

令和 5 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

昆虫の偏光知覚を模倣した 空の偏光航法に関する研究

令和 6 年 5 月

川崎重工業株式会社

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、川崎重工業株式会社が実施した令和5年度「昆虫の偏光知覚を模倣した空の偏光航法に関する研究」の成果を取りまとめたものです。

0. 研究背景

偏光とは光の横波の振動方向に偏りがある状態を意味する。太陽光そのものは非偏光であるが、地球大気中でのレイリー散乱（光の波長より十分小さい窒素や酸素等の大気分子による光の散乱）により、天空には太陽位置に依存した偏光パターンが形成される。天空の偏光は、太陽が雲に遮られている場合や薄明の時間帯でも太陽の位置を知る手掛かりとなる。実際、砂漠アリ、ミツバチ等の昆虫や渡り鳥が天空の偏光を知覚し、コンパスとして活用していることが知られている。

航空機、船舶等の移動体の航法では、一般に慣性航法（INS：Inertial Navigation System）と衛星測位システム（GNSS：Global Navigation Satellite System）を組み合わせたGNSS/INS複合航法が用いられるが、GNSS電波に対する妨害・干渉、GNSS衛星自体の障害等によりGNSSを利用できない場合、時間の経過に伴いINSの位置誤差が累積する問題がある。一方、天測航法は周辺に利用可能な物標が存在せず、陸地の航法援助施設の電波が届かない洋上においても利用可能といった利点がある。しかしながら、日中に関しては観測できる天体数が少なく、太陽についても雲に遮られている場合には観測が困難になるといった課題がある。

そのため、天空の偏光を活用した天測航法の研究が進むことで、GNSS使用不可能時における航空機、船舶等の航法精度と安全性の向上に寄与することが期待されている。

1. 委託業務の目的

1. 1 研究課題の最終目標

本委託業務では、太陽光がレイリー散乱して生じる天空の偏光パターンを、昆虫を含む一部の生物が知覚していることに着想を得て、偏光パターンに基づく位置の天測と慣性航法を複合化した「偏光航法」の構築を試みる。令和3年度から令和5年度までの業務において、太陽方位及び仰角推定が可能な偏光画像処理及びその推定値を用いた天測/INS複合航法を組み合わせ、偏光航法を設計する。併せて、偏光航法を実行可能な偏光航法試行装置を製作し、移動体上で偏光航法の試行評価を行う。試行評価において、航法精度30kmの実現性の見通しを得るとともに、課題及び対策を示すことを目指す。

1. 2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

1. 1 で示した最終目標を実現するために克服すべき要素課題は、次の通りである。

(1) 偏光画像処理による太陽方位及び仰角推定

偏光航法では、姿勢・方位角が時間変化する移動体上の偏光カメラで天空の偏光パターンを撮影し、撮影された偏光画像をもとに、天測に使用する太陽方位及び仰角を推定する必要がある。ここで、静止状態の偏光カメラによる太陽方位及び仰角推定については先行研究で報告されているが、移動体に搭載した場合など偏光カメラの姿勢・方位角が時間変化する場合に対応可能な画像処理には至っておらず、その設計手法の確立が技術課題となっている。

(2) 天測と慣性航法の複合化

従来の移動体の航法では、GNSS/INS複合航法が一般的である。これに対し本研究課題では、GNSSを偏光に基づく天測に置き換えた構成により、慣性航法で発生する位置の累積誤差の低減を試みる。ここで、偏光に基づく天測は、位置に関して得られる情報量、物理量及びノイズ特性がGNSSと異なっており、慣性航法との複合化手法の確立が技術課題となっている。

(3) 偏光航法試行装置の試作

偏光航法を実行するためには、天空の偏光パターンの撮影、移動体の加速度及び角速度の取得、天測に用いる日時取得、偏光画像処理及び複合航法演算を移動体上でリアルタイムに実行できる偏光航法試行装置が必要であり、各構成部品に必要とされる機能・性能の検討方法及び試作方法を明確化することが課題となっている。

(4) 移動体による偏光航法の実証

一般に移動体は、所定の経路の移動及び環境外乱により並進及び回転運動を行うが、こうした運動は移動体上に搭載される偏光カメラによって撮影される偏光画像の撮影範囲や振れに影響すると考えられる。このため、実環境である移動体上で偏光航法の航法精度を実証するとともに、偏光航法の運用条件を明確化することが課題となっている。

1. 3 要素課題に対する実施項目及び体制

1. 2 で示した要素課題に取り組むために、以下の項目を実施する。

(1) 偏光画像処理の設計（要素課題(1)に対応）

偏光パターンが撮像された偏光画像に対し、偏光カメラの姿勢・方位角が時間変化した場合においても太陽方位及び仰角推定が可能な偏光画像処理の設計を試みる。レイリー散乱モデルに基づく偏光パターンの特徴を利用しつつ、偏光カメラのレンズ光軸方向に対する天空光の入射方向及び偏光方向の関係に基づいて、太陽方位及び仰角をそれぞれ推定する。設計後、偏光航法試行装置に実装し、実施項目(4)で行う試行評価によって、姿勢・方位角が時間変化する状態で太陽方位及び仰角を推定可能か確認する。

(2) 天測/INS複合航法の設計（要素課題(2)に対応）

太陽方位及び仰角を用いた位置の天測と慣性航法を組み合わせた複合航法の設計を試みる。移動体の航法で通常用いられる拡張カルマンフィルタの枠組みで設計を行いつつ、観測方程式の定式化や設計パラメータの調節においては、GNSSが偏光パターンに基づく天測に置き換わることで生じる差異を反映する。設計後、実施項目(1)と合わせて偏光航法のシミュレーション環境を構築し、慣性航法のみの場合に発生する位置の累積誤差が偏光航法により低減されるか確認する。さらに偏光航法試行装置に実装し、実施項目(4)で行う試行評価によって、位置の累積誤差の低減効果を確認する。

(3) 偏光航法試行装置の製作（要素課題(3)に対応）

移動体上でリアルタイムに偏光航法を実行可能な偏光航法装置の製作を試みる。本装置は、天空全体の偏光パターンを撮影するための偏光カメラ及び魚眼レンズ、移動体の加速度及び角速度を取得するための慣性センサ、天測で使用する時計及び各種演算用計算機等から構成されるものであり、計算機については、偏光航法の設計、データ解析、状況モニタ及びプログラムの実装が可能な各種ソフトウェアを搭載する。なお慣性センサについては、偏光航法の出力値に対するリファレンスとして使用するために、GNSS単体出力及びGNSS/INS複合航法の出力を備えたものを用いる。

本装置の製作においては、偏光航法のシステム構成に基づいて各構成部品に必要とされる機能・性能を検討の上、偏光画像及び慣性センサ出力のデータを取得するための「①データ取得機能」、偏光航法のオフライン・シミュレーションを実行するための「②オフライン処理機能」、偏光航法を移動体上でリアルタイムに実行するための「③リアルタイム処理機能」の3段階に分けて製作を実施する。

(4) 偏光航法の試行評価及び精度向上（要素課題(4)に対応）

実施項目(3)で製作した偏光航法試行装置を使用して、設計した偏光航法の実環境における航法精度を評価するための試行評価を行う。試行評価では、偏光航法試行装置を地面に静止させて行う静的試験と移動体搭載による動的試験を実施して、偏光航法の位置推定データを取得し、リファレンスであるGNSS/INS複合航法の出力と比較することで航法精度を評価する。併せて、取得データを活用した偏光航法の処理内容の改良による精度向上を試みる。航法精度30kmの実現性の見通しを得ることを目指すとともに、移動体の運動、天候、時間帯等に関する運用条件について知見を得る。

(5) プロジェクトの総合的推進

各要素課題に関する研究の進捗を管理し、各実施項目を効率的に推進する。本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究のさらなる進展に努める。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

研究開始時に設定した研究目標の達成度を以下に示す。なお、詳細については3項に記載する。

(1) 偏光画像処理の設計 … 達成度100%

カメラ姿勢が考慮された天空の偏光パターンの模擬画像と実画像の画像照合により、カメラ光軸が天頂を向いていない場合でも適用可能な太陽位置推定アルゴリズムを設計した。模擬画像生成については、研究当初は従来のレイリー散乱モデルを使用予定であったが、高い推定精度を得ることを狙い、大気エアロゾル等による多重散乱で生じる偏光中立点が考慮されたベリーモデルを導入し、従来手法と比べて太陽仰角誤差が1オーダー小さくなることを明らかにした。

(2) 天測/INS複合航法の設計 … 達成度100%

太陽方位及び仰角を観測量とした拡張カルマンフィルタによる天測/INS複合航法を設計した。太陽と移動体の幾何学的な位置関係に基づく条件判定を組み込み、シミュレーションによりINSにおける位置の累積誤差が低減可能であることを確認した。

(3) 偏光航法試行装置の製作 … 達成度100%

偏光航法のシステム構成に基づいて各構成品を選定し、それらと本研究の中で製作した撮影時刻取得装置及び移動体搭載装置（車載装置）を組み合わせ、偏光航法試行装置を製作した。画像処理には高速化のため計算機のGPU（Graphics Processing Unit）を利用し、偏光航法のリアルタイム処理に必要な機材とその構成方法を明確化できた。

(4) 偏光航法の試行評価及び精度向上 … 達成度75%

車載による試行評価試験を実施し、偏光航法によりINSにおける位置の累積誤差を低減させる定性的な機能については世界初の実証に成功した。一方、設計で考慮されていない大気エアロゾルの性質の影響と見られる太陽仰角誤差が影響し、定量的な目標精度の達成には至らなかった。大気エアロゾルの地上観測サイト付近で試験を計画・実施したことで、エアロゾルデータを活用した解析による誤差原因把握と対策方針の検討が進んだため、達成度は75%とした。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

本研究における実施項目(1)～(4)のそれぞれについて、研究開始から終了までの全期間を通じて研究の方法及び成果を以下に示す。

(1) 偏光画像処理の設計

(1)-1 設計方針

偏光画像処理は、天空の偏光パターンが撮像された偏光カメラ画像から太陽位置（方位角及び仰角）を推定する処理であり、その推定精度が天測による位置精度を決定するため重要な要素である。本研究では高精度を得ることを狙い、天空の偏光パターンのモデルに基づいて偏光カメラ画像を再現した模擬画像を生成し、模擬画像と実画像の画像全体を比較する画像照合による太陽位置推定アルゴリズムを設計した。偏光カメラでは、偏光強度を表すDOLP（Degree of Linear Polarization）画像と偏光方向を表すAOP（Angle of Polarization）画像の2種類が取得できる。この2種類のうち、偏光パターンに対してノイズとなる雲の影響が比較的小さいことからAOP画像を画像照合の対象として選択した。

(1)-2 偏光中立点を考慮した模擬画像生成

画像照合では、実際の偏光パターンを正確に模擬したモデルを使用して、模擬画像を生成する必要がある。大気分子による散乱のみが考慮されたレイリー散乱モデルは、天空の偏光を利用した太陽位置推定に関する先行研究でよく用いられている。レイリー散乱モデルにおける偏光方向は、太陽の方向と散乱点（観察対象とする天空上の位置）の方向が成す平面に対して直交する方向として定義される。また、偏光強度は太陽位置でゼロ（非偏光）であり、太陽から90°離れた位置で最大となる。本研究においても研究当初はこのモデルを使用する想定であった。

一方、現実の偏光パターンでは、大気中を漂うエアロゾルによる多重散乱と地表面での反射によって、太陽位置ではなく、太陽子午線上の2箇所で偏光強度がゼロになることが知られており^[1]、これらは偏光中立点と呼ばれる（図1）。太陽が高い

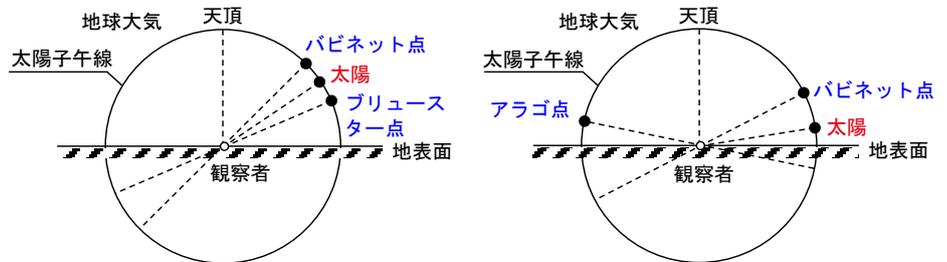


図1 観察者を原点とした天球上における偏光中立点の位置
(左：太陽が高い場合、右：太陽が低い場合)

場合は、太陽の上側にバビネット点、下側にブリュースター点と呼ばれる中立点が出現する。太陽が低い場合は、ブリュースター点が地平線下側に隠れ、太陽の反対方向からアラゴ点と呼ばれる中立点が出現する。本研究で実際に偏光カメラを用いて撮影した天空画像を図2に示し、レイリー散乱モデルによる模擬画像を図3に示す。レイリー散乱モデルにより現実の偏光パターンが概ね再現されるが、中立点が考慮されないため、中立点付近のAOPに差があることが分かる。

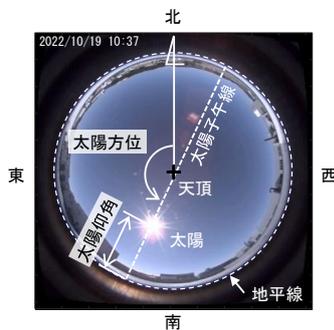


図2 偏光カメラ画像（左：輝度画像、右：AOP画像）

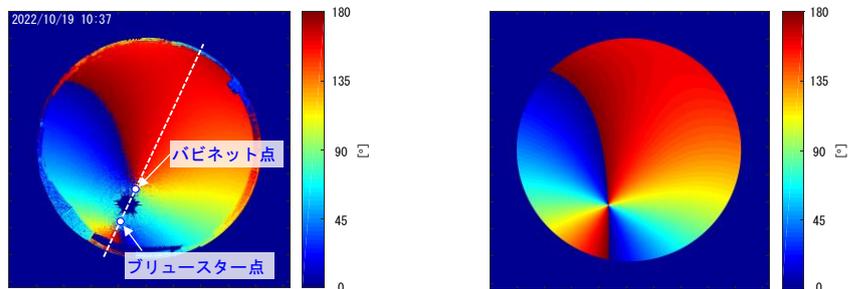


図3 レイリー散乱モデル

そこで本研究では、太陽方位及び中立点仰角をパラメータとした偏光パターンの生成が可能なベリーモデル^[2]に基づいて模擬画像のAOPを計算した。中立点仰角については、多重散乱が考慮された放射伝達方程式の解析解の数値テーブル^[3]を用いて、太陽仰角 (EI)、エアロゾルの光学的厚さ (τ) 及び地表面アルベド (α) の合計3つを入力とした中立点仰角のルックアップテーブル（以下、「中立点仰角テーブル」と記す。）を作成し、テーブルの内挿補間で算出した中立点仰角をベリーモデルに入力する構成とした。また、ベリーモデルで算出されるAOPは地面固定座標に対する角度であるため、カメラ姿勢（直交3軸周り）を考慮した適切な座標変換を行い、画像上のすべてのピクセル位置について偏光カメラで計測されるAOPを求めた。以上の処理による模擬画像の生成フローを図4に示す。この生成フローにより、中立点及びカメラ姿勢が考慮された模擬画像が生成されている。

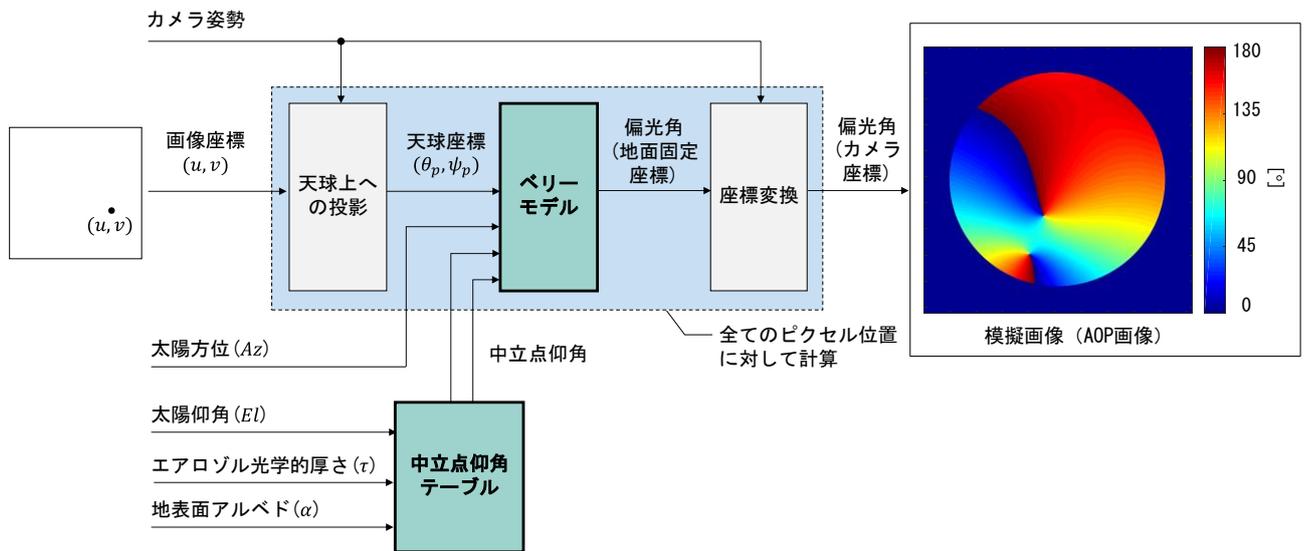


図4 ベリーモデルによるAOP画像の生成フロー

(1)-3 画像照合による太陽位置推定処理の設計

前項の模擬画像を用いた画像照合による太陽位置推定処理を設計した。本研究では、 0° 、 45° 、 90° 及び 135° 方向の直線偏光フィルタとRGBカラーフィルタがレイヤーされたCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 撮像素子を備えるRGBカラー偏光カメラを使用した。また、レンズには広視野撮影に適した魚眼レンズを使用した。

まず、RAW画像からAOP画像及びDOLP画像を生成するまでの前処理の内容について説明する。前処理では、始めにRAW画像に対してフィルタ配列に応じたデモザイク処理を行い、12チャンネル (偏光方向 $4 \times$ 色成分 3) の画像を生成した。次に、各画像に対してカメラキャリブレーションで事前に取得した歪パラメータを用いて、今回のレンズの理想的な射影方式である等距離射影方式に従う画像に補正した。続いて、偏光CMOS撮像素子のキャリブレーション結果 (4.1項に後述) に基づいて、偏光フィルタの透過率に対する補正を行った。その後、補正された12チャンネルの画像から、RGB毎のAOP画像及びDOLP画像並びにRGB輝度画像に変換した。さらに、RGB輝度画像に対して青空領域の識別処理^[4]を適用し、AOP画像における青空領域以外のピクセル位置をマスクした。青空領域の識別処理については、実施項目(4)において周囲の構造物・樹木等の写り込みや雲の影響の抑制に効果的であることが確認され、本研究で確かめられたモノクロ偏光カメラに対するカラー偏光カメラの利点の一つである。

画像照合では、非線形最小二乗法の標準的な手法である重み付きレーベンバーグ・マーカート法 (Levenberg-Marquardt algorithm, LM法) を用いて、模擬画像と実画像のAOPの差分を最小化する太陽方位及び2つの中立点仰角を算出した。DOLPが大きいほどAOPのSN比 (信号対雑音比) が良くなることを考慮して、DOLPが大きい画素に大きな重みを設定した。推定された

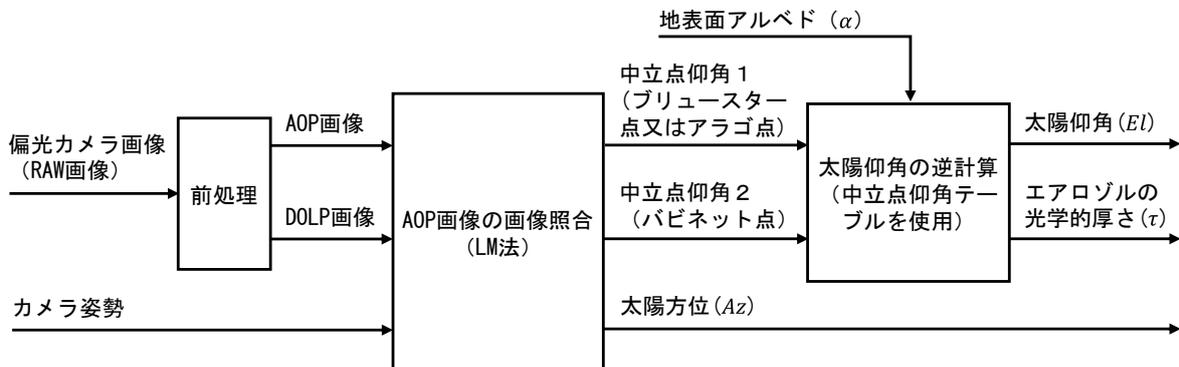


図5 偏光画像処理の構成

2つの中立点仰角に対し、上述の中立点仰角テーブルを利用することで太陽仰角を逆計算した。逆計算の際には、エアロゾルの光学的厚さ τ と地表面アルベド α のうち少なくとも一方の値を固定する必要がある。このため、 α については中立点仰角への影響が τ と比べて小さいことを考慮し、本研究においては撮影場所の地面を考慮した一般的な値を設定し、既知のパラメータとして扱うこととした。

上記の処理内容による偏光画像処理の構成を図5に示す。

(1)-4 実画像による検証

設計した偏光画像処理の動作検証として、偏光航法試行装置（実施項目(3)で製作）を用いて偏光カメラ画像を含む各種データを取得し、オフライン処理で太陽位置の推定結果を確認した。データ取得は川崎重工業（株）岐阜工場（緯度 35.4039° 、経度 136.8741° 、標高95m）で実施し、2022年10月19日の日の出～日の入りにおいて10分間隔で撮影した画像に対して解析を行った。画像の波長チャンネルについては、陸地において長波長成分を多く含む地面反射光の影響を避けるため、B成分（波長：約460nm）を使用した。地表面アルベドの値については、撮影場所の地面（アスファルト舗装、砂利等）を考慮して $\alpha = 0.2$ に設定した。カメラ姿勢については、IMU（Inertial Measurement Unit）の加速度センサ信号を用いたレベリング演算及びGNSSコンパスから取得した。太陽位置の推定誤差の計算に用いる太陽位置の理論値については、GNSSによる緯度・経度及び日付・時刻から計算した。

太陽位置の推定結果を図6に示す。レイリー散乱モデルを用いる従来手法と比べ、ベリーモデルを用いた提案手法により、太陽仰角の最大誤差が 3.4° から 0.4° に大幅に低減されることが分かった。太陽方位については、両モデルにおいて特に6時～9時頃で負側に誤差があり、偏光CMOSセンサの特性の変化が影響した可能性がある（4.1項に後述）。図6の破線に示す時刻(a)～(e)における偏光カメラ画像を図7に示す。マーカーで示されるように、太陽が建物に遮られる日の出・日の入りの時間帯を含め、太陽位置が推定されていることが確認できる。

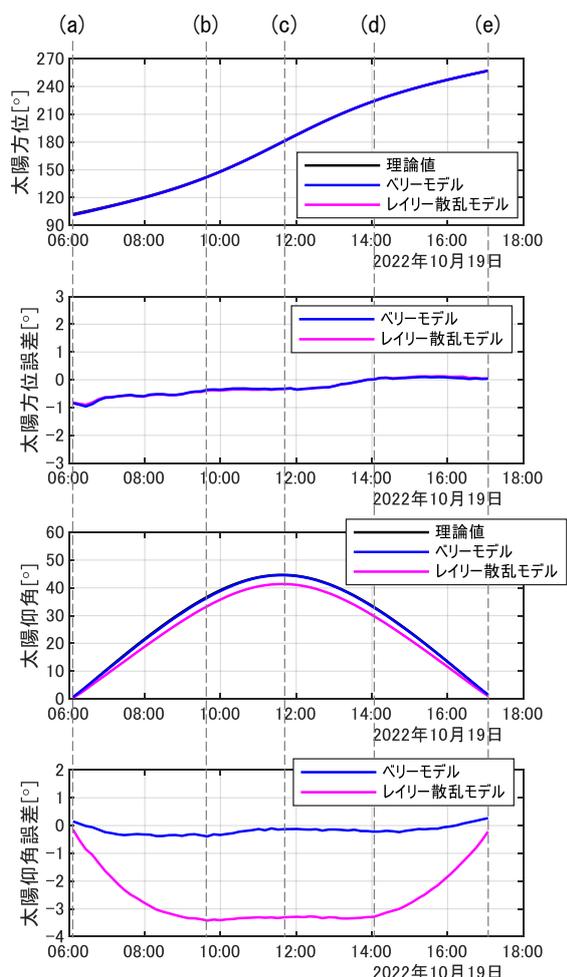


図6 太陽位置の推定時歴

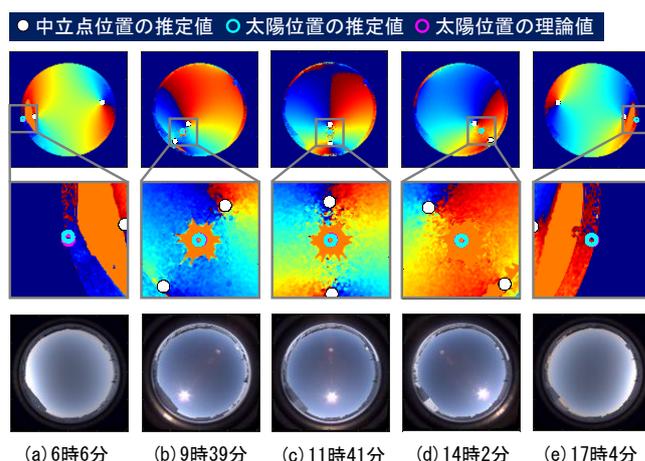


図7 各時刻における偏光カメラ画像（上段：AOP画像、中段：拡大図、下段：輝度画像）

(2) 天測/INS複合航法の設計

(2)-1 天測の原理

本研究における天測/INS複合航法の目的は、太陽の方位角及び仰角を用いた位置の天測によ

り、INSにおける位置の累積誤差を低減させることである。GNSS普及以前から行われてきた六分儀による天測航法では、二つ以上の天体の仰角を同時観測し、各天体から得られる位置の線（LOP: Line Of Position）の交点から緯度・経度を求める方法や、朝方、正午、夕方のうち正午を含む2回の太陽隔時観測により同様に2本のLOPから位置を求める方法が一般的である。一方、本研究では一つの天体の1回の観測から緯度・経度を求めるものであり、その原理は図8に示されるように、太陽仰角から決まるLOP（赤線）と太陽方位から決まるLOP（青線）の交点を求めることに対応する。

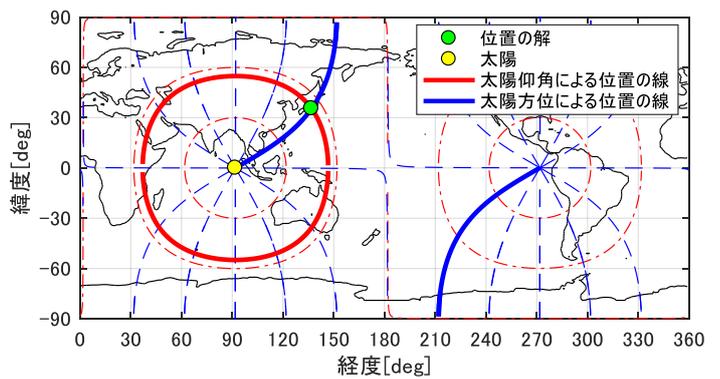


図8 太陽の観測による緯度・経度の天測の原理

(2)-2 拡張カルマンフィルタによる天測/INS複合航法の設計

天測/INS複合航法における慣性航法計算については、IMUのジャイロセンサ及び加速度センサ信号を入力とした従来のストラップダウン方式で設計を行った。鉛直方向についてはIMUの気圧センサ信号から得られる気圧高度を用いた高度補正を追加した。また、方位角については、設計当初では光ファイバジャイロによる中グレードのIMUを使用することから、慣性航法計算による真方位を直接使用する構成としたが、実施項目(4)の試行評価において想定よりもドリフト誤差が増大したため、IMUの地磁気センサ信号から得られる磁方位を用いた方位補正を追加した。INS単独の場合、加速度センサ誤差、ジャイロセンサ誤差、初期アライメント誤差等が要因となり、位置誤差はシューラー周期（84.4分）で振動しながら経過時間にはほぼ比例して増大する。

これに対して、偏光画像処理で推定される太陽方位、太陽仰角及び撮影日時を入力とした拡張カルマンフィルタ（EKF: Extended Kalman Filter）によりINS緯度・経度誤差を補正する天測/INS複合航法を設計した（図9）。上述の2本のLOPによる天測に相当する処理は、EKFの観測更新の中で実行される。ここで、太陽のように無限遠に存在する天体による天測航法では、原理的にINSのシューラー振動が残留することが知られており^[5]、今回の複合航法は位置の累積誤差のみが除去される構造となる。磁方位から真方位への変換に用いる磁気偏差の計算については、INS出力でなく前フレームの偏光航法出力の緯度・経度を使用し、経過時間に依存して位置誤差が増大しないシステムを構築した。

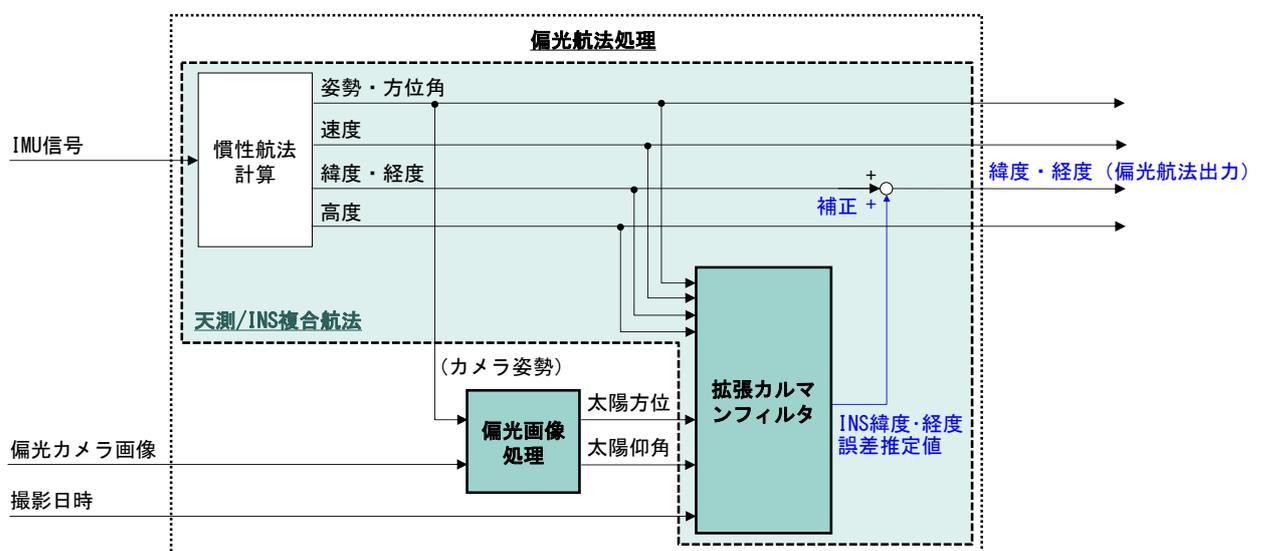


図9 拡張カルマンフィルタによる天測/INS複合航法

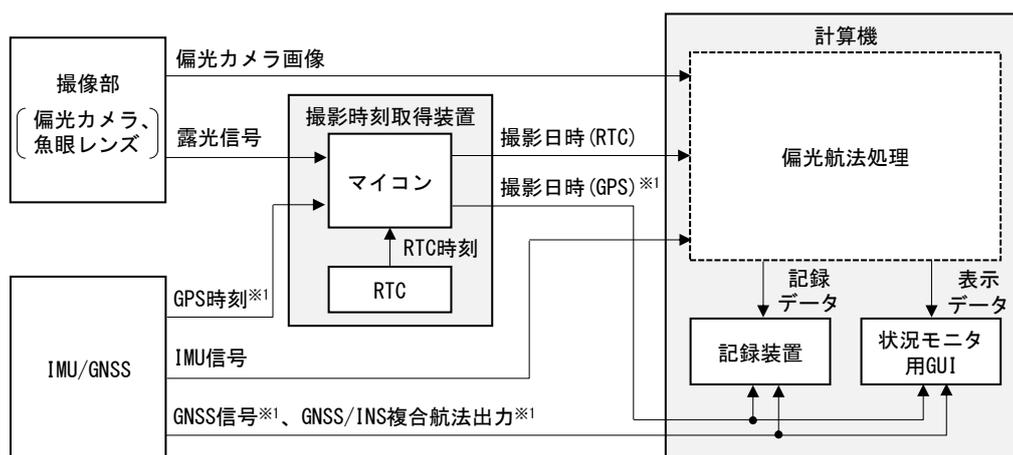
太陽一天体による天測では、時間帯で変化する太陽と移動体(観測者)の幾何学的な位置関係(図8)に依存して、天測で得られる位置の精度低下率(DOP: Dilution Of Precision)が大きく変化する。DOPの値は太陽位置と緯度から計算でき、基本的に太陽が高いほどDOPが良好となる。逆に、例えば春分の日の出・日の入り時刻では緯度に依らず太陽が真東又は真西に見えるため、太陽位置から緯度を天測することが不可能となる。このようなDOPの変化への対処として、本研究ではDOPが閾値より小さい場合にのみ拡張カルマンフィルタの観測更新を実行する条件判定を組み込み、条件が良いタイミングでのみ天測が実行される処理とした。

設計後、IMU信号及び太陽位置にノイズを与え、航空機を想定した天測/INS複合航法のシミュレーションを行い、意図通り昼間の時間帯に位置の累積誤差が低減されることを確認した。

(3) 偏光航法試行装置の製作

(3)-1 システム構成検討

偏光航法試行装置を製作するにあたり、始めに偏光航法の処理内容(図9)をもとに必要な機能と構成品を検討し、装置全体のシステム構成を図10のように定めた。撮像部(偏光カメラ及び魚眼レンズ)により偏光カメラ画像を取得し、IMU/GNSSによりIMU信号とリファレンス用のGNSS信号及びGNSS/INS複合航法出力を取得する。また、撮影時刻取得装置において、偏光カメラの露光信号とリアルタイムクロック(RTC: Real Time Clock)信号を用いて、天測に用いる撮影日時(シャッター開閉時刻)を取得する。計算機において、各種入力信号を同期して偏光航法処理を実行し、データを記録するとともに処理状況をGUI(Graphical User Interface)に表示する。



※1 偏光航法処理の結果を評価するためのリファレンス信号

図10 偏光航法試行装置のシステム構成

装置製作にあたっては、1. 3項に記載した通り「①データ取得機能」「②オフライン処理機能」「③リアルタイム処理機能」の順に段階的に機能を追加して製作した。以下では研究期間全体での製作内容について、ハードウェア製作とソフトウェア作成の2項目に分けて記載する。

(3)-2 ハードウェアの製作

撮像部及びIMU/GNSSの仕様については、カメラ解像度及びカメラ姿勢の計算に用いるIMU信号の精度がそれぞれ航法精度に影響する。このため、異なる解像度の撮像部及び異なる精度のIMUに対する位置誤差のパラメトリックスタディを行うことで、目標精度からそれぞれの仕様を導出し、仕様を満たす製品を選定した。撮像部については、510万画素のカラー偏光CMOS撮像素子を備えたRGBカラー偏光カメラとし、画角180°を含む2048×2048[pixel]の画像を取得できるように焦点距離1.8mmの魚眼レンズを選定した。IMU/GNSSについては、光ファイバジャイロが搭載された中グレードのIMUによるものを選定した。GNSSについては、静止状態で真方位のリファレンスを取得するためにデュアルアンテナ方式を採用した。計算機については、屋

外で使用することから可搬性のあるノート型とし、GPUによる画像処理の高速化を行うために NVIDIA GeForce RTX3080が搭載されたものを選定した。

撮影時刻取得装置については本研究の中で製作した。通常はストロボの発光に用いられるカメラの露光信号を流用し、露光の開始及び終了時の露光信号のエッジをマイコンで検出した。そして、エッジを検出したタイミングでRTCの日付・時刻を参照することで、ミリ秒刻みの撮影日時を取得した。

図10に含まれる構成品に加え、偏光カメラ、IMU/GNSS本体及びGNSSアンテナのアライメントを固定するために、これらを一体化する筐体を製作した。また、装置を地面に静止させてデータ取得する際に使用するため、支持用の雲台及び三脚を備えた構成とした。さらに、実施項目(4)の試行評価試験に向け、車のルーフキャリア上に装置を搭載するための車載装置を製作した。車載装置には、路面凹凸の衝撃を軽減するために免振機構を搭載した。

偏光航法試行装置の外観を図11に示す。



(a) 静止試験時のセットアップ

(b) 移動試験時のセットアップ

図 11 偏光航法試行装置

(3)-3 ソフトウェアの作成

まず、実施項目(1)の偏光画像処理及び(2)の天測/INS複合航法の設計結果を組み合わせ、計算機上に偏光航法のシミュレーション環境を構築した。偏光画像処理の中で特に処理負荷の高いベリモデルによる模擬画像生成については、計算機のGPUを用いた並列化を行い、1枚のRAW画像から太陽位置推定完了まで4~8秒程度であることを確認した。この結果を考慮し、撮影周期を2倍程度の余裕を持たせた20秒に設定した。また、上記の画像処理時間における地球の自転と移動体の緯度・経度変化で生じる太陽位置の変化量を計算し、その値を画像から推定される太陽位置に加算することで、画像処理時間による遅れの影響を除去した。

偏光航法のシミュレーションを行うためには、実際の入力信号であるRAW画像の模擬画像を生成する必要がある。このため、ベリモデルによるAOP及びDOLPの計算に対して一般的なスカイモデルによる天空光の輝度計算を組み合わせた。さらにCMOSセンサのフィルタ配置、空間分解能(解像度)、量子化誤差、画像歪み、焦点ぼけ及びホワイトノイズを考慮してRAW画像を生成した。そして、このRAW画像の模擬画像とIMU信号及び撮影日時の模擬信号を入力とした偏光航法のシミュレーションを行い、偏光航法処理が一通り実行できることを確認した。

続いて、実時間で各種信号を計算機に取り込んで偏光航法処理を実行するためのリアルタイム処理用ソフトウェアを作成した。偏光航法処理のMATLABコードをC++コード又はCUDA(Compute Unified Device Architecture)コードに変換し、各機器との入出力処理と統合して実行ファイルを作成した。データ記録については、RAW画像の保存処理と各種数値データをCSVファイルに書き込む処理を作成した。また、各種データの取得状況及び計算状況をモニタするためのGUIを作成した。

以上の製作作業により、今回の偏光航法の実施に必要な装置を一通り製作できた。本装置は実施項目(4)の試行評価において移動体上で数時間以上動作することが確認できており、偏光航法のリアルタイム処理に必要な機材とその構成方法について一例を示すことができたといえる。

(4) 偏光航法の試行評価及び精度向上

(4)-1 試行評価試験の実施

製作した偏光航法試行装置の動作とその航法精度の確認を目的に試行評価試験を実施した。試験場所については、偏光カメラ画像の取得とともに中立点仰角のパラメータである大気エアロゾルの光学的厚さ (τ) を取得することで、後解析による精度向上の検討に繋げることを狙い、 τ を計測しているAERONET (AErosol RObotic NETwork) 観測サイト付近で実施する計画とした。試験時期に稼働中であった国内AERONET観測サイト全11か所の候補の中で、①晴天率が高い、②局所的な人為起源エアロゾルの影響が少なく航空機・船舶が航行する洋上の環境に近い、③研究拠点である岐阜からの進出時間が短い、の理由から試験場所を南紀白浜に選定した。試験項目としては、航法精度の評価に必要な各種データを取得するための車載による「移動試験」、及び移動体搭載の影響を明確化するために装置を地面に静止させて行う「静止試験」の2項目とした。

2023年10月16日～19日において南紀白浜にて試験を実施し、各種データを取得した。天候については、移動試験及び静止試験の1回目は快晴であり、静止試験の2回目は晴れのち曇りであった。

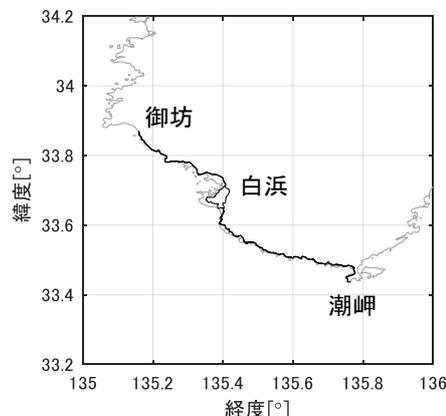


図 12 移動試験の走行経路

試験実施時のセットアップ状況については図11の通りである。電源はポータブル電源から供給した。移動試験における走行経路については、INSの位置誤差が十分累積する時間を確保するため、白浜⇒御坊⇒潮岬⇒白浜の経路(図12)を約6時間半で走行した。EKFの観測更新の実行条件であるDOPの閾値については、暫定的に1.4を設定した。

移動試験における位置誤差の時歴を図13に示す。偏光航法は位置誤差が累積しない設計であるため、DOPが閾値未満となる時間帯における位置のRMSE (Root Mean Squared Error) を評価した。INSの位置誤差が158km/hrのレートで増大し続けるのに対し、偏光航法では約198km (南北誤差:193km、東西誤差:47km) の位置誤差に低減されることを確認した。天空の偏光を用いて緯度・経度を低減させる偏光航法の定性的な機能を実証した例としては本研究が初めてであり、一定の成果が得られたといえる。一方、精度については目標とした30kmに対しては課題が存在することが分かった。

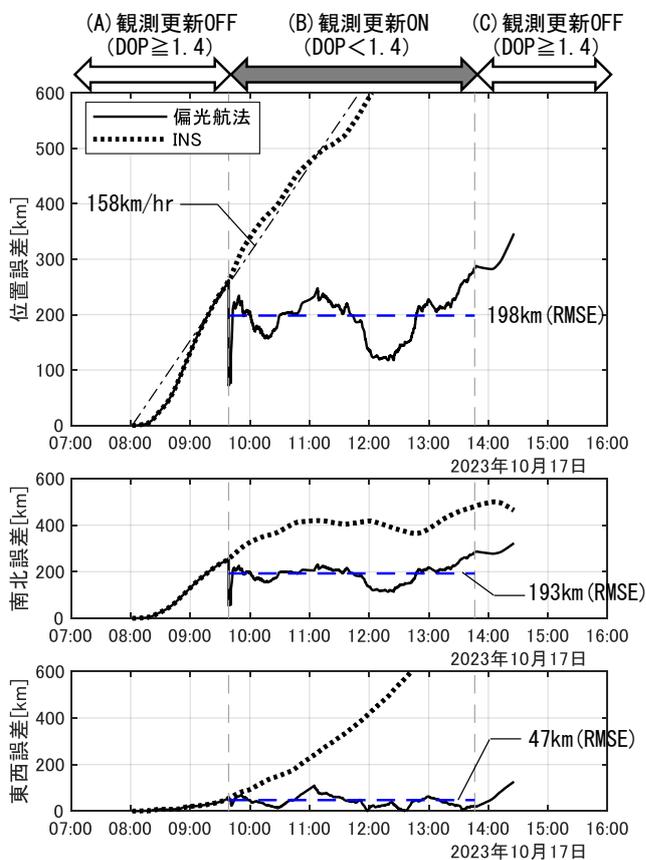


図 13 移動試験における位置誤差の時歴

(4)-2 精度向上の検討

今回取得したデータを用いて、精度向上に向けた誤差要因分析と対策検討を行った。偏光航法における主な誤差要因は、カメラ姿勢の計算に用いる移動体の①ロール角、②ピッチ角、③真方位角、偏光画像処理で推定される④太陽方位、⑤太陽仰角、及び⑥時刻の6つに分けられる。観測更新が実行された9時38分から13時46分までについて、GNSS/INS複合航法出力及びGPS時刻をリファンレンスとして、各要素の誤差量を時歴のRMSEとして求め、それぞれを位置誤差に換算した。さらに、最終的な位置誤差の概算値として、6つの要素の位置誤差からRSS (Root Sum Square) を計算した結果、移動試験の結果と同程度である216kmが得られた。上記の計算について研究当初の想定値または目標値と比較した結果を図14に示す。上記①②③の姿勢・方位角誤差が想定より大きな値であったことも位置誤差に影響しているが、主要因は⑤の太陽仰角における 1.77° の誤差(図15参照)であることが確認された。

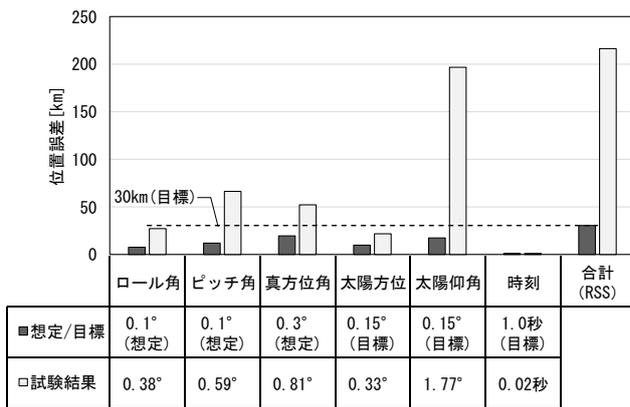


図 14 位置誤差の要因分析結果

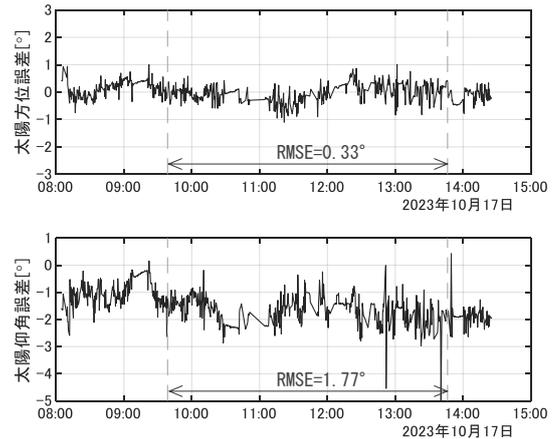


図 15 移動試験における太陽位置誤差

移動試験における太陽仰角の誤差について、静止試験の1回目のデータ及び岐阜で取得済みのデータに対する解析結果と比較した(図16)。いずれも晴天日に取得したデータであり、2023年4月13日については一時的に雲量が増大した時間帯の数点のデータを取り除いている。比較の結果、移動試験で発生した太陽仰角の比較的大きな誤差は、同じ南紀白浜で実施された静止試験でも同様に発生しているが、岐阜においては黄砂が飛来した2023年4月13日を除いて発生していないことが確かめられた。このことから、南紀白浜で発生した太陽仰角の誤差要因は大気エアロゾルの組成によるものと考えられ、岐阜では大陸性エアロゾルが主要成分である一方、南紀白浜では海洋性エアロゾルを多く含むことが影響していると推察された。

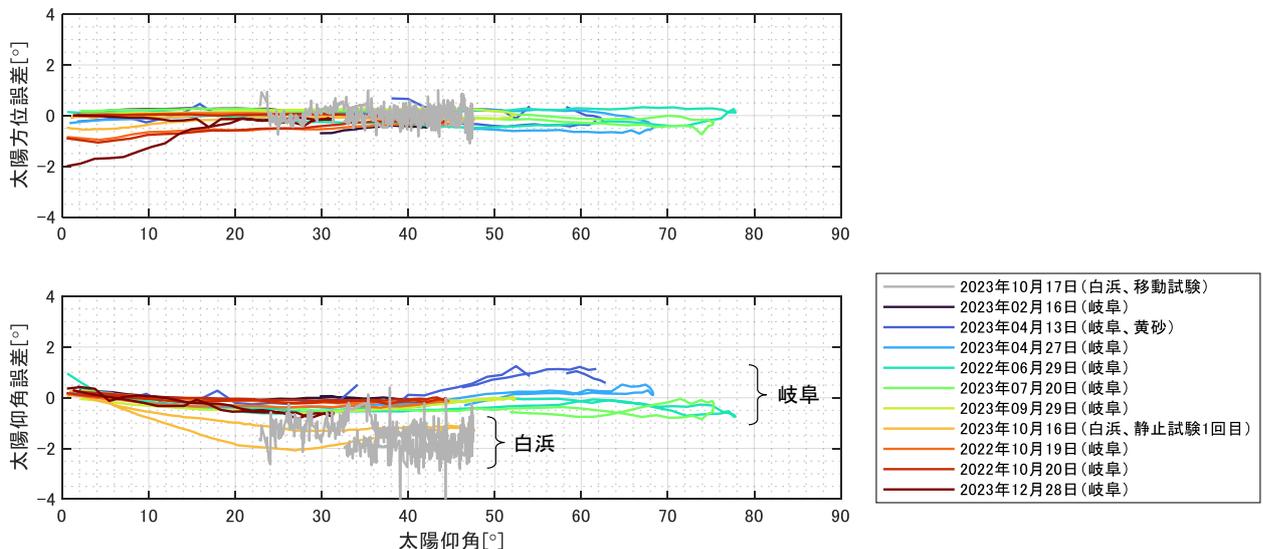


図 16 南紀白浜及び岐阜における太陽位置の推定誤差

南紀白浜における静止試験の1回目取得したデータについて、AERONETデータを活用することで中立点仰角の理論値を計算した。この計算では、AERONETデータから得られる440nm及び500nmにおけるエアロゾルの光学的厚さ τ を用いた内挿計算により、偏光カメラのB波長(約460nm)の τ を求めた。そして、求めた τ と太陽位置の理論値を中立点仰角テーブルに入力し、中立点仰角の理論値を求めた。推定値との比較結果を図17に示す。中立点の推定値は、理論値よりも太陽又はその対蹠点から離れた方向に位置しており、特に地平線側の中立点(ブリュースター点又はアラゴ点)で顕著な差が見られた。一方、偏光カメラ画像上では、理論値よりも推定値の方が偏光パターンから観察される中立点に一致していることが確認された。この結果から、今回の理論値の計算ではエアロゾルの鉛直分布や地面反射の影響が詳細に考慮されていないため、観察される中立点とは異なる位置に計算されたと考えられる。また同時に、2つの中立点の位置のみで多重散乱を表現するベリーモデルの適用限界も示唆される。

対策方針としては、大気エアロゾルの組成・鉛直分布、地面反射の影響等が詳細に考慮された大気放射モデル(libRadtran^[6]等)を用いた解析により中立点仰角と偏光分布の差異が再現されるか確認し、その結果を太陽位置推定アルゴリズムに反映させることが挙げられる。また必要に応じて、試行装置に対して大気エアロゾルや地表面アルベドに関する計測機材を追加することも視野に入れる必要があると考えられる。

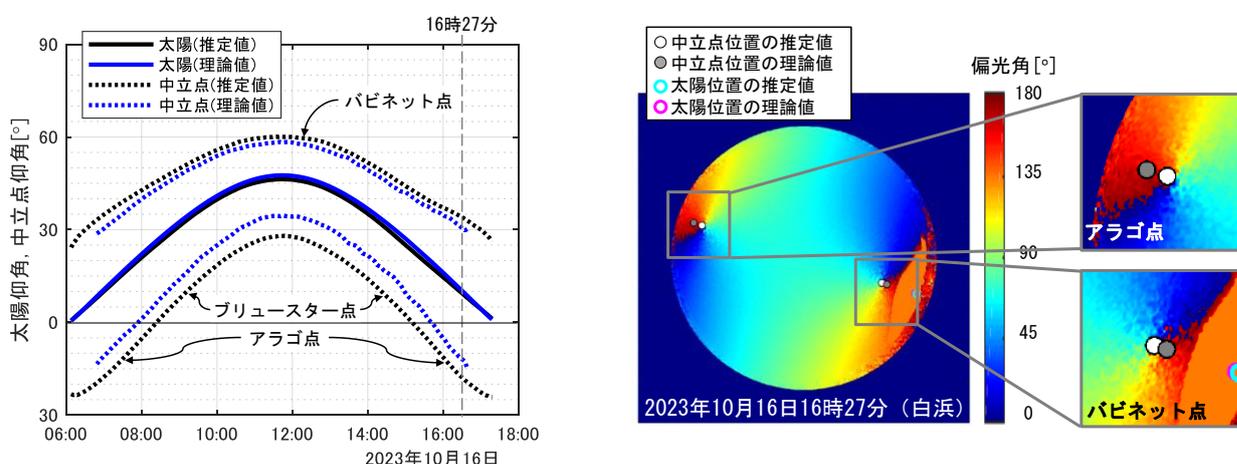


図17 中立点の理論値と推定値の比較(静止試験1回目)

(4)-3 運用条件に関する考察

本研究では、研究期間を通してさまざまな条件下で偏光画像データを取得し、運用条件に関するいくつかの知見が得られた。まず、移動体搭載の影響に関しては、図6と図15の比較から示されるように、移動試験では太陽位置の推定値に高周波な変動が加わっている。この理由は、移動試験では周囲の構造物・樹木等によって使用可能な天空領域が制限されるタイミングがあるためである。一方、偏光航法で出力される位置(図13)には高周波成分が乗っていないことから、こうしたノイズは拡張カルマンフィルタの中で除去されることが確認できた。

移動体の運動の影響に関しては、今回の移動試験では移動速度が時速約60km/h、移動体方位の変化率が最大約 $20^{\circ}/s$ であったが、これらの値の大きさと太陽位置誤差との相関は見られなかった。この結果は、偏光カメラの露光時間が2~4msであり、画像ぶれは最大でも 0.08° と計算できることから妥当な結果といえる。

太陽高度は季節と観測者の緯度によって大きく変化する。特に、低緯度地域では太陽が天頂に近くなり、太陽仰角 90° のとき太陽方位が不定となる。本研究では、夏至に近い時期に撮影した最大太陽仰角 78° における偏光カメラ画像から、太陽位置を推定できることを確認した(図18)。この結果から、少なくとも日本を含む中緯度では年間を通じて本研究のアルゴリズムが適用できることを確認できた。ただし、図16に示されるように、太陽仰角が約 45° 以上になる時間帯では太陽位置誤差が若干大きくなる傾向があることが分かった。

南紀白浜における静止試験の2回目では、11時頃から雲量が増加した。一日を通して晴天で

あった1回目との比較を図19に示す。雲量が増加した時間帯では、太陽位置の推定誤差が $\pm 1^\circ$ 程度で変動することが確認された。一方、夕刻では天空の5割以上が雲に覆われているが、比較的精度が安定する傾向が見られた。使用可能な天空領域や雲の種類と精度の関係については解析の余地があり、今後の課題の一つである。航空機では雲の上を飛行する場合には雲の影響を回避できるが、船舶においては雲の影響の抑制がより重要になると考えられる。

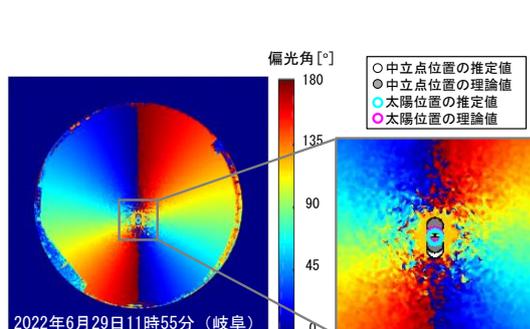


図 18 太陽仰角 78° における太陽位置推定

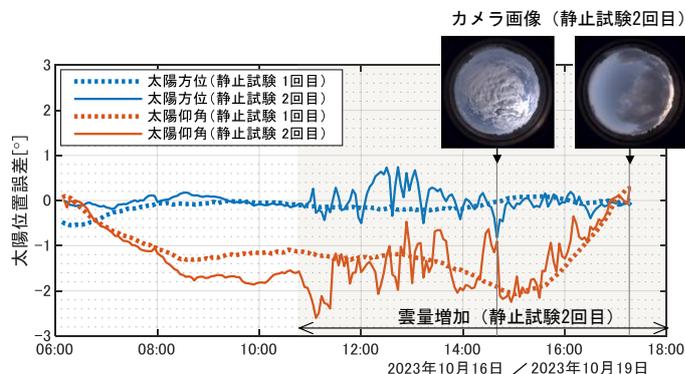


図 19 雲量増加時における太陽位置推定

参考文献

- [1] G. Horváth, B. Bernáth, B. Suhai, A. Barta and R. Wehner, “First observation of the fourth neutral polarization point in the atmosphere,” *Journal of the Optical Society of America*, Vol.19, No.10, pp.2085-2099, (2002).
- [2] M. V. Berry, M. R. Dennis and R. L. Lee, “Polarization singularities in the clear day sky,” *New Journal of Physics*, Vol.6, Paper No. 162, (2004).
- [3] V. Natraj, KF. Li and Y. L. Yung, “Rayleigh Scattering in Planetary Atmospheres: Corrected Tables Through Accurate Computation of X and Y Functions,” *Astrophysical Journal*, Vol.691, No.2, pp.1909-1920, (2009).
- [4] 山下恵, 吉村充則, “全天カメラを用いた空の状態観測手法の開発”, *写真測量とリモートセンシング*, Vol.47, No.2, pp.50-59, (2008).
- [5] S. Levine, R. Dennis and K. L. Bachman, “Strapdown Astro-Inertial Navigation Utilizing the Optical Wide-angle Lens Startracker”, *Proceedings of the National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, pp.169-176, (1990).
- [6] B. Mayer and A. Kylling, “Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use”, *Atmos. Chem. Phys.*, Vol.5, pp.1855-1877, (2005).

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

偏光画像処理の設計における太陽位置の推定精度を追求する過程で、太陽位置の理論値から計算したベリーモデルに基づく模擬画像とカメラ画像のAOPの比較により、CMOSにおける偏光フィルタの透過率の推定を試みた。その結果、偏光フィルタの透過率の約1%程度の僅かなずれを較正でき、カメラ光軸周りの回転角度に依存して発生していた周期的な太陽位置誤差（振幅約 1° ）の大部分が除去されることを明らかにした。この結果は、偏光CMOSセンサの較正において、特別な較正機材を用いずに天空の偏光を利用できる可能性を示す知見であることから、副次的成果として記載する。

また、上記の較正作業において、明け方の時間帯に撮影されたカメラ画像については較正後にも誤差が残ることがあり、一部のデータで太陽方位誤差が大きくなる要因となった（図16参照）。この原因は本研究期間内では特定に至らなかったが、CMOSの温度・湿度等の環境要因による特性変化が考えられ、精密な計測を行う場合には偏光カメラの温度管理や較正パラメータ

に対する温度補正が必要になる可能性があることが分かった。偏光カメラ全般の計測技術に関する知見であるため、この点も併せて副次的成果として記載する。

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

天空の偏光による太陽方位推定については、単純なコンパスとしても活用できる技術であり、米国では近年製品化もされている。本研究においても磁方位を上回る精度が得られており、その有用性を裏付ける結果となった。また、高い太陽仰角でも適用できることや天空の偏光をCMOSセンサの較正にも活用できることを明らかにした点は、天空の偏光を用いた技術分野の進展に寄与するものと考ええる。天測航法への適用に向けては、太陽仰角の推定精度を向上させる必要がある。本研究において、岐阜でなく南紀白浜で試験を実施したことで結果的に位置誤差が大きくなったが、航空機、船舶等が航行する洋上の環境に近いのは南紀白浜である。今回の小規模研究で大気エアロゾルの影響を詳細に考慮する必要があることを確認できた点では有意義な知見が得られたと考える。今回の結果を踏まえ、大気放射モデルによる詳細な解析、大気エアロゾルや地表面アルベドの計測も視野に入れたデータ収集・検証等により、太陽仰角の精度向上に繋がることが期待される。また、航空機、船舶等の天測航法への適用を見据え、洋上、高高度、曇天、薄明時などの条件に関しても研究が進展することが期待される。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

以下の学会発表について、優秀講演賞を受賞

- ・ 磯村直道，“GNSSに依存しない天測航法への適用に向けた天空の偏光分布に基づく太陽位置推定”，第24回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（SI2023），講演番号：1G4-04
- ・ 受賞日：2024年1月23日

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

委託業務の実施にあたっては、年間の作業スケジュール表を作成し、研究実施者間で定期的に進捗状況を確認することで、委託業務の確実な遂行に努めた。

5. 2 経費の効率的執行

試験実施にあたっては、車については社用車、ポータブル電源についてはリース品を使用し、経費の効率的執行に努めた。

6. まとめ、今後の予定

本研究では、天空の偏光を利用した新しい航法の実現に向け、偏光画像処理と天測/INS複合航法を組み合わせた偏光航法を設計し、試行装置の製作及び車載による試行評価試験によりその妥当性を検証した。偏光画像処理の設計では、多重散乱で生じる偏光中立点を考慮するために、ベリーモデルを使用して模擬画像を生成し、実画像と比較することで太陽位置を推定するアルゴリズムを設計した。また、天測/INS複合航法では、拡張カルマンフィルタを用いてINSの位置誤差を補正する設計を行った。試行装置の製作においては、偏光カメラ、IMU、撮影時刻取得装置及び計算機から構成される装置を製作した。車載による試行評価試験の結果、INSにおける位置の累積誤差を低減させる定性的な機能については世界初の実証に成功した。一方、目標とした航法精度を得るには太陽仰角の推定精度を向上させる必要があり、AERONETデータを活用した解析の結果、大気エアロゾルの組成・鉛直分布等が考慮された大気放射モデルによる解析が必要であることが分かった。また、太陽位置の推定精度を追求する過程で、天空の偏光を利用した偏光カメラの較正が可能であることが分かった。今後は、太陽仰角の精度向上や太陽以外の天体の観測を含む天測航法への適用に向けた研究に繋がりたいと考えている。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	該当なし
学会発表	1件
展示・講演	該当なし
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

(2) 知的財産権等の状況

該当なし

(3) その他特記事項

該当なし