

論文の内容の要旨

論文題目 空間位相変調器を用いた衛星光学系の軌道上再構成に関する研究

氏名 宮村 典秀

本論文は、空間位相変調器を用いた波面補償による、光学系の軌道上再構成を提案するものである。再構成によって、光学系の性能劣化要因となる光学系構成要素の熱歪やアライメント変動の補正を軌道上で行うことが可能になり、これらの劣化要因を防ぐための支持構造への剛性要求が緩和され、光学系の小型軽量化が可能になる。

高性能の光学系には、光学素子の面形状及びアライメントに波長オーダーの精度が求められる。従来は、軌道上での変形を防ぐために支持構造の剛性を強化した上で、あらかじめ地上で波長オーダーの調整を行うことによって、軌道上での精度を確保するという設計方針であった。結果としてセンサ質量、衛星質量がともに増加するだけでなく、予測できなかった変形等が軌道上で起こった場合の性能劣化が避けられなかった。小型衛星による高性能の光学系の実現、及び軌道上の未知の要因による性能劣化防止のためには、これまでの軌道上で光学系の変形を防ぐという設計方針から、軌道上で光学系の変形をある程度許容し、それが発生しても光学系の再構成により性能を回復するという設計方針への転換が必要である。

本研究では近年実用化が進んでいる空間位相変調器 (Spatial Light Modulator) を用いて、軌道上で光学系の面形状及びアライメントの変形によって引き起こされる波面収差を測定し、それをオンボードで補正することを目的とする。

はじめに、地上の大型望遠鏡で大気の流れ補正に利用されている補償光学系に注目した。一般的に、補償光学系では波面センサを用いて大気の流れを波面収差として測定し、リアルタイムに可変形鏡で補正する。宇宙望遠鏡でも、軌道運動に伴う熱環境、打上げ振動等に由来する光学系の変形を波面収差として測定し、これを補正することに補償光学系を応用することができる。補償光学系で使用する波面センサは、それ自体が高精度を要求する光学系であるため、軌道上での性能劣化が起こらないようにする必要がある。したがって、軌道上である程度の性能劣化を許容するという観点から、波面センサを用いることなく観測画像から波面収差を推定しこれを補正するPhase Diversity法を導入した。一般的に、観測対象が未知の場合、観測画像のみを用いて波面収差を一意に決定することはできない。Phase Diversity法は、未知の収差が存在する光学系に対して、通常得られる画像に加え、光学系にPhase Diversityと呼ばれる既知の波面収差をわざと与えたときの画像を用いて画像処理を行うことにより、観測対象が未知の場合でも観測画像から波面収差を推定することを可能にするものである。

この方法では、Phase Diversityの与え方が問題を解く上で重要である。従来は、既知の

収差を自在に作る事が困難であったため、検出器のデフォーカスを利用してPhase Diversityを与える方法が一般的であった。この方法では、地上で与えたデフォーカス量が軌道上でも一定でなければならないというだけでなく、収差モードのカバレッジが狭く特定の収差モードに対して推定精度が劣化するという欠点があった。そこで、本研究では波面収差の補正に用いる空間位相変調器を用いてPhase Diversityを作ることを提案した。空間位相変調器を用いることによって、収差モードのカバレッジを広げ、上に述べたような特定の収差モードの推定精度が劣化しないPhase Diversityを作ることが可能である。さらに、システムが簡単になるため小型衛星の搭載に有利なものとなる。

また、観測画像から収差を推定する方法では、一般的に複雑な画像処理を必要とする。そのため、軌道上で利用するためには、計算負荷の軽減が課題であった。本研究では、この問題を解決するために、画像を用いた収差の推定にニューラルネットワークを利用した。ニューラルネットワークを利用した研究は過去にも見られ、ニューラルネットワークへの入力として何を利用するかということが収差推定問題の計算量を左右するため、これまでにさまざまな方法が提案されている。本研究では、画像の主成分分析の結果をニューラルネットワークの入力として利用することにより情報を圧縮する方法を提案した。主成分分析で得られる情報量にとって、Phase Diversityをどのように設計するかということが重要な意味を持つ。従来のデフォーカスによるPhase Diversityでは設計の自由度が少なかったが、空間位相変調器を用いることによって適切なPhase Diversityを設計することが可能になり、主成分分析により有効な収差情報を抽出できるPhase Diversityを与えることができるようになることを示した。

以上の方法に基づき数値シミュレーションによる検討を行った。その結果、少ない計算負荷で精度よい収差推定が可能であることを示した。また、従来の方法では推定が困難な収差のモードが存在したが、Phase Diversityを適切に設計することによって、このようなモードも推定可能であることを示した。

本研究の成果は、光学センサの小型軽量化によって小型衛星による高性能のリモートセンシングを可能にするだけでなく、宇宙での展開望遠鏡、衛星のフォーメーションによる仮想的な大口径望遠鏡など、宇宙で光学系の再構成を必要とするシステム全般への応用が期待できる。