

## 1. 評価対象研究課題

- (1) 研究課題名：超小型ナビゲーショングレード IMU およびその自律航法の研究
- (2) 研究代表者：株式会社東芝 富澤 泰
- (3) 研究期間：令和3年度～令和7年度（予定）

## 2. 中間評価の実施概要

日時：令和5年10月20日

場所：TKP 新橋カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所 理事長、上席研究員／東京大学 名誉教授

平澤 洽（委員長）

神奈川大学 名誉教授

遠藤 信行

情報通信研究機構 主席研究員

門脇 直人

東京理科大学 工学部 電気工学科 嘱託教授、東京理科大学

名誉教授

村口 正弘

元東海大学 教授

森本 雅之

（委員長以外は五十音順・敬称略）

## 3. 研究の進捗状況

### 研究の概要

慣性センサ装置(Inertial Measurement Unit: IMU)を用いて物体の位置を計測する慣性航法システムは、既存市場である航空防衛用途から、AGV、ドローンなどの新規市場への用途拡大に向けて、小型・高精度化が課題となっている。本テーマでは、MEMS(Micro Electro-Mechanical Systems)技術を用いた超小型・高ダイナミックレンジ(DR)なナビゲーショングレード IMU の実現に向けた基盤技術の研究を行うとともに、試作した IMU を用いた自律航法アルゴリズムの実証に取り組む。

具体的には、MEMS デバイスのうち、フーコーの振り子の原理により対象物の角度を直接検出可能な角度直接検出型ジャイロセンサ(Rate Integrating Gyroscope: RIG)と、共振周波数の差分によって高精度に加速度を計測できる差動共振型加速度センサ(Differential Resonant Accelerometer: DRA)の2つの革新的慣性センシングデバイスの技術研究に取り組む。さらに、これらのデバイスを超小型モジュールとして統合するため、モジュールの回路を専用カスタム半導体(Application Specific

Integrated Circuit: ASIC)化のための技術の研究、及びこの ASIC と MEMS デバイスをシステムインパッケージ(System in Package: SiP)化するための実装・プロセス技術の研究にも取り組む。これらと並行して、同モジュールを用いた自律航法を実現するためのセンサフュージョン技術についても研究を行う。

最終目標として、体積が 10 cc 級でありながら、自律航法精度 1 NM/h、かつ、160 dB 以上という高 DR を兼ね備えた IMU センサモジュールを試作し、AGV やドローンに搭載して測位実験を行い、高精度な測位の実証を目指す。

## 進捗状況

### 実施項目 1-1) 3 モード融合 MEMS-RIG モジュール技術

本実施項目では、MEMS-RIG の研究目標達成に向けて、3つの制御モードを融合した革新的モジュールの研究を実施した。低ノイズ化したモジュールを、励振方向により角度を直接検出する WA(Whole Angle)モード、外部角速度入力に対して常に励振方向を一定に制御する FR(Force Rebalance)モード、励振方向を一定角速度で回転させる VR(Virtual Rotation)モードのそれぞれで制御し、出力を適切に融合することで、中間評価を目途に、研究目標である角速度 BI(Bias Instability)、DR の数値目標を実機実証する計画であった。

現在までの取り組みにより、高 DR 化に関しては、WA モードにおいて DR の数値目標を実機実証するとともに、FR モードと WA モードの各々のモードで動作させた2台のモジュールの出力値の相補的な融合により、高精度と高 DR の両立の実証に成功した。一方で BI 低減に関しては、これまでの低ノイズ化検討の知見を反映させたシミュレータを活用し、ARW(Angular Random Walk)の設計値を低減させる等の改善を施して BI の数値目標到達が十分に可能な新型素子の試作を進めており、来年2月にはこの素子を用いて BI の数値目標を実証する計画である。以上により、本実施項目は今年度中には中間評価時目標を達成できる見通しである。

### 実施項目 1-2) MEMS-DRA モジュール技術

本実施項目では、MEMS-DRA の研究目標達成に向けて、高精度・高 DR なモジュールの研究を実施した。高精度化と高 DR 化の両立に向けて、従来の T 字型電極の発展により更に容量感度を向上させた新型電極構造、加速度印可時の共振モード周波数のバッティングを回避する非対称電極構造などの新規構造を適用した素子を試作評価し、中間評価を目途に、モジュール化した状態で研究目標である加速度 BI、DR の数値目標を実機実証する計画であった。

この計画に沿って、新型電極構造を採用して設計上 DR の数値目標を達成した素子をモジュールに搭載し、正弦半波の衝撃加速度を印可することで数値目標までの加速度入力に対して良好な線形出力特性を有していることを実機で実証した。更に、新型電極配置構造採用の新素子を試作し、モジュールに搭載して加速度 BI の数値目

標を実証した。以上により、本項目は中間評価時目標として定めた全ての数値メトリクスを計画通り達成した。

#### 実施項目 2-1) 制御回路 ASIC 化技術

本実施項目では、体積 10 cc 級モジュールの実現に向けて、ASIC 化技術の研究を実施した。各要素回路に対して、低ノイズ化に必要な要求仕様を策定した後、高精度化と小型化のトレードオフや SiP 技術との親和性、費用対効果のバランス等を考慮し、中間評価までに、定量的な回路設計の検討による ASIC の構成の決定、プロセスとファブの選定などの全ての事前検討を完了させる計画であった。

現在までの取り組みを元に 10 cc 級モジュールの構成を検討した結果、ノイズ耐性や開発のフレキシビリティを考慮してアナログ回路とデジタル回路の基板を分離する方針とした。この構成においても全ての部品を小型サイズの基板に実装し、10 cc 級への小型化を実現できる見通しである。

更にアナログ回路に関しては、ファブ (Fab : fabrication facility、半導体製造施設) を選定した上で、特に重要度が高い要素回路について、早期の課題抽出を目的として試作計画を 1 年前倒しし、先行でチップ試作を完了させた。一方で、残る要素回路の設計検討は、現状の進捗状況からいずれも今年度中には完了できる見込みであり、先行試作チップの課題抽出による ASIC 化検討の加速を考慮すると、総合的には当初の研究計画からの遅延は無いと考えられる。

#### 実施項目 2-2) 小型化実装・プロセス技術

本実施項目では、体積 10 cc 級モジュールの実現に向けて、ASIC と MEMS 慣性センサデバイスを SiP 化する実装・プロセス技術の研究を実施した。キーポイントである MEMS の真空封止、MEMS と ASIC の積層配線の 2 点を踏まえ、「(A)セラミックパッケージ」「(B)ウェハレベルパッケージ(WLP)」「(C)CMOS 混載 MEMS」の 3 つの SiP 形態を想定し、中間評価を目途に、各形態の形成に向けた製造プロセスの検証を行い、実際の 10 cc 級モジュールの試作に適用可能であることを実証する計画であった。

検討の過程において、3 つの SiP 形態のうち(C)を技術困難度と実現性の観点で候補から除外し、(A)(B)の両者について実際の製造プロセス検証を実施し、最適形態を選定した。同形態は 10 cc 級モジュールの試作において想定されるサイズの基板に十分に実装可能である。以上により、本項目は中間評価時目標を計画通り達成したと考えられる。

#### 実施項目 3-1) 物理融合型慣性センサフュージョン技術

本実施項目では、航法精度 1 NM/h の実現に向けて、物理融合可能な一体型慣性センサの研究を実施した。具体的には、まず MEMS-RIG と 2 軸の MEMS-DRA の

素子を同一の真空パッケージ内に封止し、モジュールに実装することで、両センサー間で物理入力（角速度、加速度、温度）の環境が共有されている「物理融合プラットフォーム」を実現した。このモジュールに対し、温度や加速度、角速度入力を意図的に変化させながら取得した出力データを元に、感度行例およびノイズ特性の評価とモデリングを行い、温度変化と慣性干渉の影響を補正する物理融合フィルタを構築した。

これを用いて、DRA 出力から得られた温度情報に基づいた RIG の温度補正、及び RIG と DRA の相互出力による慣性干渉の補正の実機検証を実施。外付けの温度センサによる補正や、ジャイロと加速度センサを個別モジュールに配置した一般的な装置構成での補正といった旧来手法と比較した結果、本手法の明確な優位性を確認した。本実施項目では、中間評価を目途に物理融合フィルタの優位性を実証する計画であり、以上から、本目標は計画通り達成されたと考えられる。

### 実施項目 3-2) 高精度複合型自律航法実証技術

本実施項目では、開発した小型高精度 IMU の自律航法装置としての性能検証を行うことを目的とし、中間評価に向けてまずは AGV 等の 2 次元平面を移動する屋内移動搬送車をモチーフとした 2 次元位置推定の実験を実施した。この際、必要に応じて他のセンサ手段を複合させる計画であったが、結果として、路面イメージ情報を基に路面の状態を判定して移動量を推定する距離推定方式に着目し、これを、深層学習を用いた IMU 出力の特徴量に基づく距離推定方式と複合させた。両出力の融合の手段として、センサの出力ごとに信頼度を算出し、それを元に各センサ情報を統合する方式を採用した。

実際の AGV に慣性センサと路面イメージセンサを搭載し、提案方式による 2 次元測位実験を行った結果、各方式を単独で用いた場合と比較して同方式が最も高精度かつロバストであることが実証できた。更に、慣性センサの高精度化が、同方式の更なる精度向上に寄与することについても確認した。本実施項目では、中間評価を目途に 2 次元位置推定手法の実環境での動作検証を完了させ、優位性を実証することを目標としており、以上により本目標は計画通り達成されたと考えられる。

## 4. 中間評価の評点

S 研究計画を超えた成果を挙げており、さらなる発展を期待する。
---------------------------------

## 5. 総合コメント

ほぼ計画通り順調に進捗しており、目標である FOG (Fiber Optic Gyroscope、光ファイバージャイロスコープ) レベルの性能達成の可能性は極めて高いと評価できる。

MEMS を利用した精度の高い慣性計測方式の目安がついている。ニーズに合わせ

た多様な展開についての可能性が期待できる。

研究終了時に、ドローンと AGV での測位実験の成果をもとに、他分野での応用へ向けた展望、課題、追加項目などの整理がなされることを期待する。

## 6. 主な個別コメント

- MEMS を利用した精度の高い慣性計測方式の目安がついており、ニーズに合わせた多様な展開の可能性が期待できる。チャレンジする気概が感じられる。
- 計画通りに進捗しており、かつ、今後の課題もしっかりと把握していることから、目標達成の可能性は極めて高いと評価する。
- このまま順調に進めば高い研究成果が得られると思われるので、努力していただきたい。
- 大きな問題はないと思われるが、今後実施する 3 次元空間での実証実験等に出てくる可能性のある、新しい課題にも対処することを期待する。
- 多様なニーズに合わせた利用形態のバリエーションを考慮していただきたい。
- 協力者も含めて、適切な体制で効率的に実施している。