

京都大学	博士 (工学)	氏名	河野 裕之
論文題目	略半球形状レンズによる小型遮光バッフルを持つスターセンサの開発		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、人工衛星の姿勢制御に用いられるスターセンサにおいて、遮光バッフルの小型化に有用な略半球形状レンズを用いた新しい遮光手法を提案し、地上での実験・シミュレーションおよび衛星軌道上での実験による遮光・結像光学系の有効性の検証およびスターセンサ光学システムとしての設計・開発について論じたものであって、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、スターセンサの概要と遮光の重要性について述べている。本研究の目的は、①小型のスターセンサを開発するために、従来の2段型バッフルの小型化の限界を超える新しい遮光手法を提案・実証すること、②汎用的な地球観測衛星に必要な姿勢決定精度を満たすことを実証すること、③その実証の過程で必要になる地上および衛星軌道上でのスターセンサの評価手法を確立することである。</p> <p>第2章では、姿勢制御装置として要求される条件（視野中で観測すべき星数、星像の輝度重心精度、角度分解能、観測頻度）より、スターセンサの遮光および撮像性能について論じ、設計に重要となる素要素を確定した。</p> <p>第3章では、入射角により光線の通過と遮光を区別する角度フィルターとして略半球形状レンズを用いる新しい遮光手法を提案した。本手法により、高角度入射光はレンズの全反射により遮光され、中角度入射光はレンズの大きな屈折角を利用して遮光され、低入射角である視野内の光は通過することができる。十分な遮光を得るための略半球形状レンズに対して要求されるバッフルの開口位置の条件について論じ、簡単な整反射型で従来構造よりも短いバッフルの成立可能性を明らかにした。また、略半球形状レンズが結像系の一部を兼ねることにより、さらに全長が短くなることを示した。開口部を通過する光量を光線追跡法によりシミュレーションすることで、5等星像よりも小さな光量まで太陽光を減衰できることを明らかにした。一方、スターセンサの輝度重心計算精度を最適化する星像直径について、モンテカルロシミュレーションプログラムの開発・実行により調べ、略半球形状レンズを用いた結像系でのデフォーカス量と輝度重心計算精度の関連を明らかにした。</p> <p>第4章では、結像光学系の地上での評価について論じる。CCD上での星像の強度分布を測定する手法を開発し、最適なデフォーカス位置にCCDを設置することにより画面全体でほぼ同様の星像強度分布が得られることを示した。さらに、略半球形状レンズを使うことにより生じる球面収差が輝度重心計算精度を低下させないレベルであることを明らかにした。実際に略半球形状レンズを用いた撮像光学系を製作し、レンズへの模擬星光源の入射姿勢を変えることにより CCD 面内の多数の位置で模擬星像を取得する実験を行った。入射姿勢から求まる個々の星像の位置と CCD 上で観測される模擬星像の</p>			

位置との距離の自乗和を評価関数とし、模擬星光源に対するレンズの姿勢をパラメータとした評価を行なうことで、レンズに対する CCD のアライメント誤差を算出する手法を確立した。この実験から個々の星像のランダムな位置誤差を算出し、その結果より、輝度重心計算精度のシミュレーション結果の妥当性を確認するとともに、スターセンサに要求される条件を満たすことを明らかにした。一方、宇宙環境を想定した CCD のプロトン照射実験を地上で行い、半永久的な画素欠陥である白傷の数が温度増加に伴い指数関数的に増加することを明らかにするとともに、白傷数を抑制するためには CCD の冷却が有効であることを示した。

第 5 章では、装置を技術実証衛星 SERVIS-1 に搭載することで、高度 1000 km の衛星軌道上にて実験を行なった。遮光性能については、 60° 以上の太陽入射角で第 3 章での計算結果を再現したが、 60° 以下では画面隅に迷光が確認された。光線追跡シミュレーションにより、その原因が略半球形状レンズ内での多重反射であることを特定し、略半球形状レンズ下のアパーチャ径を縮小するという改善点を示した。一方、衛星軌道上で撮像された画像での個々の星像の輝度重心計算位置とスターカタログから求まる星像位置との誤差についての最小自乗計算により、レンズと CCD 間のアライメント誤差および 4 つの光学ヘッド間のアライメント誤差を求める手法を確立した。本手法により推定した上記のアライメント誤差情報を衛星軌道上のスターセンサに送信し、姿勢決定精度が向上することを明らかにした。4 つの光学ヘッドで同時に撮像された画像からそれぞれの光学ヘッドの視準方向を算出し、そのうち対角に位置する 2 ヘッド間の相対角度の偏差からセンサ計測精度を推定した。その精度は 0.6 分角 (3σ) であり、姿勢制御装置としての要求 (1 分角) を満たすことを明らかにした。一方、衛星軌道上で発生した CCD の白傷数は、温度変化も含めて地上での予測数とよく一致しており、地上実験での評価結果を裏付けた。

第 6 章では、遮光光学系の地上での評価について論じる。地上の実験環境が有限の空間であるために視野前方にある物体の像が CCD 上に写りこんでしまうが、その影響を防ぐために新たに光トラップ装置を考案・製作した。光トラップ装置を設置した太陽干渉測定装置を用いて、改良遮光光学系を評価し、十分な性能で遮光できることを示した。略半球形状レンズ単体、軌道実験モデル、改良モデルでの遮光性能を太陽干渉測定装置によって評価し、略半球形状レンズとそのバッフルによる遮光のメカニズムとその効果を定量的に説明した。

第 7 章はまとめであり、本論文で得られた成果について要約し、本装置をバス機器へ展開するための改良すべき事項について述べている。本論文の研究成果を元にして改良したスターセンサは技術実証衛星 SERVIS-2 の姿勢を制御するためのメインセンサとして搭載され、2010 年 12 月現在、順調に稼働している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、人工衛星の姿勢制御に用いられるスターセンサについて、遮光バッフルの小型化に有用な略半球形状レンズを用いた新しい遮光手法を提案し、その遮光・結像光学系としての有効性の実証およびスターセンサ光学システムとしての確立を目標に研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 汎用的な地球観測衛星に姿勢制御装置として要求される条件(視野中で観測すべき星数、星像の輝度重心精度、角度分解能、観測頻度)より、スターセンサの遮光および撮像性能について検討し、設計に重要となる素要素を確定した。

2. 入射角により光線の通過と遮光を区別する角度フィルターとして略半球形状レンズを用いることで遮光バッフルを小型化する新しい遮光手法を提案・実証した。衛星軌道上で遮光性能を評価して改善点を明らかにし、その後地上での遮光光学系の修正を行なった。新たに考案した光トラップ装置を用いた太陽干渉測定装置を開発し、十分な性能で遮光できることを示した。

3. 略半球形状レンズを用いた結像光学系の撮像性能を、光線追跡法やモンテカルロ法を用いたシミュレーションプログラムの開発・実行により評価し、デフォーカス量と輝度重心計算精度の関連を明らかにした。略半球形状レンズを用いた結像光学系を製作し、地上において輝度重心計算精度を評価し、シミュレーション結果の妥当性を確認した。軌道上において4つの光学ヘッドで撮像された画像から姿勢決定精度の評価を行い、姿勢制御装置としての要求を満たすことを実証した。

4. 宇宙環境を想定した CCD のプロトン照射実験を地上で行い、白傷数を抑制するために CCD の冷却が有効であることを明らかにした。軌道上での白傷数が地上実験からの予測数とよく一致することを確認し、地上での評価結果を実証した。

5. 上記の研究成果に基づき改良したスターセンサを技術実証衛星 SERVIS-2 に姿勢を制御するメインセンサとして搭載し、改良した光学系の遮光性能を衛星軌道上で実証した。

以上のように本論文は、新たに提案した略半球形状レンズを用いた遮光手法が、スターセンサとしての遮光・結像光学系として有効に利用できることを示したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年11月29日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。