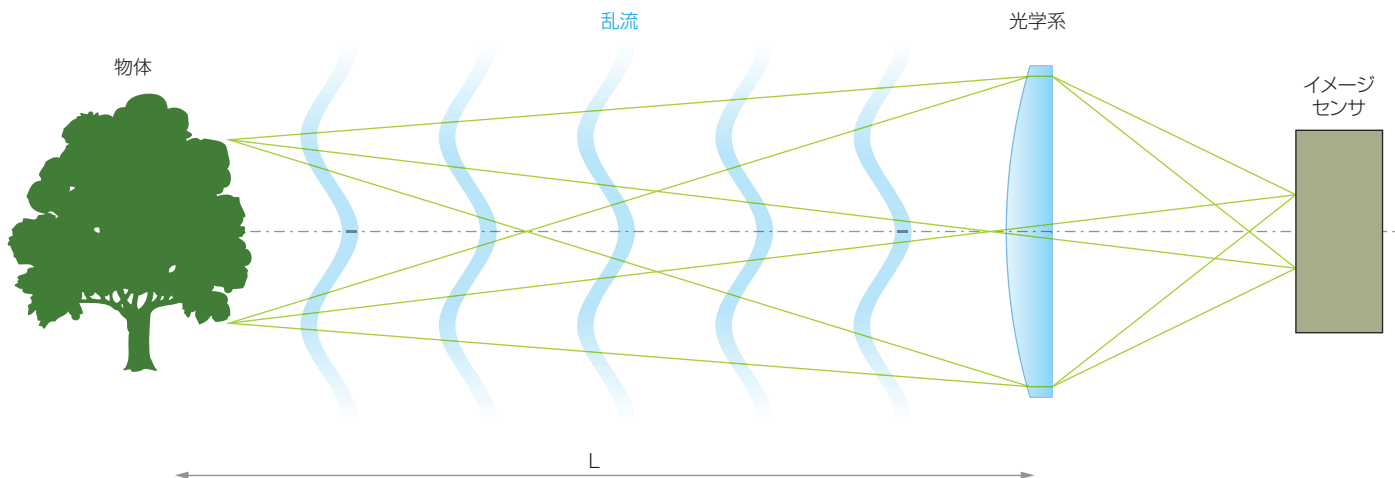


図1 水平方向の乱流を通じた撮像は物体の異なる点から放射された光束が乱流の異なる領域を通過し、物体の異なる点に対して統計的に補正されていない位相歪みをもたらす。

このような場合の歪みは、 $L$ を物体までの距離にすると、 $r_0/L$ のオーダーをもつ小さいアイソプラナティック角、つまり軸外収差の寄与が一定と見なされる角度の範囲内でしか相関しない。また、アイソプラナティック結像の面積はアイソプラナティックパッチと呼ばれる $\sim r_0$ の寸法になる。

開口近傍のすべての光束は同一の乱流領域を通過し、この領域から生じる波面歪みはアイソプラナティックと見なすことができる。この状況をさらに複雑にするのは、乱流から生じたすべての波面歪みが開口に到達しないことにある。遠方場のアイソプラナティックパッチは光学系による解像が不可能になり、乱流は幾何学的歪みを引き起こし、さもなければ鮮明な画像にゆがみをもたらす。

## 収差補正

適応光学 (AO) は動的な光学収差を補正する第一の技術として選択される。AO はアイソプラナティック収差への直接適用、光学系それ自体への導入、乱流がアイソプラナティックな場合の開口近傍への導入などを用いて行われる。

AO システムの制御には位相共役と最適化の2つの方法がある。位相共役による波面測定は明るい点状の光源が必要になる。天文学の場合、このことは実際の恒星または人工的なガイド星を使うことで満足される。残念なことに、水平方向の撮像の場合、このことは物体が観測者にとって光学的に点状の参照物体になるときしか満足されない。参照の問題は選択された物体形状の相関追跡によって解決されるが、正確な探測を行うには、形状サイズはアイソプラナティックパッチよりも小さいことが要求され、また、アイソプラナティックパッチは光学系を用いた解

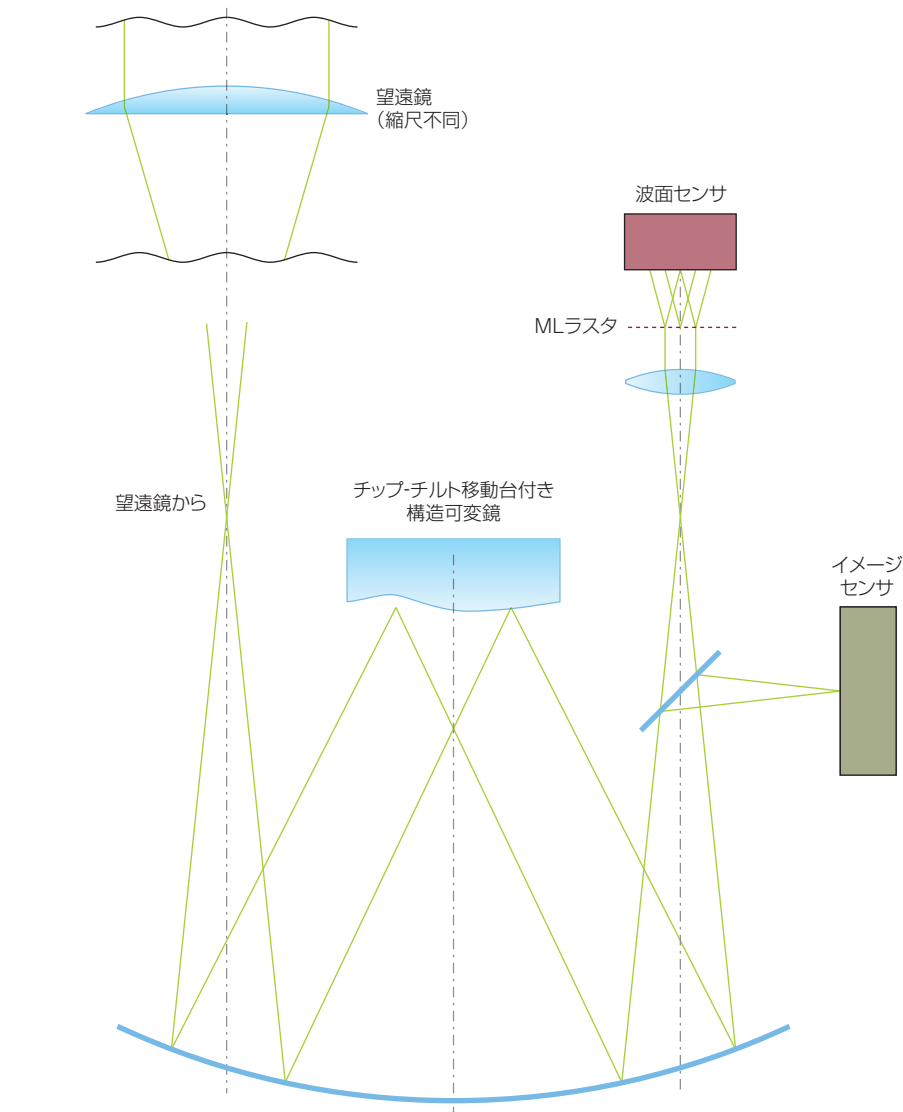


図2 小型望遠鏡に搭載する乱流補正用の可搬型AO装置が水平方向の撮像のために設計された。

像が必要になる。これは使用可能な手段の制約条件になる。

代替法としての最適化は画像の品質指標、例えば画像の鮮明度を最大にする波面補正装置の形状を実時間で試行錯誤的に探測して行われる。この方法は特殊な参照をまったく必要としないが、実時間での最適化は非常に高速の波面制御と探測画像の毎秒数万フレームとは限らない非常に高速のレジストレーションとを組み合わせることが必要になる。カメラのフレーム速度はカメラの感度と利用可能な光の制約を受

けるため、実時間最適化の適用は多くの場合、非常に明るい光源などが利用できる場合に限られる。

物体サイズが大きく乱流が強ければ、アイソプラナティック補正の可能な部品の影響力は無視できるほど小さくなり、AOの性能は付加される余分な複雑さを正当化できなくなる。AOの性能は物体の単点から発生する波面だけを補正し、「中心窩(ちゅうしんか)」と呼ばれる結像(中心窩は鮮明な画像を生成する網膜の一部)を実現することで改善される。

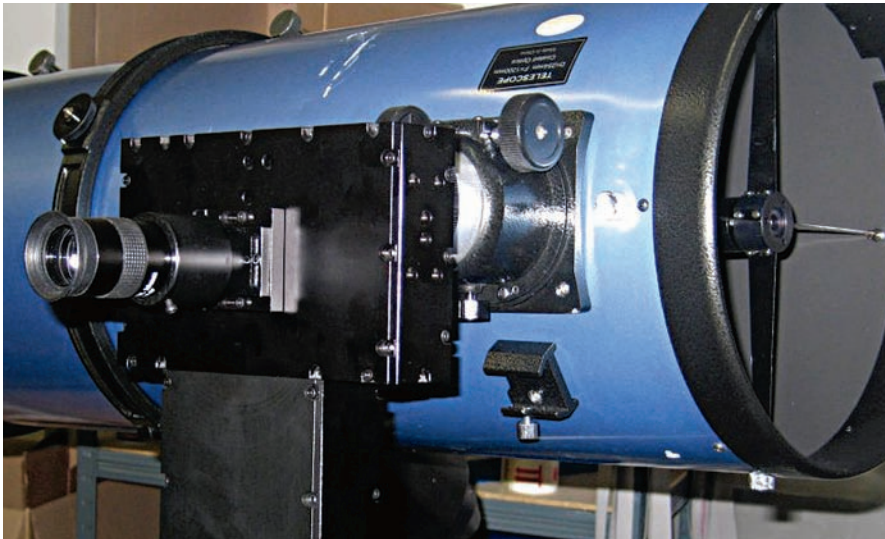


図3 水平撮像用の可搬型OKO適応光学系が10インチ望遠鏡に実装されている。

一般的に言えば、中心窩AO補正はアイソプラナティックパッチの外側に残留する像の収差と不鮮明さを増幅する。さらに、アイソプラナティックパッチのサイズは光学系の解像限界よりも小さくできるため、AO補正は基本的に不要になる。

理論的に言えば、広い視野のAO問題は大気の大規模な屈折率分布と共役関係にある多重共役(大きな)補正装置を使用することで解決できる。しかし、現在のところ、著者らはこのような補正装置に関する情報を持っていない。仮にそれがあったとしても、大規模な

位相制御は非常に難しい技術的問題をもたらす。

### システム設計

われわれは図2に示すような小型望遠鏡に搭載できる乱流補正用の可搬型AO装置を設計した。この設計は修正オフナー配置の色消し鏡が望遠鏡の瞳面をOKO可変構造鏡に再結像して大気乱流による収差を補正する。OKO鏡は取付けられたチップ-チルト移動台を組み合わせて、3次までのゼルニケ項を補正し、画像シフトを補償する。

ハルトマン-シャック波面センサと組

み合わされた完全なAO装置を10インチのニュートン望遠鏡に実装し、位相共役または画質を実時間で最適化するOKO FrontSuferソフトウェアの最適化モードを用いて、このAO装置を制御した(図3)。

AOは大気乱流の広視野補正の能力に制約があり、不可能な場合もあるため、その他の増強された大気補正撮像法も大きな関心を集めている。その代替法の1つは補正なしで取得した大気乱流の多数の画像を計算機処理する補正にもとづいている。この方法は変化しない物体と変化する物体との相違を求めて乱流の影響を緩和する。

補正しない入力画像を得るには、画像フレーム間への遅延の導入や光学系の瞳の分離を用いて乱流光路差による多重画像を生成し、乱流大気をさまざまに生成することが必要になる<sup>(2)</sup>。この多重瞳によるシステムは多数の画像が同時に登録されるため、移動物体の実時間撮像が可能になる。他方、単一の瞳の時間多重化撮像はパイプライン遅延をもたらし、移動物体を扱うことができない。図4は3種類の多重開口光学系の相違を示している。

その直接的な方法(a)は多数の同一光学系を配置する。

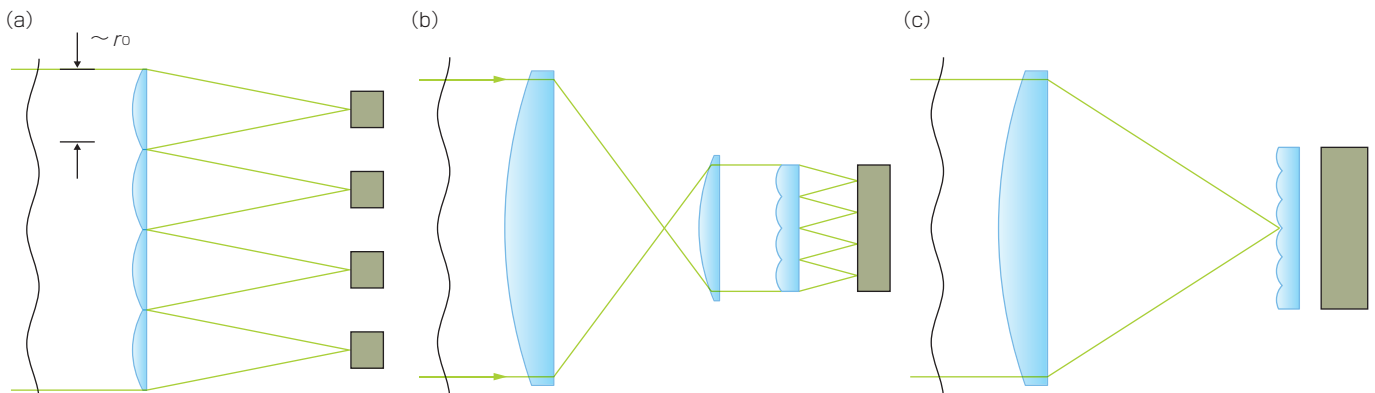


図4 多重開口画像処理用の3種類の配置を示している。(a)の直接方式は同一の多数の光学系を配置する。(b)は瞳像のラスト位置にあるマイクロレンズを使用し、異なる乱流光路を通して取得した画像場を多数の異なる画像に分離する。(c)はセンサを用いて登録した4D光学場から異なる乱流光路の通過画像を取得できる。

瞳を多重化する方法 (b) は瞳像のラスタ位置にあるマイクロレンズを使用し、異なる乱流光路を通して取得した画像場を多数の異なる画像に分離する。

プレノプティック光学系 (c) はセンサを用いて登録した4次元光学場から異なる乱流光路を通過した画像を取得できる。

いずれの場合も、サブ開口のサイズは  $r_0$  と同等に保持され、乱流の変化に追従しなければならない。このことを (a) と (c) の配置はズームレンズを使用して実現し、(b) の配置では瞳のマイクロレンズアレイを変えて実現する。

多重フレーム処理法には遠方場の画像歪みと画像湾曲に適用できる多数の方法があり、その多重フレーム選択画像融合法にはさまざまな方式がある<sup>(3)</sup>。また、デコンボリューション法は位相歪みに適用できる。デコンボリューション法にはブラインドデコンボリューション、波面センシングからのデコンボリューション、ノックス-トンプソン法、バイスペクトル画像処理、凸面体への投影にもとづく各種スペクトル画像処理などが含まれる<sup>(4)</sup>。多重フレーム処理法は方式に関係なく以下の条件を満足しなければならない。

入力瞳面は  $1 \dots 5r_0$  の範囲が必要になる。この範囲は開口と乱流を含めた光学系の最適解像力をもつ「幸運な」画像を取得できるかなり高い確率が得られる。

補正のない多数の画像を取得し、多重フレーム処理を行って、乱流の影響を緩和する必要がある。これらの画像の取得は時間多重化または空間多重化が使われる。

実際のところ、小さい開口を使うと、アイソプラナティックパッチを観測できるサイズは理論による予測よりもはるかに大きくなるが、それは開口を制

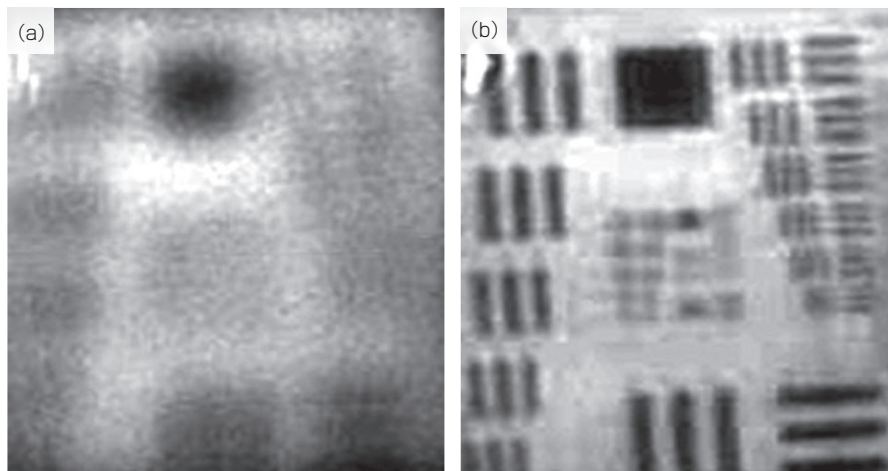


図5 このUSAF解像力チャートは距離2kmの中程度の乱流条件下において、適応光学系と多重化画像処理を組み合わせで取得された。(a)は取得された原画像、(b)は凸面装置への投影にもとづく多重フレーム処理を用いて再構成された画像を示している。

限すると、異なる物体点から生成される2つの収差間の最大位相差も制限されることによる。

センサの画素サイズが固定されている場合は、システムの開口と焦点距離を可変状態に適応制御して、それらを乱流尺度の  $r_0$  に比例させる必要がある。

## 合成法

乱流は強いほど画像を不鮮明にするが、適応制御を行うと、光学系の解像力は撮像条件下の擬似最適距離に対して維持される。図5は中程度の乱流のある2kmの水平光路の条件下で実験された適応光学と多重化画像の組み合わせから得られた解像力チャートを示

している。

われわれの結論は大気乱流のある水平方向の撮像の問題を解決できる単一技術はないということだ。この問題は適応光学、瞳サイズや焦点距離などのシステムパラメータの実時間制御、多重化画像処理、デジタル画像処理などを組み合わせる合成法を用いることでかなりの解決が可能になる。

この方法を用いると、良好な画像を瞬間的に取得できる確率は顕著に高くなるが、完全な画像の取得を時間に関係なく、とくに乱流が強くても保証できる方法は存在しない。これらの方法はいずれもさらなる開発と改良の余地がある。

## 参考文献

- (1) D.L. Fried, "Anisoplanatism in adaptive optics," J. Opt. Soc. Am., 72, 52-61 (1982).
- (2) M. Loktev, O. Soloviev, S. Savenko, and G. Vdovin, "Speckle imaging through turbulent atmosphere based on adaptable pupil segmentation," Opt. Lett., 36, 14, 2656-2658 (July 2011).
- (3) M.A. Vorontsov and G.W. Carhart, "Anisoplanatic Imaging through turbulent media: image recovery by local information fusion from a set of short-exposure images," J. Opt. Soc. Am. A, 18, 6, 1312-1324 (2001).
- (4) A. Pakhomov and K. Losin, "Processing of short sets of bright speckle images distorted by the turbulent earth's atmosphere," Opt. Comm., 125, 5-12 (1996).
- (5) D. L. Fried, "Probability of getting a lucky short-exposure image through turbulence," J. Opt. Soc. Am., 68, 12, 1561 (1978).

## 著者紹介

グレブ・ヴドヴィン (Gleb Vdovin) はオランダのフレキシブルオプティカル社 (Flexible Optical) の部長、ミハイル・ロクテフ (Mikhail Loktev) とオレグ・ソロヴィエフ (Oleg Soloviev) は同社シニア・アソシエイト、e-mail: gleb@okotech.com; www.okotech.com.