

論文の内容の要旨

論文題目： 超解像技術によるシャックハルトマン
波面センサの精度向上に関する研究

氏名： 吉川 岳

本研究では光の波面歪みを計測する波面センサの 1 つであるシャックハルトマン波面センサに超解像技術を適用することで、従来と同じハードウェアを使用しつつ、従来よりも波面センシング性能を向上させる手法を提案し、数値シミュレーションおよび光学実験により提案手法の実証をした。

ハッブル宇宙望遠鏡に代表される宇宙望遠鏡は、すばる望遠鏡のような地上望遠鏡と異なる利点を持っている。大気の揺らぎによる影響がないこと、大気の窓に限定されず様々な波長での観測ができること、天候に左右されず定常的に観測が可能であることなどが挙げられ、これまで様々な科学的、実用的成果をもたらしてきた。しかし、宇宙望遠鏡は軌道上へ打ち上げる際、ロケットによる強い振動の影響で主鏡の歪みや光学系のミスアライメントが発生する可能性がある。ミスアライメントの存在する光学系を通過した光の波面は歪められ、波面収差が発生する。この波面収差の影響で CCD センサや CMOS センサなどの検出器上で得られる画像の高周波成分は失われ、画像から得られる情報が失われてしまう懸念がある。これに対して、従来は光学系を剛に設計し、打ち上げ前に精密にアライメント調整をするという設計思想で開発され、打ち上げ時の振動を模擬した試験を通して光学系のミスアライメントが許容範囲内に収まることを確認してきた。しかしながら、この設計思想では重量が過大になり、重量・寸法が大きく制限される小型衛星に、より大きな口径の望遠鏡を搭載することが難しい。また軌道上での宇宙機の修理は技術的・経済的に困難であるため、予期しないミスアライメントに対して有効な対策を取りえないという可能性がある。このような問題から、軌道上で任意に波面収差を補正する技術が望まれている。

一方、ハワイのマウナケア山にあるすばる望遠鏡や Gemini 望遠鏡等の地上望遠鏡では、補償光学技術を用いて大気の揺らぎによる波面収差の影響をキャンセルし、同望遠鏡の回折限界に近い分解能を達成している。補償光学とは、シャックハルトマン波面センサなどの波面センサで光の波面の歪みをセンシングし、形状を高速に変えられる可変形鏡で入射光を反射させることによって波面収差を相殺する技術である。

本論文は以下のような流れで構成される。

第 1 章では上記の研究背景について述べ、主に天文学で研究されてきた補償光学技術について、レーザーガイド補償光学、Gerchberg-Saxton Algorithm, Blind Deconvolution, Phase Diversity, Transverse Translation Diversity, Lucky Imaging など、ハードウェア・ソフトウェア両面から概観した。それを踏まえて、地上望遠鏡と軌道上の宇宙望遠鏡における環境の違いを考慮し、宇宙望遠鏡には波面センサとアクチュエータからなる補償光学システムが適していると結論付けた。その中で波面センサとして広く使用されているシャックハルトマン波面センサをとりあげ、以下のような現在の課題点を挙げた。波面収差の計測性能を向上させるためにマイクロレンズ口径をそのまま小さくする方法では、本来はミッションカメラに導光したい光エネルギーを波面センサにより多く割り当てなければならないこと、シャックハルトマンセンサが計測できる波面傾きのダイナミックレンジが比例して小さくなってしまふことを挙げ、このような課題を克服しつつ、シャックハルトマン波面センサの精度を向上させることを研究目的とした。

第 2 章では、研究目的を達成するために、デジタル画像処理の分野で研究されている超解像技術を通常のシャックハルトマン波面センサから得られる複数枚の画像データに適用することを提案した。超解像技術の原理についてまとめ、複数枚画像の位置合わせ・再構成処理という超解像技術の 2 つの手続きを適用するために、空間位相変調器でマイクロレンズを模擬する、もしくは piezo アクチュエータを使用してマイクロレンズを摺動部なしにサブレンズだけシフトした波面情報を含む画像を複数枚取得する方法を考案した。また再構成処理に関しては、高解像画像から低解像画像のモデル化は平均計算で表現可能であることを示した。これにより光エネルギーを利用したデジタル画像の超解像技術と同様の処理を、正負が存在する波面の情報を含む画像データでも適用可能であることを明らかにした。

本提案手法の特長は以下のとおりである。

- ・超解像のための複数枚画像の位置合わせ計算が不要

空間位相変調器でマイクロレンズを模擬する、もしくは piezo アクチュエータでマイクロレンズを摺動部なしにサブレンズの距離だけずらした画像を取得することで超解像の結果に大きな影響を及ぼし、また時間のかかる複数枚画像の精度良い位置合わせ計算が不要になる。

- ・従来の再構成手法の適用が可能

超解像における再構成処理に必要な高解像から低解像のモデル化に関して、本研究対象である正負の値をもつ波面の傾き情報を含む場合でも従来の光エネルギーと同じ平均計算で済むことを示した。従来の超解像に用いられる再構成処理の手法を適用できることが合理的に分かった。

- ・使用する光エネルギー量を維持

提案手法ではマイクロレンズの口径は維持されているため、ミッションカメラに割り当てる光エネルギーの量を従来のまま維持できる。

- ・センサのダイナミックレンジを維持

提案手法ではマイクロレンズの口径は維持されているため、波面の傾き計測のダイナミックレンジも維持されている。

- ・ミッションカメラのデータ信頼性を保証

超解像技術はあくまで画像処理による推定であり、真の映像を写しているとは保証されない。しかし、本手法はミッションカメラで取得した画像に適用するのではなく、センシングに使用するものである。波面を補正して得られる画像は画像処理をしていない真の画像であり、ミッションデータとしても信頼性のあるものといえる。

第 3 章では、波動光学に基づいてシャックハルトマン波面センサの定式化、提案手法の定式化などをし、数値シミュレーションによる検証を行った結果、以下のようなことが分かった。

- ・Zernike 係数をランダムに設定した 3 通りの模擬波面収差においていずれも波面推定性能が向上しており、提案手法の汎用性を確認できたこと。

- ・超解像処理によって模擬できる数のマイクロレンズで構成される高解像波面センサと比較して、同程度もしくはストレール比で最高 10 ポイント程度の性能向上が確認できたこと。

- ・超解像の枚数が 10 枚程度以下の時は対数的にセンシング性能が向上しており、推定波面補正後の PSF のストレール比において 95%程度が上限であったこと。

- ・再構成処理前の複数枚の画像データを用いて波面推定すると 1 枚の時と同程度もしくは悪化していたため、提案手法による波面センシング精度向上のためには再構成処理が必須であること。

- ・付随して、センシング性能の悪化に影響していた要因はデータ点数の不足ではなく、局所的な波面を計測できないことであったこと。

- ・波面収差が大きい場合、超解像の再構成処理の過程における繰り返し計算中に推定誤差が悪化することもあった。

- ・超解像処理後の波面の傾き誤差は x 方向、 y 方向共に同心円状に分布しており、特に開口内部の外縁部付近で相対的に大きかった。
- ・推定した波面を補正した後の PSF をサンプル画像で畳み込みしたところ、特に天体画像でより大きく画質の改善が感じられた。

第 4 章ではシャックハルトマン波面センサおよび空間位相変調器を用いた光学実験について述べる。この実験では、レーザーから出るコヒーレント光を遠方の点光源として瞳面の光波面をシャックハルトマンセンサでサブレンズだけシフトしながら、複数枚の画像を取得する。得られた画像に超解像処理をかけ、推定した波面収差をもとに位相変調器で波面補正をかける。最終的に、カメラで得られた点光源画像のストレーラ比をもとに提案手法の有効性について検証した。

第 5 章では本研究のまとめをし、今後の課題として以下の点を挙げた。

- ・より精度の高い、高解像から低解像へのモデル化

シミュレーション結果から、超解像処理後の波面傾き画像の誤差は同心円状に分布が存在していた。この原因を解明し、より精度の高いモデル化をすることで波面のセンシング性能を高めることができると考えられる。

- ・波面傾きデータ点数の削減

提案手法による波面センシング精度向上の要因はデータ点数の増加ではなく、より局所的な波面傾きを求めたこと、ということがわかった。しかし超解像処理ではより局所的な波面傾きを求める効果に付随して本来の目的である解像度の増加、データ点数の増加も起きてしまい、必要以上に再構成処理の計算時間が増大していることになる。今後はデータ点数が必要十分ながらも、より局所的な波面傾きを求める手法が求められる。

- ・より速い超解像処理アルゴリズム

本研究における提案手法では低解像波面センサの画像を複数枚取得したのちに超解像処理を行って波面推定精度を向上させた。しかし、例えば数値シミュレーションでは、25 枚画像を取得して再構成処理の後により波面を推定できることになる。また、必要な精度以上の枚数の低解像波面センサ画像を取得し、より時間をかけて計算した結果、オーバースペックになる可能性もある。そこで、低解像波面センサ画像を 1 枚取得する毎に超解像処理を逐次的に行うアルゴリズムの提案が考えられる。必要十分な精度を実現するまで波

面センサの画像を取得して超解像処理を逐次することで必要十分な計算時間も実現できるであろう。

本研究による成果は、軌道上で修理することが技術的、経済的に困難な宇宙望遠鏡に対して、予期しない光学系のミスアライメントを高精度に計測・補正し、宇宙望遠鏡の高信頼化に貢献することが期待できる。