

令和 8 年 4 月 6 日

報道機関 各位

熊本大学

速さの異なる複数センサの情報を最適に統合する 設計理論を確立

(ポイント)

- サンプル周期の異なる複数センサからの情報を最適に統合するカルマンフィルタの設計理論を確立
- 従来の標準的手法では解けなかった数学的問題(半正定値ノイズ共分散)を線形行列不等式の最適化により解決
- 車載ナビゲーションを想定した検証で、GPS 単体による精度(± 1 m)に対し約2倍の推定精度(± 0.56 m)を達成
- 自動運転、ロボット、IoT など複数センサを用いる幅広い工学分野への応用に期待

(概要説明)

熊本大学大学院先端科学研究部 岡島寛准教授は、サンプル周期が異なる複数のセンサを搭載したシステムにおいて、各センサからの情報を最適に統合して内部状態を推定するマルチレート定常カルマンフィルタの設計理論を構築しました。従来の設計手法では数学的に扱えなかった問題を、線形行列不等式(LMI)に基づく最適化手法により解決したものです。

[背景]

近年の制御システムや IoT システムでは、異なる種類の複数のセンサが搭載されることが一般的です。自動運転車の GPS と車輪速度センサ、ロボットのカメラと LiDAR、化学プラントの各種計測器など、それぞれのセンサは固有のサンプル周期(計測の速さ)を持っています。これらの情報を統合してシステムの内部状態(位置、速度、温度など)を推定する技術はカルマンフィルタとして知られ、1960 年の提案以来、宇宙開発からカーナビゲーションまで幅広く利用されています。

しかし、従来のカルマンフィルタは全てのセンサが同一の周期で計測を行うことを前提としています。センサの周期が異なるマルチレートシステムに対しては、周期的時変システムとして扱い「サイクリック再定式化」により時不変系に変換する手法が知られていますが、この変換を行うと計測ノイズの共分散行列が正則でなくなり(半正定値になり)、従来の数式(代数リカッチ方程式)に基づく設計法では

逆行列の計算が破綻するという根本的な問題がありました。

[取り組みの内容]

そこで本研究では、カルマンフィルタ設計と最適制御(LQR)の双対性を利用し、LMI最適化の枠組みで設計問題を定式化しました。LMI最適化では計測ノイズ共分散の逆行列を必要としないため、半正定値の場合にも自然に適用できます。これにより、推定誤差共分散の上界を最小化する最適なカルマンゲインをオフラインで算出することが可能になりました。

さらに、LMIの枠組みを活かした多目的設計にも対応しています。推定誤差の収束速度を保証する極配置制約や、最悪ケースの誤差増幅を抑制する l_2 誘導ノルム制約を追加した設計が可能であり、応用先の要求に応じた柔軟なフィルタ設計を実現しました。

つまり、センサごとに異なる計測周期を考慮したモデルを構築し、従来は数式の制約で扱えなかったケースにも対応可能な最適化手法を導入することで、計測の速さが違って安定して高精度な推定ができる設計理論を実現しました。

[成果]

車載ナビゲーションシステム(GPS:1 Hz、車輪速度センサ:10 Hz)を対象としたシミュレーションにより、提案手法の有効性を検証しました。500回のモンテカルロシミュレーションの結果、位置推定のRMSE(二乗平均平方根誤差)は0.561 mとなり、GPSのノイズ標準偏差1.0 mを大幅に下回ることが確認されました。また、LMI最適化により得られた理論上界と実際の推定誤差の比は1.002~1.046と、理論が実際の性能を精度良く予測できることも示されました。

設計に必要な計算は全てオフラインで完了し、実行時にはあらかじめ求めた周期的なカルマンゲインを適用するのみであるため、計算負荷が小さく実装が容易です。

[展開]

本研究で構築した設計理論は、サンプリング周期が既知で周期的に繰り返されるあらゆる線形システムに適用可能な汎用的な枠組みです。自動運転車両やロボットのセンサ融合だけでなく、化学プラントの制御、電力システムの監視、センサネットワークなど、異なる周期のセンサを持つ幅広い工学分野への応用が期待されます。設計のためのMATLABおよびPythonの実装コードはGitHub上で公開しており、研究者や技術者がすぐに活用できます。今後は、システムパラメータに不確かさがある場合のロバスト設計や、非線形システムへの拡張に取り組む予定です。

論文タイトル:

LMI Optimization Based Multirate Steady-State Kalman Filter Design

論文著者：
岡島寛

掲載雑誌：
IEEE ACCESS(オープンアクセス誌)
URL:<https://ieeexplore.ieee.org/document/11460152>
DOI:10.1109/ACCESS.2026.3679647

補足資料：
ブログ記事
<https://blog.control-theory.com/entry/multirate-kalman-filter-lmi>

実装コード(GitHub)
<https://github.com/Hiroshi-Okajima/multirate-kalman-filter>

【お問い合わせ先】

熊本大学大学院先端科学研究部（工）

担当：岡島寛（准教授）

電話：096-342-3603

e-mail：okajima@cs.kumamoto-u.ac.jp

<https://www.control-theory.com>