

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20439

研究課題名（和文）合成開口望遠鏡による高分解能リモートセンシングのための空間光変調を用いた波面補償

研究課題名（英文）Wavefront compensation using a spatial light modulator for high-resolution synthetic aperture remote sensing

研究代表者

広瀬 真 (Hirose, Makoto)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員

研究者番号：30908760

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、高分解能地球観測システムの実現に向け、軌道上で複数の望遠鏡開口を合成できる波面制御手法を獲得することである。本研究では、撮像シーンの画像特徴量を評価関数として、合成開口望遠鏡光学系が備えた波面補正素子を逐次制御する、モード分解確率的並列勾配降下（SPGD）アルゴリズムを提案した。そして、数値シミュレーションならびにテストベッド実験を行い、提案手法によって波面補正アクチュエータを制御することにより、回折限界結像性能を有する合成開口イメージングを達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、多変数最適化手法であるSPGDアルゴリズムを波面補正素子制御に応用し、波面センサレス補償光学手法を確立した。最適化の際に、波面収差を直交関数列で展開するモード分解手法を導入し、収束の安定化と高速化を達成した成果は、本手法を時定数の短い大気擾乱の補償などにも応用できることを示唆した。提案手法によって実現した合成開口望遠鏡システムが静止軌道に配置されれば、数メートル級の地表面分解能において、指定した陸海域の常時および即時観測が可能になり、従来にない地球観測機能を得ることができる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to establish a wavefront control method for realizing on-orbit synthetic aperture telescopes. We proposed a modal decomposed stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm for sequential wavefront control of a synthetic aperture telescope based on an evaluation metric defined from the measured scene structures. Numerical simulations and testbed experiments demonstrated that the proposed approach allowed us to achieve diffraction-limited imaging performance in synthetic aperture imaging systems.

研究分野：計測工学

キーワード：補償光学 リモートセンシング MEMS 形状可変鏡 地球観測

1. 研究開始当初の背景

地球周回軌道上で複数の望遠鏡開口を精密に配置する合成開口望遠鏡は、衛星リモートセンシングの分解能を飛躍的に高める革新技术である。これを可視域で実現するには、地上観測中に、開口内そして開口間で生じる波面歪みを数 10 nm 以下に抑える必要がある。この高い波面精度を得るには、形状可変鏡 (DM) の利用が欠かせない。

最も単純な構成でこの要請に応え得る手法が、確率的並列勾配降下 (SPGD) 法である。SPGD 法では、DM さえ光学系射出瞳に挿入すれば、波面センサ等を用いず、観測画像のみに基づく波面補償ができる。ただし、従来の SPGD 法が想定する観測対象は点光源であり、光学系の開口も 1 つだけであった[1, 2]。地球観測が目的の場合は、地表面のような面光源の観測画像に基づく波面補償が要求される。しかし、面光源を観測対象とした研究例は少なく、実現性は良く理解されていなかった。まして、合成開口望遠鏡のように、複数の開口から成る結像光学系の波面補償は、これまでに前例がなかった。

SPGD 法は、DM を能動的に駆動して光学系に微小の空間光位相変調を与え、このときの観測画像の変化から DM 形状を修正する。この制御は DM が波面補償に最適な形状に収束するまで反復されるが、収束の成否は「空間光位相変調パターン」と「画像変化を定義する評価関数」によって決定される。しかし、これまで面光源を観測する場合に適した、位相変調パターンと評価関数は不明であった。

2. 研究の目的

地上観測に用いる合成開口望遠鏡の波面補償を可能とする、SPGD 法の位相変調パターンと評価関数を提案する。そして、実験室規模の合成開口望遠鏡を構築し、MEMS (微小電気機械システム)DM による空間光位相変調を用い、提案手法を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

はじめに計算機シミュレーションを行い、地上シーン観測時の波面補償に有効な位相変調パターンと画像評価関数を明らかにする。ここでは特に最適化変数の圧縮手法と、複数の評価関数の比較評価を行う。この評価結果にもとづき、波面補償機能を備えた結像光学系を構築し、原理実証実験を行う。光源には広帯域ハロゲンランプを用い、国内の都市部を空撮した画像をイメージフィルムに印刷して観測対象とする。波面補償デバイスには、微小電気機械システム式 (MEMS) アクチュエータを 140 個備えたフェースシート形状可変鏡 (DM) を採用する。そして、MEMS DM に初期収差を与えた状態から SPGD 法による波面補償を開始し、到達波面精度を評価する。

4. 研究成果

計算機シミュレーションによって、位相変調パターンとして Zernike 多項式の線形和を与えることにより、従来手法と比較して約 1 桁程度収束を速められることが分かった。また、5 種類の評価関数を比較したところ、測定画像強度の二乗標準偏差が最も速く収束することも明らかとなった。加えて、撮像対象が高い空間周波数成分を有するほど、安定した波面補償を行えることも示され (図 1) 地上シーン観測時における有効な解析条件が調査できたと言える。その上で、18 開口合成開口望遠鏡の数値モデルを構築し、提案手法による波面補償が可能であることを確認した。

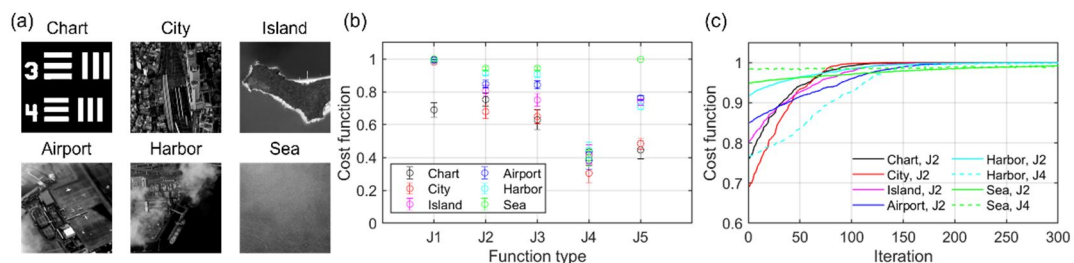


図 1. 計算機シミュレーションの結果。(a) 地上シーン画像。(b) 評価関数の地上シーン画像依存性。5 種類の異なる評価関数について計算している。(c) 地上シーンおよび評価関数の違いによる SPGD 法の収束性能比較。

次に、構築した結像光学系において SPGD 法の原理実証実験を行い、計算機シミュレーションと同様、Zernike 多項式による空間光変調と、撮像画像の自乗標準偏差にもとづく DM 形状制御が有効であることを確認した。また、2 開口結像系を模擬した DM 制御実験も行い、合成開口結像光学系においても波面補償が機能することを確認した(図 2)。いずれの実験条件においても、結像光学系の回折限界結像性能が得られている。以上の結果から、地上観測に用いる合成開口望遠鏡の波面補償を可能とする、SPGD 法の位相変調パターンと評価関数を提案し、実験実証することができたと言える[3]。

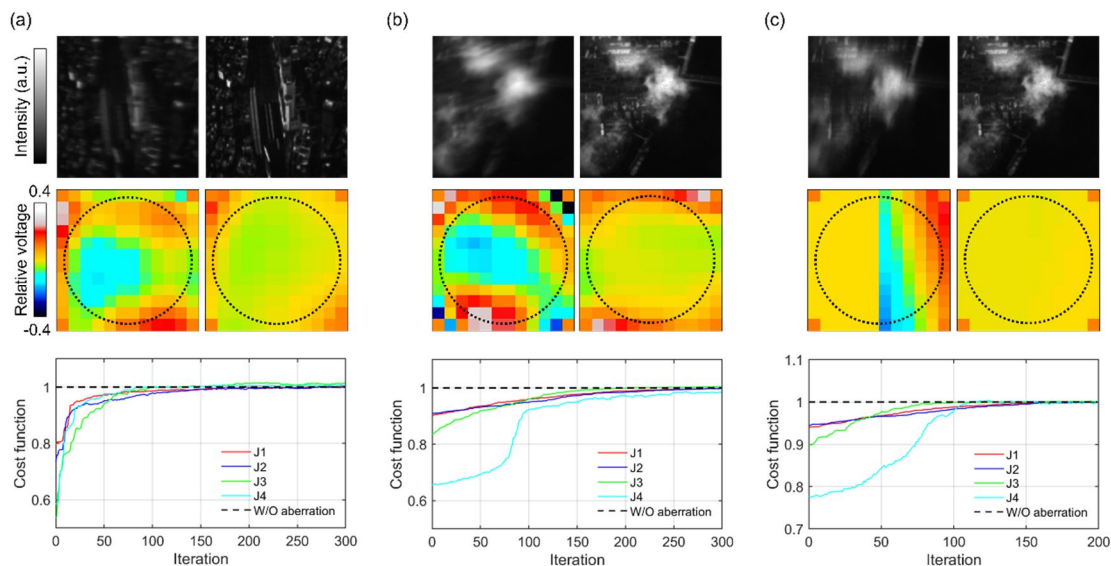


図 2 . 波面補償実験の結果。(a) 微細構造が多い地上シーン、単一開口系、(b) 微細構造が少ない地上シーン、単一開口系、(c) 二開口系の組み合わせで行った実験結果。また、上から観測像、MEMS DM 印加電圧分布、評価関数の収束曲線に対応し、各図、左側が波面補償前、右側が波面補償後に対応する。

参考文献

- [1] M. Hirose et al., Proc. SPIE **11448**, 9 pages (2020).
- [2] M. Hirose et al., Proc. SPIE **11836**, 9 pages (2021).
- [3] M. Hirose et al., Appl. Opt. **61**, 6722-6728 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Makoto Hirose, Norihide Miyamura, Seichi Sato	4. 巻 61
2. 論文標題 Deviation-based wavefront correction using the SPGD algorithm for high-resolution optical remote sensing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 6722-6728
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.461222	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 広瀬真、佐藤世智、宮村典秀、水谷忠均、木村俊義
2. 発表標題 集光像にもとづく分割鏡光学系の波面調整
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Hirose, Norihide Miyamura, Seichi Sato, Tadahito Mizutani, Toshiyoshi Kimura
2. 発表標題 Scene-based wavefront correction using SPGD algorithm for high-resolution Earth observation
3. 学会等名 International Conference on Space Optics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 広瀬真、宮村典秀、佐藤世智
2. 発表標題 高分解能リモートセンシングのための画像情報にもとづく逐次波面補償
3. 学会等名 第39回センシングフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Hirose, Norihide Miyamura, Seichi Sato, Tadahito Mizutani, Toshiyoshi Kimura
2. 発表標題 Efficient image-based wavefront correction using phase diversity and SPGD optimization for high-resolution optical remote sensing
3. 学会等名 SPIE Optics + Photonics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 広瀬真、宮村典秀、佐藤世智、水谷忠人、木村俊義
2. 発表標題 分割主鏡光学系を想定した波面センサレスな収差補正
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------