

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：32685

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760766

研究課題名(和文)高精度の補償光学技術に基づくリモートセンシングにおける合成開口望遠鏡の研究

研究課題名(英文)Multi aperture telescope for remote sensing using high precision adaptive optics

研究代表者

宮村 典秀(Miyamura, Norihide)

明星大学・理工学部・准教授

研究者番号：50524097

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、小型衛星において、複数の望遠鏡を組み合わせ、仮想的な大口径望遠鏡を構築し、高い光学性能を実現することを目的として、合成開口望遠鏡の数学モデルの構築、デフォーミブルミラーのモデル化および制御手法、観測画像を用いた拡張Phase diversity法による波面推定、波面推定における人工衛星の軌道運動補整、合成開口望遠鏡に向けた補償光学実験システムの構築を行った。今後はこの研究の成果を、人工衛星搭載センサの開発に活用する予定である。

研究成果の概要(英文)：Multi apertures telescope is a solution for small satellites to realize large aperture telescope in orbit. Adaptive optics compensates not only wavefront aberration of a single telescope but also phasing error in multi apertures telescope. A deformable mirror controls the wavefront with hundreds of actuators. The control algorithm of the deformable mirror was proposed in this work. The applied phase diversity method estimates the wavefront aberration using acquired images instead of using wavefront sensors. We constructed adaptive optics experiment system, then acquired images of high contrast using the proposed methods.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：航空宇宙工学

キーワード：宇宙利用・探査 補償光学 人工衛星 リモートセンシング デフォーミブルミラー Phase diversity

1. 研究開始当初の背景

人工衛星による宇宙利用として、通信と地球観測の情報ネットワークが期待されている。地球観測で、より詳細な情報を得るためには、高空間・スペクトル分解能のデータが要求されるが、その結果、光学観測装置が大型化し、熱応力などによる光学系の变形によって光の波面歪が発生する。現在では、国際的な競争力を備えた商業利用や安全保障に向けて、このような厳しい条件下で、ほぼ理論限界の性能を出す必要に迫られている。また、詳細化され増大したデータを地上に転送するために、通信システム間の干渉が発生しにくく広帯域の通信が可能な光通信が注目されている。「宇宙開発に関する長期的な計画(平成15年)」では、地球観測衛星など低軌道周回衛星や惑星探査機からの大容量データをリアルタイムに受信可能な通信網の確立が記載されているが、その小型化とビーム指向制御に加えて大気擾乱の補正が重要な課題とされている。

このような光学系の実現には、これまでの静的なシステムではなく、軌道上で光学系の歪をオンラインで推定し光の位相を制御する動的システム(補償光学系)が必要である。近年、Phase diversity 法に代表される、観測画像データを用いた光波面推定が注目されている。この方法では、測対象とセンサ内の光路によらずすべての画像劣化要因を推定することができるため、光学系の劣化要因が未知の宇宙環境では特に有効である。しかし、複雑な画像処理が要求されるため、時々刻々変化する未知の観測対象に対して補償光学系を実現するためには、高速性と観測対象に対するロバスト性の実現が課題である。これまでに、点光源という事前情報が利用可能な天文観測への応用は、Hubble 望遠鏡で実証されており、2014年打ち上げ予定の JWST で展開鏡のアライメントに用いられる。一方、地球観測や光通信では、事前情報が得られないため、何らかの事前情報の付加と、複雑な収差推定問題を実時間で解くことが課題である。

このような、補償光学技術の究極の応用として、合成開口望遠鏡が注目されている。これは、SAR、フェーズドアレイアンテナと同様の原理で、距離を離れた複数の望遠鏡によって仮想的な大口径望遠鏡を構成するものである。電波による合成開口技術と異なり、光の位相を直接検出器で記録できないため、実現困難とされてきた。しかし、観測画像による高度な収差推定と、デフォーダブルミラーに代表される精密な波面制御素子によって、近年では実現の目途が立っており、Lockheed Martin 社の STAR-9、ONERA の MAOT など、大口径と小型軽量の両立を狙ったシステムが実験室レベルで開発されているが、非常に複雑で高価なシステムである。また、NASA の TPF、ESA の DARWIN など衛星のフォーメーションを利用した合

成開口望遠鏡も検討されているが、技術的困難さからまだ実現には至っていない。

本研究では、未だ日本では実現していない光学リモートセンシングにおける合成開口望遠鏡を実現、さらに将来的には、これを発展させた小型衛星群による軌道上での光学システムの構成を狙う。

2. 研究の目的

本研究の究極の目的は合成開口望遠鏡によるリモートセンシング技術の実現である。そのカギとなる要素技術として、高精度かつ実時間性を備えた波面推定と、デフォーダブルミラーを用いた高精度の波面制御を研究する。さらに、合成開口望遠鏡の実現のため、地上実験システムを構築し、実験を行う。

(1) 観測画像から光の波面収差を推定する機械学習手法の開発

デフォーダブルミラーを前提とした光の位相制御によって光学系に最適なアプリオリ情報を選択して付加する方法を研究し、波面収差推定を適切(well-posed)な逆問題に帰着させる。

SVM(サポートベクターマシン)に代表される回帰学習法を導入する。このとき、広大な波面収差のパラメータ空間から効率的に回帰学習を行うための能動学習の方法論を研究する。

画像はデータ量が大きいと、計算負荷が増加し実時間性の実現が困難になる。そこで、画像から低次元の波面収差の情報を特徴量として取り出す特徴量抽出法を研究する。

(2) 波面制御と機械学習の融合のための要素技術の研究

光の波面制御には高空間分解能、高速、さらに波長と偏光に依存しないことが求められる。これらの要求を満たすために、近年開発が進んでいるデフォーダブルミラー(Deformable Mirror)を用いた光学実験システムを構築し、回折効率の改善等の波面補償性能向上と制御方式に関する研究を行う。

また、これらの前提として膜型デフォーダブルミラーを調達し、既存の波面センサを利用して、波面変調の高精度の数学モデルを構築する。

(3) 合成開口望遠鏡システム実現に関する実験的研究

一般に合成開口望遠鏡は、像を合成するための光学系が非常に複雑であり、時間と金額のコストがかかる。本研究では、合成開口望遠鏡の数学モデルを構築し、合成開口望遠鏡特有の位相誤差を求め、補償光学実験の基礎

データとする。今後、共同研究などにより結像部の光学系を利用できれば、本研究の成果を拡張可能である。

(4) 補償光学実験システムによる統合実験
 デフォーダブルミラー、コリメータ、テストターゲットなどを光学定盤上に配置し、観測画像から波面誤差を推定し、補整することで、理想的な画像を取得する統合実験を行う。

3. 研究の方法

本研究では、合成開口望遠鏡の実現に向けて、補償光学技術に焦点を絞った研究を行う。

(1) 観測画像に基づく波面収差推定のための機械学習手法の研究

波長依存性と視野依存性を無視したフーリエ光学理論を拡張し、これらの影響を考慮した汎用的な数学シミュレータを構築する。

図1に示す補償光学システムを前提とし、Phase diversity 法に代表される画像ベースの収差推定手法を導入し、波面制御によって、光学系に既知の収差をアプリアリ情報として与えた画像を複数得ることにより、画像から収差を推定する問題を適切 (well-posed) な逆問題に帰着させる。このときアプリアリ情報によって逆問題の性質が変化するため、実験計画法のアプローチを導入して最適なアプリアリ情報の選択手法を研究する。

観測画像には波面収差のほかに観測対象の影響が含まれる。空間周波数領域で複数の画像を用いて処理することにより、観測対象によらずロバストな収差情報の抽出手法を研究する。また、光学収差と観測画像との関係は非線形であるため、収差の推定は多次元の非線形回帰問題となる。サポートベクターマシンに代表されるカーネル関数を用いた機械学習と情報抽出を合わせて非線形回帰問題を解く手法を研究する。

ノイズに対して、フーリエ空間で観測対象の影響を除去する処理と光学系の特徴をよく現すカーネル関数を研究する。特に、ノイズ構造と、大きさによる影響を重点的に研究する。

汎用的な光学系に対して適用するために広いパラメータ空間の中で適切な学習を行う必要がある。多数の収差パラメータを効率的に推定するために、能動学習による方法論を導入する。

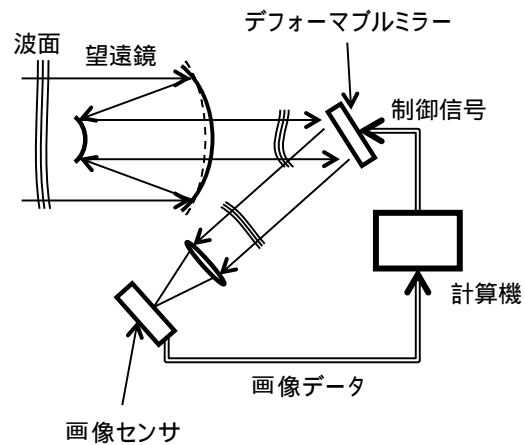


図1 補償光学系概念図

(2) デフォーダブルミラーを用いた波面制御技術の研究

高速で画像の推定と波面制御をおこなうために、デフォーダブルミラーの特性を高精度でモデル化する。このとき、光学収差に一般的な基底関数 (Zernike 多項式) を用いる方法、アクチュエータごとの感度関数を用いる手法等を検討し、波面センサのデータと比較して、定量的に適切な表現方法を確立する。

波面センサを用いて応答性、回折効率、波面の空間分解能など、補償光学の性能にかかわる基本性能を評価する。

(1) の結果をもとに、観測画像の取り込み、波面推定処理、デフォーダブルミラーへの制御入力のクローズドループ (図1) を実現するためのソフトウェアを開発する。

(3) 補償光学系の統合実験

図2の実験システムを構築し、観測画像から波面誤差を推定し、デフォーダブルミラーを用いて補整する実験を行う。

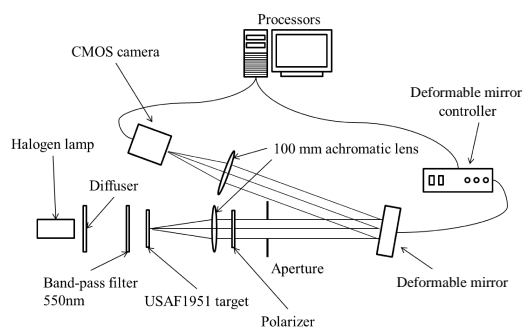


図2 補償光学系実験装置

4. 研究成果

(1) 拡張 Phase diversity 法による波面収差の推定手法

観測画像から光の波面収差を推定するための機械学習手法の研究と、波面収差を補正するためのデフォーダブルミラーの制御手法の研究とを実施した。

観測画像に基づく波面収差推定のための機械学習手法の研究では、具体的に、次の内容を実施した。研究の対象とする合成開口望遠鏡システムについて、波長依存性と視野依存性を無視したフーリエ光学理論を拡張した数学モデルを構築した。波面センサで波面を直接測定するかわりに、Phase diversity 法に基づく画像ベースの収差推定手法を導入し、デフォーダブルミラーを想定した波面制御によって、光学系に既知の収差をア priori 情報として与えた画像を複数枚取得することにより、画像から収差を推定する問題を適切 (well-posed) な逆問題に帰着させる手法を考案した。このとき、観測画像には波面収差のほかに観測対象の影響が含まれる。空間周波数領域で複数の画像を用いて処理することにより、観測対象によらないロバストな収差情報の抽出手法を研究した。

デフォーダブルミラーを用いた波面制御技術は、本研究課題の基礎となるものであり、具体的に、次の内容を実施した。高速で画像の推定と波面制御をおこなうために、デフォーダブルミラーの特性を高い精度でモデル化した。このとき、光学収差に一般的な基底関数を用いる方法、アクチュエータごとの感度関数を用いる手法を検討した。

以上の成果を元に、汎用的な数値シミュレータを構築し、機械学習手法に用いた画像ベースの収差推定手法と、デフォーダブルミラーの制御手法との妥当性を検証した。

(2) デフォーダブルミラーの制御

デフォーダブルミラーを用いた波面制御技術の研究を行った。本研究では観測画像を用いて、高速で画像の推定と光学収差およびミスアライメントによる波面の歪みを補正するための波面制御をおこなう。画像処理による推定を行う際に、デフォーダブルミラーの特性を高い精度で再現する数学モデルを構築し、このモデルを用いて制御アルゴリズムを構築した。このとき、光学収差を表現する基底関数を検討し、Zernike 多項式を用いた手法を採用した。実験室における特性評価実験では、波面センサを用いてデフォーダブルミラーの応答性、回折効率、波面の空間分解能など、補償光学の性能にかかわる基本性能の評価を行った。

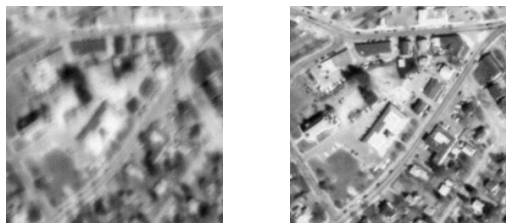


図3 統合数値シミュレータによる結果

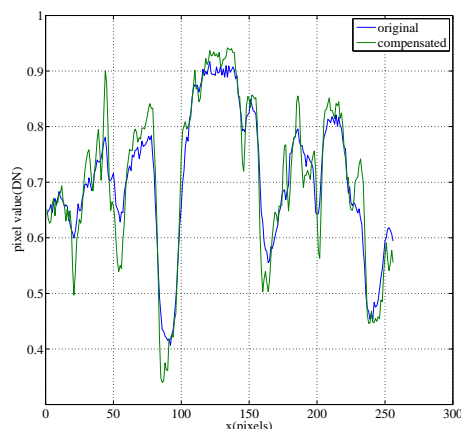


図4 統合数値シミュレータによる結果

(3) 補償光学系実験装置を用いた統合実験

合成開口望遠鏡の実現において、個々の望遠鏡の位相調整に不可欠な補償光学系について、補償光学実験システムを構築し、人工衛星によるリモートセンシングにおける補償光学技術の実証実験を行い、総合的な実現性を検証した。具体的には、2つの項目について研究を行った。まず、人工衛星の観測において、軌道運動により観測対象が常に変化していく中で、観測画像から波面収差を推定する手法の研究を行った。前年度までに研究を行った拡張 Phase diversity 法では、デフォーダブルミラーを用いて、様々な Zernike モードの波面収差を光学系に与えることで、特定の収差モードの推定精度の向上をさせたが、今年度は、画像の移動量を波面の傾きとしてモデル化し、さらに波面収差と同時に移動量を補正する手法とした修正を行った。これによって、軌道運動を伴う人工衛星においても、拡張 Phase diversity 法の利用を可能とした。次に、補償光学実験システムの設計と構築を行い、研究成果の実証実験を行った。前年度までに取り組んだ、合成開口望遠鏡の数学モデルとデフォーダブルミラーのモデル化と制御手法を活用して、光学ベンチ上に2次元の観測ターゲットを用意し、波面の歪みを与え、拡張 Phase diversity 法を利用した波面推定を行った。その結果を用いて、デフォーダブルミラーの制御により収差を補正し、取得した画像の画質により総合評価を行い、画質の向上を確認した。

この研究を通して、合成開口望遠鏡の数学モデルの構築、デフォーダブルミラーのモデル化および制御手法、観測画像を用いた拡張 Phase diversity 法による波面推定、波面推定における人工衛星の軌道運動補正、合成開口望遠鏡に向けた補償光学実験システムの構築を行った。今後はこの研究の成果を、人工衛星搭載センサの開発に活用する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 1 件)

N. Miyamura, Wavefront compensation technique using acquired images for small satellite remote sensing, SPIE Photonics West, 1 Feb. 2014, San Francisco

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/miyamuralab/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

宮村典秀 (MIYAMURA NORIHIDE)

明星大学・理工学部・准教授

研究者番号：50524097