

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360095

研究課題名(和文)自律型無人ヘリコプタを用いた超高精度3次元地形情報収集システムの開発

研究課題名(英文)Development of high-precision 3D terrain mapping system using autonomous unmanned helicopter

研究代表者

中西 弘明(Nakanishi, Hiroaki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：50283635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：異なるサンプリングのセンサデータを複合する非同期観測複合航法システムを構築し、その有効性を明らかにした。ロドリゲスパラメータ(RP)、修正RPを拡張した一般化RPを用いることにより、最小次元姿勢表現の持つ問題点を解消できることを明らかにした。また、一般化RPには最適な次数が存在することを示した。また、ボードコンピュータに組み込み、小型無人ヘリコプタでも提案システムが動作可能であることを示した。特異スペクトル解析や非負値スペクトル解析手法により観測データの補正や外れ値検出方法を検討した。一般化されたテレンゲンの定理を利用することにより、随伴系を導出する手法について検討した。

研究成果の概要(英文)：Asynchronous measurements hybrid navigation system was developed. It was found that the developed navigation system was effective. It is known that minimal representation of the attitude has both or either singularity and unboundedness so that they were difficult to use for navigation system. However, minimal representation of attitude is appropriate for 3D terrain mapping system from the viewpoint of the amount of computation and required memories. We found that those difficulties can be avoided by using generalized Rodrigues parameters (GRP), which were minimal representation of attitude and extensions of Rodrigues parameters. Navigation using GRP can be embedded into poor cpu board. We also proposed that singular spectrum analysis and non-negative spectrum analysis was effective to detect outlier in measurements. To reduce computation time for data assimilation, we developed an effective method to derive adjoint system equations by using generalized Tellgen's theorem.

研究分野：システム制御工学

キーワード：自律型無人ヘリコプタ 3次元地形情報収集システム 複合航法システム 姿勢表現 飛行制御

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災、原子力発電所事故、台風12号による土砂崩れなどにおいて、無人航空機は情報収集に役立っている。研究代表者は、機体に取り付けたレーザレンジファインダによる機体・地表間距離情報と機体の位置・姿勢情報を複合する3次元地形情報収集システムのプロトタイプを完成させたが、高度30mからの計測において高度方向に10cm程度の計測誤差が存在した。3次元地形計測では自己状態推定機構が主要な役割を果たすが、その理論から製品化まで欧米と比べて大きく遅れている分野であり、我が国の研究機関・産業界は高価な製品をブラックボックスとして購入することを余儀なくされていた。

2. 研究の目的

本研究では、自律型無人ヘリコプタを利用することにより、空中から地震災害発生時の倒壊建物の把握・土砂災害現場における堆積土砂量推定、斜面崩壊現場の監視などが実現可能な超高精度3次元地形情報収集システムを構築する。飛行高度50mからの計測時に高度測定精度が3cm以内となることを目標とする。このために、(1)計測環境の変化による悪影響を抑制する環境適応飛行制御系の開発、(2)位置・姿勢角を超高精度・リアルタイム推定する複合航法システムの開発に関する研究を行う。また、リアルタイム測定ではGPS計測データの欠損や飛びの影響が避けられず、精度向上に限界があることから、目標精度を実現するためにポストプロセス技術である(3)ロバストデータ同化を用いた超高精度3次元地形情報収集システムの開発を行う。

3. 研究の方法

(1)計測環境の変化による悪影響を抑制する環境適応飛行制御系の開発

突風など環境の変化により発生する姿勢変動の高周波成分と飛行速度の変動は、計測精度の劣化および計測点の非均一化の原因となる。その抑制のために、知的システムの競合学習などによるロバスト適応制御系を適用する。また、参考文献に示したように、機首を対気速度方向に適応的に向ける制御は姿勢安定化に有効である。しかし、この制御を用いると機体に固定したセンサの方位角も適応的に変化する。よって、地形計測にそのまま適用できない。このため、不確かさを考慮した学習・最適化を用いて、飛行経路角に階層制御を適用することにより、飛行経路を環境変化に適応して変更できる自律飛行制御系へ発展させる。

(参考文献)

Hiroaki Nakanishi, Sayaka Kanata and Tetsuo Sawaragi: Improved Stability using Environmental Adaptive Yaw Control for Autonomous Unmanned Helicopter and

Bifurcation of Maneuvering in Turning, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.6, pp. 1091-1099, 2011

(2)位置・姿勢角を超高精度・リアルタイム推定する複合航法システムの開発

複合航法では、慣性航法計算による予測区間において、位置・姿勢角の推定誤差が増大する。また、異なるセンサによる観測データを利用のために、観測データの間引きやラグ挿入により非同期データの強制同期が行われている。これらが位置・姿勢角推定精度劣化の原因である。このため、各時刻には部分的にのみ観測可能であるが、統合により全体として可観測性が達成されることに着目し、非同期観測複合航法システムを構築する。GPS衛星の隠蔽による測位データの欠損あるいは飛びについて、観測データに対してオンライン特異スペクトル解析に基づき、補完や異常値の除去を動的に行うことにより、推定精度を維持する手法を開発する。また、正規化処理が不要な乗法的 Quaternion フィルタの開発、および Quaternion Unscented Transformation の理論展開を行う。しかし、Quaternion など姿勢の冗長次元表現は計算量的に不利である。このため姿勢の最小次元表現の利用を検討し、特に姿勢表現における特異性・非有界性の回避方法を開発する。以上の研究項目により、リアルタイム計測であっても飛行高度50mから計測高度誤差5cm以内を実現することを目標とする。

(3)ロバストデータ同化を用いた超高精度3次元地形情報収集システムの開発

再帰アルゴリズムに基づく複合航法は、測位演算に用いる衛星配置変化などに起因するGPS測定精度の急激な劣化に対しては脆弱である。全時刻の観測データを統合するポストプロセスは精度向上に有利である。しかし、カルマンフィルタのスムージング処理では測位データに飛びが発生した場合にやはり脆弱である。このことから、特異スペクトル解析を用いて観測データを補正する、ロバストなスムージング処理法を開発する。また、運動方程式を拘束条件するリスク感度型評価関数、特にリスク志向型評価関数を用いた最適化問題として定式化し、外れ値など、異常データに対してロバストなデータ同化手法を開発する。以上の研究項目により、リアルタイム計測より測定精度を向上させ、飛行高度50mから計測高度誤差3cm以内を実現する。

4. 研究成果

(1)計測環境の変化による悪影響を抑制する環境適応飛行制御系の開発、

ロール角制御に対して最も影響が大きい環境変化は水平風の風向・風速であることから、水平風に対してロバストな制御系として、水平移動方向に適応的に方位角を遷移させる適応方位制御系を構築し、飛行制御によりその有効性を確認した。また、スタビライザの機能に着目し、運動方程式を構築した。また、

運動に与える影響を吟味し，その低次元化モデルを与えた．また，飛行実験により低次元モデルと実際の運動を比較し，十分な精度を持つことを確認した．

(2) 位置・姿勢角を超高精度・リアルタイム推定する複合航法システムの開発

姿勢の最小次元表現である一般化 Rodrigues Parameters を用いる姿勢推定機構を提案した．Quaternion など姿勢の冗長表現とは異なり，正規化処理が不要となったが，有界性を保証する必要がある．そこで，一般化 Rodrigues Parameters の多重性を利用した変数変換により，有界性を保証できることを示した．数値計算により，その変数変換が姿勢推定精度に与える影響を確認した．その結果により，Brute Force 変換でも十分であるが，UT 変換や繰り返し観測更新を用いることにより，その影響をより軽減できることを示した．また，姿勢の最小次元表現として広く用いられている Euler 角には特異姿勢の存在が知られており，特異姿勢に近づくとき姿勢推定精度が大きく劣化するが，提案手法にはそのような欠点が存在しないことを明らかにした．さらに，提案法を用いることにより，Quaternion を用いる複合航法では用いることができなかった Unscented Kalman Filter あるいは粒子フィルタなどの非線形フィルタを利用でき，姿勢推定精度を大きく改善することが可能であることを明らかにした．一般化 Rodrigue Parameters を用いる姿勢推定機構では時間積分誤差に対して一般化 Rodrigue Parameters の次数が大きく影響を与えることを明らかにし，推定に用いる最適な次数を明らかにした．一般化 Rodrigue Parameters を姿勢表現に用いた非同期観測複合航法システムを構築し，飛行実験によりその有効性を確認した．一般化 Rodrigue Parameters と同様に姿勢の最小次元表現である Euler 角を用いた複合航法と比較すると，計算量が大幅に少ないという利点があり，小型の UAV の航法システムとしても有効であることを示した．

(3) ロバストデータ同化を用いた超高精度 3 次元地形情報収集システムの開発

スムージング処理では複合航法と同様に GPS 測位データの飛びに対して脆弱であることに着目し，特異スペクトル解析によるデータ補正方法を検討しただけでなく，観測データの非負値性に着目し，非負値スペクトル解析を提案した．また，データ同化処理を容易に実行するために，一般化された Tellegen の定理を利用することにより，随伴系を導出する手法について検討した．この方式は 4 次元変分法など一般のデータ同化手法としても利用可能である．特に，観測時間が変動するときに対応した随伴方程式を導出した．

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- (1) 佐藤彰, 中西弘明, 大川宏久: 産業用無人ヘリコプタの動特性へのスタビライザの効果, 日本航空宇宙学会論文集, 第 63 巻, 2 号, pp. 68-77, 2015, doi:2322/jjsass.63.68

〔学会発表〕(計 15 件)

- (1) 中西弘明, 金田さやか, 榎木哲夫: 一般化 Rodrigues パラメータを用いた複合航法システム, 第 15 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講演論文集, pp. 1267-1269, 2014
- (2) 中西弘明, 金田さやか, 榎木哲夫: 姿勢の高精度推定のための一般化 Rodrigues パラメータの最適次数, ロボティクスメカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 2A2-C01, 2014
- (3) Akira Sato, Hiroaki Nakanishi: Observation and Measurement in Disaster Areas using Industrial Use Unmanned Helicopters, Symposium on Safety Security and Rescue Robotics 2014,
- (4) 佐藤彰, 中西弘明: 新型無人ヘリコプタの運動特性, 日本航空宇宙学会第 45 期年会講演会, D13, 2014
- (5) 中西弘明, 金田さやか, 榎木哲夫: 一般化 Rodrigues パラメータの Kinematic 方程式の時間積分誤差, 第 14 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論文集, 2013
- (6) Hiroaki Nakanishi, Sayaka Kanata and Tetsuo Sawaragi: Attitude Representation for Precise 3D Terrain Mapping with Autonomous Unmanned Helicopter, 10th IEEE International Symposium on Safety Security and Rescue Robotics, DVD-ROM (PaperID=80), 2013
- (7) 中西弘明, 金田さやか, 榎木哲夫: 一般化 Rodrigues パラメータを用いた姿勢推定, ロボティクスメカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1A1-F06, 2013
- (8) 藤井崇史, 中西弘明, 榎木哲夫, 堀口由貴男: 非負値スペクトル解析と電力消費傾向分析への応用, 第 40 回知能システムシンポジウム資料, pp.409-414, 2013
- (9) 角江 政俊, 中西弘明, 金田 さやか, 榎木 哲夫: 3 次元地形情報収集のための一般化 Rodrigues Parameters を用いた姿勢推定, 第 13 回計測自動制御学会 SI 部門講演会講演論文集, pp. 693-697, 2012
- (10) 徳永寿慧, 中西弘明, 榎木哲夫, 堀口由貴男: 拡張特異スペクトル変換による動作変化点誤検出の原因解析とその改善, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2012 講演論文集, pp. 339-344, 2012
- (11) 中西弘明, 金田さやか, 榎木哲夫: 自律型無人ヘリコプタによる高精度 3 次元地形計測のための姿勢推定, 第 55 回自動制御連合講演会講演論文集, pp. 761-765, 2012
- (12) Hiroaki Nakanishi, Sayaka Kanata and

Tetsuo Sawaragi: GPS-INS-BARO Hybrid Navigation System Taking into Account Ground Effect for Autonomous Unmanned Helicopter, 10th IEEE International Symposium on Safety Security and Rescue Robotics, CD-ROM (PaperID=31), 2012

- (13) 金田さやか, 中西弘明, 榎木哲夫: 自律型無人ヘリコプタのための GPS-INS-BARO 複合航法, 第 30 回ロボット学会学術講演会論文集, RSJ2012AC4F3-1, 2012
- (14) 岡本鷹文, 中西弘明, 金田さやか, 榎木哲夫, 堀口由貴男: 特異値分解による動作特徴抽出のための姿勢表現, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 2P1-N06, 2012
- (15) 徳永寿慧, 中西弘明, 榎木哲夫, 堀口由貴男: 動作解析のための特異スペクトル変換の拡張と姿勢表現, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 2P1-N07, 2012

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.syn.me.kyoto-u.ac.jp/ja/>

<http://www2.aero.osakafu-u.ac.jp/as/simomura/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中西 弘明 (NAKANISHI Hiroaki)

京都大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号: 50283635

(2) 研究分担者

金田 さやか (KANATA Sayaka)

大阪府立大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 60605567

(3) 連携研究者
なし ()

研究者番号: