

## 論文の内容の要旨

論文題目            無人ビークルの GPS/INS 複合航法に関する研究

氏     名            廣川   類

### 1. はじめに

移動体の位置・速度・姿勢角を得るための航法技術は、無人ビークルの自律的な誘導を実現する上で必要不可欠であり、これまでに広く検討されてきた。

このような背景を元に本論文では、代表的な無人ビークルである無人車（UGV）と小型無人機（UAV）に関する航法技術を整理し、未解決の問題として残っている、無人ビークルの複合航法システムにおいて、小型かつ低コストで高い信頼性、可用性と精度を同時に実現する方策を具体的に提示し、解析、数値シミュレーション、ハードウェア実験などを通じてその有効性と適用範囲を検証するものである。

本論文の対象とする UGV は、工場内の監視用途など建物等の影響により GPS の遮蔽を受けやすい屋外環境で適用されることを想定し、小型 UAV は搭載容量・消費電力の制約の下で従来の航空機搭載用の慣性センサと比べて安定度が大幅に低い慣性センサや低速の計算機が搭載されることを想定する。

### 2. 従来の複合航法技術と課題

数mの位置精度を低コストで実現する衛星航法システム（GPS）は高い可用性と信頼性を有する慣性航法装置（INS）と組みあわせたGPS/INS複合航法システムを構成することにより、すでに航空機用の航法装置やカーナビゲーションシステム等に適用され、広く実用

化されている。また、近年の半導体技術の進歩により、MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems) 慣性センサが開発され、航法システムの小型／低コスト化が可能となっている。一方、GPSの搬送波位相を用いて、干渉測位によりcmレベルの高い精度で相対位置を求めたり、複数アンテナ間の干渉測位により姿勢角を高い精度で得る技術が主に測量用途や低速の移動体向けに実用化されている。

しかしながら、従来のGPS/INS複合航法技術には以下のような課題がある。

- GPSは、4個以上の衛星からの電波を連続的に受信する必要があるが、建物による遮蔽やビークルの高機動運動等により、可用性が失われる場合がある。
- 低コストのMEMS慣性センサは安定度が低く、高い姿勢角精度を得ることができない。また、GPSが不可視となった場合に長時間航法計算精度を維持することが困難である。
- GPS搬送波位相に基づく干渉測位においては、GPS追尾が中断する度に初期化が必要であり、可用性が著しく低下する。特に小型UAVのように高い機動性を有するビークルにおいては初期化が困難であり、信頼度および可用性が低下する。
- GPS/INS複合航法においては、計算負荷が高い行列計算を多用する非線形カルマンフィルタ処理を行う必要があるが、小型・低コスト化の阻害要因となる。

INSを補完するセンサとして、GPS以外にもカメラ等によりローカルランドマークを観測する手法が研究されているが、従来の研究においては、GPSが使用できない場合に別の補完センサに切り替える手法が採用されていた。また、複数のGPSアンテナ間の干渉測位により姿勢角精度を改善するGPSコンパスが実用化されているが、高い機動性を有する無人ビークルへの適用は困難であった。

このように、従来のGPS/INS複合航法においては、可用性／信頼性および精度に関する課題が存在し、無人ビークルにおいて自律型の誘導制御系等を構築する上で課題となっていた。

### 3. 本論文の目的と提案する複合航法

本論文では、建物等のGPS電波遮蔽の影響や、機体旋回ダイナミクス等の影響に関するロバスト性を有し、位置・速度・姿勢角に関する高い航法計算精度と可用性／信頼性を両立する複合航法システムを低いコストで構築することを本研究の目的とする。

本論文では、特に以下の点に着目して記述を行う。

- 複数の特性が異なるセンサ、特にGPS航法に代表される遠距離のランドマークの観測と、近距離の相対観測(ローカルランドマーク)を適切に組み合わせることで、補完に用いる外界センサの入力中断等に対してロバストな推定を行う手法を提案する。
- 搬送波位相GPSを適用し、位置および姿勢角に関して高い推定精度を得ると共に、タ

イトカップリング型 **GPS/INS** を採用することで **GPS** 衛星観測の状態変化や中断に強いシステムを構築する。また、**GPS/INS** の出力に基づき、搬送波位相の効率的探索を行うことで、可用性と高精度の両立を図る。

- 慣性センサの性能や計算機能力が低い低コストで小型のシステムを想定し、位置・姿勢角推定精度等の性能を確保する手法について提案する。

#### 4. 本論文の構成

本論文では、まず第2章において、無人ビークルに適用する **GPS/INS** 複合航法の主要構成要素である、無人ビークルの運動およびセンサに関するダイナミクスおよび誤差、そしてカルマンフィルタに関するモデル化を行う。

以降の章は、本論文で展開する複合航法に関する研究内容の主な適用先である無人車 (UGV)に関する章 (3章および4章) と無人機 (UAV) に関する章 (5章および6章) より構成される。第3章においては、デシメートル級の精度を有し、ローカルなランドマークに基づく観測更新を行うことで可用性を改善するタイトカップリング型搬送波位相 **GPS/INS** 複合航法を提案する。また、第4章では、非線形カルマンフィルタとして **UKF(Unscented Kalman Filter)**を適用することによる精度改善効果を示す。

第5章では、小型UAVに搭載された複数のアンテナ間の干渉測位に基づくタイトカップリング型マルチアンテナ**GPS/INS**複合航法システムを提案する。また、第6章では、小型UAVに搭載する航法システムで課題となるカルマンフィルタの計算負荷低減を目的とした低次元化手法について提案を行う。

#### 5. 得られた知見

第3章では、無人車のダイナミクスモデルと搬送波位相 **GPS** の観測モデルを密に結合し、更にレーザスキャナによるローカルランドマーク更新を行うタイトカップリング型搬送波位相 **DGPS/INS** を提案し、解析、数値シミュレーションおよびハードウェア実験を通じて主に以下のことを明らかにした。

- 提案する方式は可用性／信頼性に優れ、特に **GPS** の可用性が低い劣悪な環境において、性能改善効果が大きく見られた。
- ローカルランドマーク更新を行うことで、可用性および精度の改善効果が確認できた。

第4章では、無人車の複合航法システムに非線形性が強いシステムで大きな改善効果が期待できる **UKF** を適用し、解析、シミュレーションおよびハードウェア実験により、主に以下のことを明らかにした。

- 非線形性が大きいローカルなランドマークによる観測更新に関して、**UKF** による性能改善効果が認められ、特に角度に関するランドマーク観測量を用いる場合の性能改善

効果が大きいことを明らかにした。

- 一方、線形性が強い **GPS** による観測更新に関しては性能改善効果は小さかった。

第5章では、低コストな**MEMS**慣性センサを用いる小型**UAV**における課題である姿勢角推定精度に関して、複数の**GPS**アンテナを用いるマルチアンテナ型タイトカップリング**GPS/INS**により性能が改善されることを示した。本提案方式では、**GPS**コンパスを**GPS/INS**と密に結合させたタイトカップリング方式とすることで、搬送波位相の整数アンビギュイティ推定の探索効率および信頼性を大幅に改善することに成功した。また、性能改善の効果をハードウェアを含むシミュレーションおよびフィールド試験（地上試験および飛行試験）に基づき検証した。

第6章では、同じく低コストな小型**UAV**において、従来の高次の推定フィルタでは計算負荷が高いためにオンボードのマイクロコンピュータにリアルタイム実装することが困難であるという課題に対して、低次のカルマンフィルタおよび相補フィルタから構成される複合航法システムを提案した。提案手法は、従来の代表的な構成と比べて、計算負荷が10%以下に低減されるにも関わらず、姿勢角の推定精度はほぼ同等であるという特性を有している。本章では、定式化を行った後、シミュレーションおよび実飛行試験により検証を行った。

## 6. まとめと今後の課題

本研究では、無人ビークル用の複合航法システムとして種々の提案を行った。本研究では、搬送波位相**GPS**において従来課題であった可用性の低さをタイトカップリング型**GPS/INS**やローカルランドマーク更新との組み合わせにより解決し、高い精度と可用性・信頼性を両立できることを示した。更に、タイトカップリング型搬送波位相**GPS/INS**に基づく、**UGV**用の複合航法システムおよび小型無人機用のマルチアンテナ型**GPS/INS**を提案し、シミュレーションおよびハードウェア試験によりその有効性を示した。更に、推定フィルタの実装に関する検討として、**UGV**用複合航法における**UKF**の有用性を示し、また、デカップリングにより低次の推定フィルタが実現できることを、解析的検討およびシミュレーション等により明らかにした。

小型**UAV**では、ペイロード搭載質量が限定されるために高性能な基準用航法装置を搭載することが困難であり、姿勢角精度の検証が困難である。このため、搭載カメラの画像を用いる等の実験的な手法による精度検証手法の確立が課題である。無人車においては、マルチパス環境における性能評価と航法システムの最適化が課題である。