

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04194

研究課題名(和文) 分割主鏡式天体望遠鏡の相対位置制御アルゴリズム

研究課題名(英文) Relative position control algorithm of segmented mirror control system

研究代表者

軸屋 一郎 (Jikuya, Ichiro)

金沢大学・フロンティア工学系・准教授

研究者番号：90345918

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：日本初の分割主鏡式天体望遠鏡であるせいめい望遠鏡への適用を念頭に分割主鏡制御の概念設計を行なった。超多入力超多出力な制御対象に対する制御問題として定式化し、集中制御則と分散制御則の二方式を提案した。集中制御則に関してはせいめい望遠鏡実機に実機実装され既に天体観測に至っている。分散制御則に関しては集中制御則のバックアッププランとして提案され、集中制御則が機能したために実機実装の必要性が生じなかったが、将来的な天体望遠鏡の大型化を念頭にシミュレーション検討を通じて最適化手法を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

天文学の発展に望遠鏡の大型化は欠かせない。10メートル級の光学望遠鏡までは一枚の主鏡を構成できるが、それ以上となると分割主鏡を構築する必要がある。軽量架台、精密鏡面加工、分割主鏡制御など様々は技術開発が必要である。本研究では分割主鏡制御の技術開発を実施し、日本初の分割主鏡式望遠鏡の実現に貢献した。工学の立場から最先端天文学の発展に貢献し日本のプレゼンスを示すとともに、制御工学の有用性を示す興味深い実例を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：The conceptual design of segmented primary mirror control is investigated with the application to the Seimei telescope, which is the first Japan's first segmented primary mirror type astronomical telescope. A control problem is formulated as a super-multi-input-multi-output relative position control problem. Two types control methods are proposed; one is the centralized control law and the other is the distributed control law. The centralized control law has already been implemented in the actual telescope and has already contribute to realize the astronomical observation. The distributed control law was proposed as a backup plan for the centralized control law, and since the centralized control law worked, there was no need to implement it on an actual telescope. The optimization methods are studied for the distributed control law via simulation studies instead for the purpose of application to future giant telescopes.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

天体望遠鏡は空間分解能向上と大集光力の要請から世界中で大口径化が進んでいる。大口径化のための一つの手法が「分割主鏡」の技術である。分割主鏡とは分割鏡と呼ばれる複数の独立した鏡を並べることで一枚の主鏡として機能させる方式であり、巨大鏡の製作や輸送の困難を解決することができる。一方で、架台の熱変形・重力変形と風外乱などの影響を受けて、観測時に分割鏡間の相対位置がずれてしまう問題点がある。この問題点に対処する考え方は二つに大別される。一つは、HET, SALT, LAMOST などのように精密な分割主鏡制御を行わず、簡素かつ安価な構造を目指すことにより大集光力に特化する考え方である。もう一つは、Keck 望遠鏡などのように精密な分割主鏡制御により各分割鏡で反射される光の位相をあわせることにより、大集光力と空間分解能力向上を両立させる考え方である。分光観測など精密な観測を行なっていくためには、分割主鏡制御による空間分解能力向上が必須であることはいうまでもない。

日本においても京都大学が中心となって、東アジア最大級となる「せいめい望遠鏡」が建設されてきた。岡山県浅口市の岡山天文台に設置され、望遠鏡不動点は、東経 133d 35m 48.2s, 北緯 34d 34m 36.8s, 標高 355m である。望遠鏡架台の大きさは高さ 8メートル, 幅 8メートル, 重さ 20 トンであり、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化することにより同サイズの望遠鏡架台と比較すると大幅な軽量化が実現された。望遠鏡架台の形式は経緯台であり、観測範囲は高度方向 20 度から 89 度, 方位方向 -270 度から +270 度, 指向精度は 15 秒角(rms), 追尾精度は 0.5 秒角 (10 分追尾)である。凹面主鏡と凸面副鏡によりリッチークレアチン式光学系を構成し、第三鏡により左右のナスミス台に光路を振分け流ことが可能であり、2 個のナスミス焦点を持つ。口径比は F/6, 焦点距離は 29,622mm, 有効口径は 3,780mm である。有効口径は主鏡により規定され、せいめい望遠鏡でも分割主鏡が採用されている。せいめい望遠鏡では系外惑星の長期精密観測などを目的として極限補償光学の実現を目指しており、その前提として分割主鏡制御による空間分解能力向上を目指してきた。

せいめい望遠鏡の分割主鏡制御を実現するにあたり代表者と分担者がチームを組み予備検討を実施してきた。京都大学にダミーミラー 2 枚から構成されるテストベッドを構築し、具体的にはセンサ特性試験とアクチュエータ特性試験の後に、ダミーミラー 2 枚に対する分割主鏡制御系の制御系システム構築を行なった。テストベッドに対して周波数応答の計測と分割主鏡制御の予備実験を実施し、実験結果の解析を実施した。2 枚の分割鏡の間で相対位置制御が可能であるということを実験的に検証することができた。せいめい望遠鏡の実機では 18 枚の分割鏡を用いており、18 枚の分割鏡に対する分割主鏡制御則を構築する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的はせいめい望遠鏡の分割主鏡制御を定式化し、制御則を提案することにある。

分割鏡は分割主鏡の全体として理想的な鏡面形状を構成するように加工されているため、分割鏡が不揃いである場合には、集光する経路も不揃いとなり、焦点に結像しない。分割主鏡の全体として理想的な鏡面形状を構成させることにより、焦点に正しく結像する。

分割主鏡制御は 18 枚の分割鏡を理想鏡面形状に保つことを目的とする。天体観測開始時には位相カメラとシャックハルトマン波面センサーを用いて理想鏡面形状を構成する。天体観測中には位相カメラとシャックハルトマン波面センサーを用いることができないので、分割主鏡間の段差を測るギャップセンサーを用いてフィードバック制御を施す。

せいめい望遠鏡には光線方向から分割主鏡を見下ろした時に、背面にセンサとアクチュエータが配置されている。ギャップセンサーは分割鏡と分割鏡の間の 2 点の段差を計測し、分割主鏡全体として合計 72 点の段差を計測する。アクチュエータは各分割鏡の 3 点を押し、分割主鏡全体として合計 54 点を押すことを可能とする。

分割鏡は背面から板バネを介して望遠鏡架台と接続されているので、回転二軸と並進一軸の運動の自由度がある。各分割鏡に付与されたアクチュエータ三個だけを用いて三軸の運動を実現することが可能であり、各分割鏡の理想鏡面からのずれが既知であれば、各分割鏡に対して局所的な制御を施すことにより分割主鏡全体として理想的な鏡面形状を実現することが可能である。一方、分割鏡と分割鏡の間の 2 点の段差を計測するだけでは分割鏡と分割鏡の相対的な位置ずれを計測することは不可能であり、各分割鏡の理想鏡面からのずれを知るにはセンサ情報を統合する必要があることがわかる。また、一個の分割鏡を動かした時に、その分割鏡の周りの全て

のセンサに影響を与えることから、個々のセンサの値だけをみて誤差を補正しようとしても収束しない。分割主鏡制御を施すためには、全ての分割鏡の理想鏡面からのずれが徐々に減るよう全体的に制御をかける必要があることがわかる。

分割主鏡制御は本質的に多入力多出力の制御問題として定式化する必要がある。

本研究の第一の目的として、アクチュエータからセンサへの依存関係を明確化し、制御対象のモデル化を行う。第二の目的として、すべてのセンサ情報を統合してすべてのアクチュエータを駆動することにより分割主鏡を理想鏡面形状に回復させる制御則(集中制御則)を検討する。第三の目的として、局所的なセンサ情報から局所的なアクチュエータを駆動し、分割主鏡を理想鏡面形状に回復させる制御則(分散制御則)も検討する。

3. 研究の方法

3.1. 制御モデルの構築

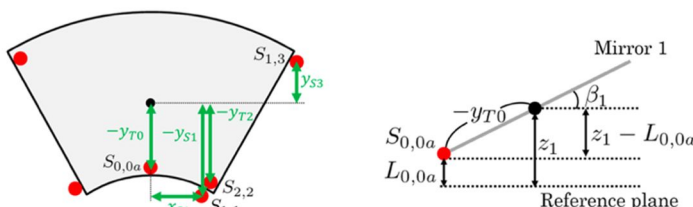
アクチュエータからセンサ関係への依存関係を明確化し、制御対象のモデル化を行う。

アクチュエータの操作の三自由度と分割鏡の動作の三自由度が一対一に対応づけ可能であることから、アクチュエータにより分割鏡の動作の三自由度を直接制御可能と仮定することができる。分割鏡の幾何学的対称性から、分割鏡の動作の三自由度は中心方向回転角 α 、円周方向回転角 β 、面外方向並進距離 z により表すことが自然である。全ての分割鏡の三自由度をまとめて状態変数 x と表記することとする。

以下に分割鏡 1 のセンサ配置と動作の自由度の関係を図示する。例えば、 $L_{0,0,\alpha}$ はリング構造物に対する分割鏡 1 の相対距離を表す。幾何学的に考察すると、円周方向回転角 β_1 と面外方向並進距離 z_1 に設計パラメータ y_{T0} を組み合わせることによって表現され、理想鏡面廻りで線形化を行うことにより状態変数の線型結合により表現することができる。

$$L_{0,0,\alpha} = z_1 + y_{T0}\beta_1$$

同様の幾何学的考察をすべての分割鏡に対して考察することにより、全ての分割鏡間相対距離を状態変数の線型結合により表現することができる。これらの関係を連立することにより出力方程式が得られる。



アクチュエータはステップモータにより変位を生成し、テコとバネを組み合わせた変位拡大機構により減速する。ステップモータはパルスに比例する変位を生成するが、制御則により変位の指令値を制御入力として生成するにあたり、単位時間あたりのパルスを指令値として与える考え方と絶対的な変位を指定する考え方があることがわかる。

せいめい望遠鏡では前者の単位時間あたりのパルスを指令値として与える考え方を採用しており、制御入力の積分が状態変数に相当することがわかる。

分割鏡は板バネを通じて望遠鏡架台に拘束されている。制御帯域を上げる場合には板バネの拘束方向の振動特性と望遠鏡架台の振動特性が無視できないが、本研究では、分割主鏡制御が機能することを優先して制御帯域を 1Hz 程度に抑えて制御形設計を行うこととした。このことに伴い、板バネの拘束方向の振動特性と望遠鏡架台の振動特性を無視した。

結果として、制御対象に現れる動特性はステップモータに起因する積分器特性であり、これらの関係を連立することにより制御方程式が得られる。

3.2. 集中制御則の提案

一般的な制御対象では状態変数の次元の方が制御出力の次元より高い。しかし、せいめい望遠鏡では制御出力の次元の方が状態変数の次元より高いという特殊な性質をもつ。出力方程式の係数行列が列フルランクであり、制御出力に係数行列の疑似逆行列を掛けると制御出力から状態変数を逆算できる。このことに着目して集中制御則を解析的に導出する。

提案手法の評価をシミュレーションにより行い、動画作成をして分割鏡の動きを可視化することにより制御則の良し悪しを直感的に評価する枠組みを構築する。

さらにせいめい望遠鏡の実機に対して集中制御則を実装することにより、実機検証を行う。

3.3. 分散制御則の提案

集中制御則は数式上は明快であるが、開発段階においては確実に動作する確信がなかった。特に、モデル化誤差の影響が懸念されるとともに、一枚の分割鏡の補正をするために全ての分割鏡間の相対距離を用いて制御入力を計算することが極めて人工的に思われ、バックアッププランとして分散制御則を提案することとした。

集中制御則の本質が観測出力から状態変数を逆算することにあると考え、分割鏡近傍のセンサ出力のみから疑似的に個々の分割鏡の動作の三自由度である中心方向回転角 α 、円周方向回転角 β 、面外方向並進距離 z を再構成することを考えた。

再構成の手法は一意には定まらないが、試行錯誤により再構成法を取捨選択し、閉ループシステムの極配置を調べることにより再構成方法を選定した。

集中制御則と同様に、分散制御則でも提案手法の評価をシミュレーションにより行い、動画作成をして分割鏡の動きを可視化することにより制御則の良し悪しを直感的に評価する枠組みを構築する。

さらに、分散制御則を集中制御則の近似的な手法として提案したことに着目し、集中制御則に近い極配置を持つような分散制御則の構築を最適化問題に帰着することを検討した。

4. 研究成果

4.1. 制御モデルの導出

制御方程式と出力方程式を連立することにより以下の制御モデルが得られる。

$$\dot{x} = u$$

$$y = Cx$$

係数行列 C は72行54列の縦長行列であり、疎な列フルランクである。通常の制御問題では係数行列 C は横長であるが、せいめい望遠鏡ではセンサを冗長に配置することにより、ここに示されたような特殊な性質を持つ制御対象が得られた。

4.2. 集中制御則の評価

係数行列 C が列フルランクであることから左疑似逆行列を構成することができる。このことに着目して以下のように集中制御則を構成することができる。

$$u = -kC^+y$$

ここで C^+ はムーアペンローズの疑似逆行列を表し、 k はスカラゲインを表す。

係数行列 C が疎であるのに対し、疑似逆行列 C^+ は密である。このことから、一枚の分割鏡の補正をするために全ての分割鏡間の相対距離を用いて制御入力を計算していることが確認できる。

4.3. 分散制御則の評価

集中制御則は本質的には出力変数から状態変数を再構成して疑似的な状態フィードバック制御を実現している。幾何学的な考察に基づき、各分割鏡に隣接するセンサ出力から状態変数を近似的に再構成し、集中制御則を近似的に実現することを試みた。

試行錯誤の結果、分割鏡1の動作の三自由度である中心方向回転角 α_1 、円周方向回転角 β_1 、面外方向並進距離 z_1 に関して以下のように隣接するセンサ出力の線型結合として制御入力を定め、その他の分割鏡に関しても同様に分割鏡に隣接するセンサ出力の線型結合として制御入力を定めることにより、閉ループシステムの安定化に成功した。

$$u_{\alpha 1} = -k_{\alpha 1} \frac{-S_{0,01} - S_{1,1}}{x_{S1}}$$

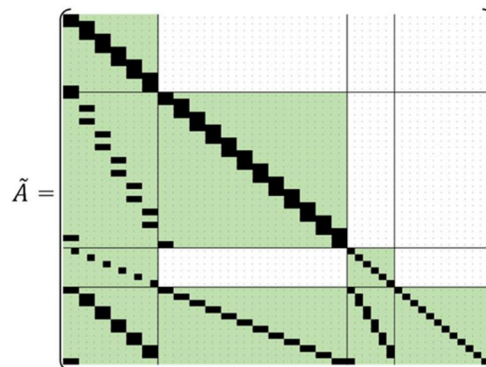
$$u_{\beta 1} = -k_{\beta 1} \frac{-S_{2,2} - S_{2,3}}{-\gamma_{r2} + \gamma_{s3}}$$

$$u_{z1} = -k_{z1} S_{0,01}$$

集中制御則と分散制御則のシミュレーション結果を比較すると、集中制御則の方がきれいに収束するが、分散制御則も集中制御則に類似した応答に見えなくもない。

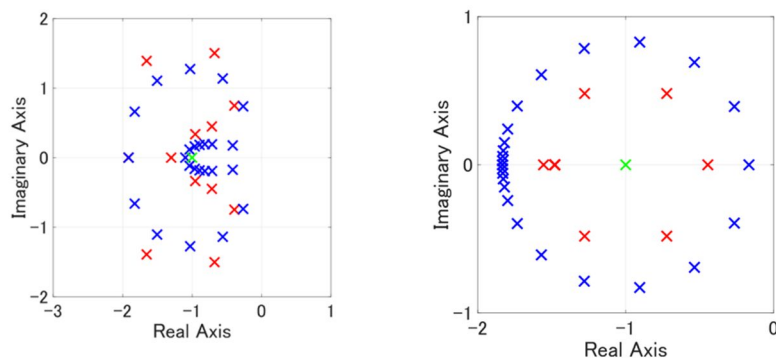
そこで、分散制御則の閉ループシステムの幾何学的構造を調べ、分散制御則を集中制御則の近似とみなして最適化問題に帰着した。

閉ループシステムの状態変数に置換を施し、幾何学的な配置に起因する数値的なキャンセルを評価すると、閉ループシステムの係数行列に以下の通りブロック三角構造が存在することを発見した。



さらにこの幾何学的構造に着目して分散制御則の制御ゲインを 4 種類に分類し、複素平面上での極の広がり具合が最小となるように最適化問題を定式化した。

以下に最適化問題の実行例を示す。左図が最適化前、右図が最適化後であり、最適化後の方が複素平面上での極の広がりが抑えられていることが確認できる。



4.4. まとめ

以上の理論検討を踏まえ、集中制御則をせいめい望遠鏡の実機に実装した。結果は良好であり天体観測に至っている。

本研究では分割主鏡制御の技術開発を実施し、日本初の分割主鏡式望遠鏡の実現に貢献した。工学の立場から最先端天文学の発展に貢献し日本のプレゼンスを示すとともに、制御工学の有用性を示す興味深い実例を示すことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 JIKUYA Ichiro, UENO Koki, KINO Masaru, KURITA Mikio, YAMADA Katsuhiko	4. 巻 55
2. 論文標題 Conceptual Design for Control System of Segmented Primary Mirror in SEIMEI Telescope	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 485 ~ 490
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.55.485	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 -

1. 著者名 Ichiro Jikuya, Masaru Kino & Katsuhiko Yamada	4. 巻 13
2. 論文標題 Open-Loop System Identification of MIMO Integrator Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 73-76
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/jcmsi.13.73	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ichiro Jikuya, Daichi Uchida, Masaru Kino, Mikio Kurita, Katsuhiko Yamada	4. 巻 14
2. 論文標題 Structure of distributed control system in Seimei telescope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 111-118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/18824889.2021.1913879	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Ichiro Jikuya, Daichi Uchida, Masaru Kino, Mikio Kurita, Katsuhiko Yamada
2. 発表標題 Development status of the segmented mirror control system in Seimei Telescope
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ichiro Jikuya, Daichi Uchida, Mikio Kurita, Masaru Kino, Katsuhiko Yamada
2. 発表標題 A Discussion on Distributed Control System in Seimei Telescope
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ichiro Jikuya, Masaru Kino, Katsuhiko Yamada
2. 発表標題 Open-loop Parameter Estimation of MIMO Integrator Model
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ichiro Jikuya, Daichi Uchida, Masaru Kino, Katsuhiko Yamada
2. 発表標題 Morphing Perspective in Control System of SEIMEI Telescope
3. 学会等名 Korea-Japan Joint Seminar On Advanced Structures and Materials for Morphing Technology in Future Aircrafts (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上野 幸紀、軸屋 一郎、新村 拓海、木野 勝、山田 克彦
2. 発表標題 せいめい望遠鏡の分割鏡制御の初期設計
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上野 幸紀、軸屋 一郎、新村 拓海、木野 勝、山田 克彦
2. 発表標題 せいめい望遠鏡の分割鏡全体の制御方式の検討
3. 学会等名 第19回公益社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション 部門講演会 SI 2018
4. 発表年 2018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
研究分担者	木野 勝 (Kino Masaru) (40377932)	京都大学・理学研究科・助教 (14301)	

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
---------	---------