

## 学位論文題名

ブラインドデコンボリューション法による  
大気ゆらぎ劣化した天体像の回復

## 学位論文内容の要旨

地上からの天体像観測においては、大気ゆらぎの影響によって、望遠鏡に到達する天体からの波面がランダムに揺らいでしまい、ある瞬間の点状分布関数 (PSF) が数秒角の広がりを持つ斑点状 (スペックル) パターンとなってしまう。この結果、このスペックル像の空間的広がりが、可視域から赤外での観測における望遠鏡の分解能を規定し、どんな大口径の望遠鏡を用いても分解能は改善されないことになる。このように、望遠鏡の本来持つ能力を発揮できないことは、わが国においても 8メートル望遠鏡の建設が進む現在、重要問題であり、それを克服する方法の開発が緊急の課題となっている。

地上から観測される天体像は、未知関数である天体像強度分布と、大気揺らぎと望遠鏡を含めた系のPSFとのコンボリューションとなっていることが知られている。しかしながら、大気の状態が時間と共に変動するためPSFも変化し、天体観測におけるPSFは一般に未知である。このような観測像からの天体像の回復には、コンボリューション像のみから二つの未知関数を再生するブラインドデコンボリューション (BD) 法が適用できる。BD法を使用する利点は、被観測天体以外の情報が不必要で観測効率が向上すること、1枚以上の任意のフレーム数で適用可能なため天体像の動的な解析が容易となることである。

BDを実行する一つの方法として、1988年にAyersとDaintyが一般的な画像に適用可能で効率的なアルゴリズムを持つ反復BD法を提案した。しかしながら、反復BD法においては、アルゴリズムの収束性や得られる解の一意性について明確でないために、再生像の信頼性があまり高くなかった。そこで、本論文では、特に大気ゆらぎによって劣化した天体像の回復のために、AyersとDaintyによる反復BD法を改良、発展させた幾つかの方法を提案している。また、計算機シミュレーションによって提案した各方法の性能を検証し、さらに実観測データへの適用を通して、天体像回復の可能性を実証している。本論文は全10章から構成されている。

第1章は序論であり、BDに関する研究の動向と、高空間分解能結像法の現状について概説し、本研究の目的について述べている。

第2章では、本研究の理論的背景を記述している。まず、大気揺らぎを通した天体像の結像について述べた後、従来の高空間分解能結像法を概説している。次に、AyersとDaintyによって提案された反復BD法について、アルゴリズムの性質、特徴を詳説している。また、天体像のBDの可能性について議論し、天体の回折限界像の再生が常に可能であることを述べている。最後に、Z変換とゼロシート概念を用いてBDの意味を明かにしている。

第3章では、二重星と太陽表面の高空間分解能化の天文学的意義について述べている。

第4章では、自己相関法と反復BD法の併用による二重星像の回復法を述べている。この方法においては、まず自己相関法によって二重星の推定像を求め、その推定像を反復

BD法の初期推定として使用する。回復像の評価方法として、自己相関法からの出力像と、反復BD法からの出力像との相関を用いる方法を提案している。その像評価が平均自乗誤差とよい一致を持つことを実観測データを用いて示している。また、良いシーイング状態で撮影されたフレーム選択のための方法も提案している。これにより、像回復の成功率が改善されることを示し、フレーム選択の有効性を示している。実際の二重星スペckルデータに適用した結果を示し、それが天体スペckル干渉法による解析結果とよい一致を示すことを確認している。

第5章では、複数枚のフレームに逐次的に反復BDを適用することによって、二重星だけでなく広がった物体の回復を可能にする方法を提案している。また、第4章で導入した相関計算を用いた回復像評価法を複数フレームの場合に拡張している。この方法は、ある入力像について複数枚のフレームのBDから得られる複数個の出力像を平均し、次のBDへの入力とする、という処理を反復するもので、このような平均操作によって収束性が改善され、複数フレームの使用によって可能な解が限定されるという長所を持つ。しかし、回復結果が使用するフレームの順序に依存してしまい、その依存性を解消するためには多くの計算時間を必要とする。ここでは、計算機シミュレーションによって、広がった物体の回復が良好に行われることを示している。また、実際の二重星データに適用している。

第6章では、並列BD法を提案している。これは、第5章で述べた逐次型アルゴリズムを並列型に改良したもので、その結果計算効率が大幅に改良されている。また、複数フレームを用いたBDの概念がアルゴリズムの並列化によってより明らかになっている。計算機シミュレーションの結果、フレーム数が増加するにしたがって良好な像が得られることを確認している。さらに、二重星の観測データに適用し、二重星の高空間分解能像を回復している。この回復像から得られる二重星の角距離、位置角、等級差を従来法による結果と比較し、良く一致していることを示している。

第7章では、第6章で述べた並列BD法を天体像ばかりでなくより一般的な画像へ適用することを目的として、一枚のフレームへの適用を行っている。この方法は一枚の劣化像から複数枚の部分画像を切り出すことによって、人為的に複数枚の劣化像を作り出すことで、並列BD法の適用を可能にするものである。この結果、一枚のフレームのBDにおいても複数枚のフレームを用いたものと同様に、収束性および解の一意性が改善される。ただし、その切り出しに際してのしみ込み、しみ出しの効果によって、各部分画像においては厳密にはそのコンポリューション関係が満たされないという問題も生じる。ここでは、この効果の補正方法を述べている。計算機シミュレーションによって、しみ込みしみ出しの補正が良好に行われていることを確認している。また、本手法を太陽像に適用した結果を示している。

第8章では、適用対象を太陽粒状斑画像に制限し、複数フレーム処理と画像切り出し処理を組み合わせたBD法を提案している。この組み合わせによって、従来BDにおいて問題となってきた解の一意性やアルゴリズムの収束性などの問題点が解決できる。このため、定義した誤差関数を最小化することによって真の解が得られることを述べている。計算機シミュレーションによって、用いたフレーム数と切り出し枚数が多いほど良好な再生像が得られること、および誤差関数が必ず収束することを確認している。この方法を、実際に観測した太陽粒状斑画像に適用し、本手法の有効性を実証している。

第9章では、スペckル位相差からの天体像再生の方法を述べている。この方法は、多数フレームから得られるKnox-Thompsonスペckル位相に関して定義した誤差関数を最小化するような推定像を求めるものである。計算機シミュレーションと実データへの適用の結果から良好な像再生が行われたことを確認している。本手法はBD法ではないが、観測像以外の情報が不必要であるという点でBDと一致しており、BDとの結合が可能である。

ここでは、本手法とBDとの結合について提案し、その効果について考察している。  
第10章は本論文の結論であり、提案した各方法の特徴を総括している。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 田 中 啓 司

副 査 教 授 大 場 良 次

副 査 教 授 新 保 勝

副 査 助 教 授 馬 場 直 志

## 学位論文題名

### ブラインドデコンボリューション法による 大気ゆらぎ劣化した天体像の回復

地上からの天体像観測においては、大気ゆらぎの影響によって観測像が空間的に広がった劣化像となってしまう。この結果、その空間的広がりが望遠鏡の分解能を規定してしまい、どんな大口径の望遠鏡を用いても分解能は改善されないことになる。わが国においても8メートル望遠鏡の建設が進む現在、それを克服する方法の開発が重要な課題となっている。ブラインドデコンボリューション(BD)法は劣化像回復法の一つであり、天体像への適用に際して多くの利点を持つが、従来提案されていたアルゴリズムには収束性と解の一意性に関する問題点が解決されず残っていた。本論文は、大気ゆらぎ劣化した天体像の回復のため、BD法を改良、発展させた一連の研究成果をまとめたものであり、10章より構成されている。

第1章は序論であり、BD法に関する研究の動向と、高空間分解能結像法の現状について概説し、本研究の目的と意義を明かにしている。

第2章では、本研究の理論的背景を記述している。まず、大気揺らぎを通した天体像の結像について述べ、天体像回復にBD法が適用可能であることを示している。次に、従来提案されているBD法およびそれ以外の方法について、アルゴリズムの性質、特徴を詳説している。また、天体像のBDの可能性について議論し、天体の回折限界像の再生が常に可能であることを述べている。最後に、Z変換とゼロシートの概念を用いてBDの意味を明かにしている。

第3章では、二重星と太陽表面の高空間分解能化の天文学的意義について述べている。

第4章では、自己相関法と反復BD法の併用による二重星像の回復法を述べ、回復像の評価方法として、自己相関法からの出力像と、反復BD法からの出力像との相関を用いる方法を提案している。ここでは、実際の二重星スペckルデータに適用した結果を示し、これが従来法による解析結果とよい一致を示すことを確認している。

第5章では、複数枚のフレームに逐次的に反復BDを適用することによって、二重星だけでなく広がった物体の回復を可能にする方法を提案している。また、複数フレームの使用によって収束性が改善され、可能な解が限定されるという長所を持つことを示している。計算法シミュレーション

ョンによって、広がった物体の回復が良好に行われることを確認すると共に、実際の二重星データに適用し良好な結果が得られることも示している。

第6章では、第5章のアルゴリズムを並列型に改良した並列BD法を提案し、非常に効率的な計算が可能であることを示している。計算機シミュレーションによって、フレーム数が増加するに従い良好な像が得られることを明かにしている。さらに、二重星の観測データに適用し、回復された二重星の高空間分解能像から得られる二重星の角距離、位置角、等級差を従来法による結果と比較し、良く一致していることを確認している。

第7章では、並列BD法をより一般的な画像へ適用することを目的として、一枚の劣化像から複数枚の部分画像を切り出すことによって、人為的に複数枚の劣化像を作り出し、並列BD法の適用を可能にする方法を提案している。この方法では、一枚のフレームのBDにおいても複数枚のフレームを用いたものと同様に、収束性および解の一意性が改善されることを示している。また、その切り出しの際に生じてるしみ込み、しみ出しの補正方法も提案し、計算機シミュレーションによって、その補正が良好に行われていることを確認している。また、本手法を太陽像に適用し、良好な結果が得られることを示している。

第8章では、適用対象を太陽粒状斑画像に限定し、複数フレーム処理と画像切り出し処理を組み合わせたBD法を提案している。この組み合わせによって、従来問題となってきた解の一意性やアルゴリズムの収束性などの問題点が解決でき、誤差関数を最小化することによって真の解が得られることを明かにしている。計算機シミュレーションによって、用いたフレーム数と切り出し枚数が多いほど良好な再生像が得られること、および誤差関数が必ず収束することを確認している。この方法を、実際に観測した太陽粒状斑画像に適用し、本手法の有効性を実証している。

第9章では、スペクトル位相差データからの天体像再生の方法を述べ、計算機シミュレーションと実データへの適用の結果から良好な像再生が行われたことを確認している。本手法は観測像以外の情報が不必要であるため、BD法との併用が可能であり、本章ではその効果についても考察している。

第10章では、提案した各方法の特徴を総括すると共に、本研究が天文光学の分野に大きく貢献するものであることが結論づけられている。

これを要するに、著者は、BD法に基づく幾つかの新しい画像回復法を提案すると共に、実際に天体像の画像回復に適用してそれらの有用性を実証したものであり、天文光学と応用物理学の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。