

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510231

研究課題名(和文) オンライン車群管制の実現に向けた車群走行状態フィードバック推定システムの開発

研究課題名(英文) Development of Feedback Estimation System of Vehicle Platoon States Toward Online Traffic Control

研究代表者

鈴木 宏典 (SUZUKI, Hironori)

日本工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20426258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、車群走行する複数台の車両の車間距離及び速度を、計測機器が搭載された一部の車両から動的に推定する試みを行った。推定システムはアンセンティッドカルマンフィルタ(UKF)、パーティクルフィルタ(PF)とし、状態空間モデルに含まれるパラメータも同時推定するデュアルUKF(DUKF)、デュアルPF(DPF)も適用した。数値計算の結果、いずれの手法でも6台程度の車群の車間距離と速度を高い精度で推定可能なことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop a dynamic system to estimate the headway distance and velocity of vehicles traveling in a longitudinal platoon. Not only the conventional feedback estimators such as unscented Kalman filter (UKF) and particle filter (PF) but also the dual UKF and dual PF are employed as the estimation system. DUKF and DPF are the feedback estimators in which the model parameter are also estimated within the estimation process simultaneously. Assuming that prior knowledge on the car-following model parameter is different from what is observed in a real car-following, the four estimators attempt to estimate the headway by measuring the acceleration rate and velocity of all vehicles in the platoon. Numerical analyses showed that DUKF and DPF are succeeded in estimating the headway distance accurately compared to the conventional approaches. It was concluded that the estimation system was successfully developed by dynamic feedback estimators based on state-space model.

研究分野：交通予防安全工学、人間工学

キーワード：状態推定 アンセンティッドカルマンフィルタ パーティクルフィルタ 車群制御 交通流

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初以来、自動車の追突事故を防止する運転支援システムが自動車メーカーにより開発され、車両1台の追突危険リスクを低減させるものとしてその効果が期待されてきている。この流れに伴い、車両1台の追突危険リスクを定量的に評価する先行研究が数多く行われ、これらの成果がドライバへの情報呈示、警報呈示に応用されてきた。

研究代表者は、車両単体の追突防止支援技術のみならず、複数台の走行車両全体の追突防止を図る目的で「車群制御」の重要性を指摘し、「車群の安全を見守る車群管制システム」の実現へ向けた取り組みを継続的に行っていた。

この「車群の安全を見守る車群管制」を将来実現するためには、車群を構成する全ての車両の速度、車間距離という「車両状態量」がリアルタイムに「観測」されていることが前提となる。しかしながら、全ての車両にこれらの車両状態量を観測する計測機器を搭載することは、研究開始当初は現実問題として不可能であった。このため、計測機器を搭載した一部の車両で直接的に「観測」されたデータを基に、車群を構成する全ての車両の車両状態量を何らかの形で間接的に「推定」する必要性があった。

2. 研究の目的

本研究では、車群を構成する全ての車両の「車両状態量」を動的に推定するフィードバックシステムを開発することを目的とした。すなわち、複数台の車群を考えたとき、計測機器が搭載された車両で速度や加速度を計測し、このデータを基にフィードバック推定アルゴリズムを適用して車群の全ての車両の車間距離や速度を推定する試みを行った。具体的には以下の三項目を目的とし取り組みを開始した。

(1) 定式化の取り組みを既に始めていた車群走行状態フィードバック推定システムを精緻化すること。

(2) 精緻化された推定システムのパフォーマンスを検証すること。

(3) 推定システムの実用化に向けて精度向上を図ること。

3. 研究の方法

(1) 車群走行状態フィードバック推定システムを精緻化するため、これを、カルマンフィルタをベースに再構築することとした。カルマンフィルタを構成する「状態方程式」及び「観測方程式」を線形化する際、非線形性が失われないようなモデリングを新たに行うこととした。このためのアプローチとして、「状態方程式」及び「観測方程式」をニューラルネットワークで定式化するニューラルカルマンフィルタ(NKF)や、両方程式をア

ンセンティッド変換するアンセンティッドカルマンフィルタ(UKF)を採用し、推定システムを精緻化することとした。

(2) 3台以上の車群を対象として、NKF及びUKFによる推定システムのパフォーマンスを、数値計算を通じて検証した。推定システムのパフォーマンス検証には質の高いデータが不可欠であるため、速度、車間距離のデータが適切であるか、(一財)日本自動車研究所から頂いたデータを改めて精査することとした。さらに、車群を構成する一部の車両(プローブカー)で観測した車両状態量で、それ以外の車両の状態推定が可能か、可観測性の検証も合わせて行うこととした。

(3) 推定精度の向上と実用化に向けて、車群構成車両は何台程度が適切か、何台程度までであれば実用的に推定可能か、そのうち、車両状態量を計測するプローブカーは何台必要か、さらに、そのプローブカーは車群内での位置に配置するのが適当か等を、数値計算を通じて検討することとした。

4. 研究成果

(1) 車群走行状態フィードバック推定システムの精緻化

従来の拡張カルマンフィルタ(EKF)に代わり、ニューラルカルマンフィルタ(NKF)でフィードバック推定システムを定式化することに成功した。そして、図1に示す3台の車群のうち先々行車の速度 v_1 と追従車の加速度を与え、2台目と3台目の速度 v_2, v_3 と車間距離 l_2, l_3 を推定した。()



図1. 3台車群の追従走行

この結果、EKFに比べNKFは速度の推定精度は顕著に向上するものの、車間距離の平均値は精度が若干悪化する結果が得られた(図2)。ただし、NKFによる車間距離推定の誤差は非常にばらつきが大きく、精度の高いケースとそうでないケースの乖離が大きく非常に不安定な結果が得られた。NKFは非線形性の表現に優れるものの、パラメータの変化に敏感で計算結果が不安定になるため、NKFに代わる手法を用いる必要性が認識された。

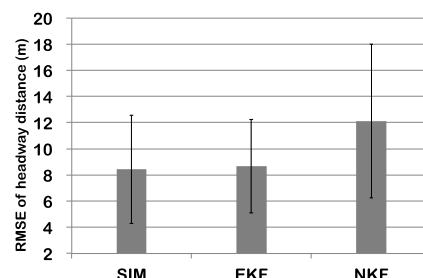


図2. EKFとNKFの車間距離推定精度の比較

(2) 精緻化された推定システムのパフォーマンスの検証

NKF の不安定性が確認されたことを受け、当初の計画通り、NKF に代わりアンセンティッドカルマンフィルタ (UKF)、パーティクルフィルタ (PF) の両方を用いて推定システムを構築することとした。()

UKF は、状態変数及び観測変数をアンセンティッド変換することにより、状態方程式と観測方程式の偏微分を必要とせずにカルマンゲインを計算できるため精度向上が見込まれる推定手法である。また、PF はカルマンフィルタ系の手法とは異なり、多くの粒子を状態空間平面に配置してその粒子の尤度を計算し、高い尤度を持つ粒子を残しながら、事後確率密度分布を求める手法で、カルマンフィルタの制約であった状態変数や誤差分布をガウス分布に限定する必要はないため、やはり精度向上が見込まれる手法である。

同様に 3 台の車群を対象として車間距離と速度の推定を試みた結果、図 3 に示すように、従来の EKF や NKF に比べて UKF と PF が高い精度を生むことが明らかとなった。誤差も 1m 前後まで減少し、実際のレーザーレーダーの精度とほぼ同等の実用的な精度の確保が可能になった。

なお、この時点で、可観測性を満たすために、観測方程式に車両追従モデルを融合した。

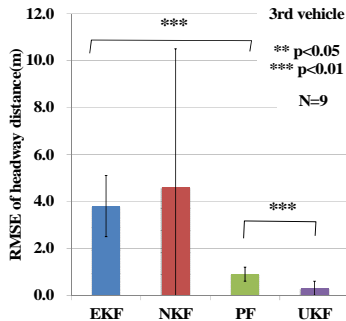


図 3 . 車間距離推定精度の比較 (仮想データ)

また、仮想データのみならず実際にテストコース上で取得したデータでも同様の結果が得られた (図 4) 。

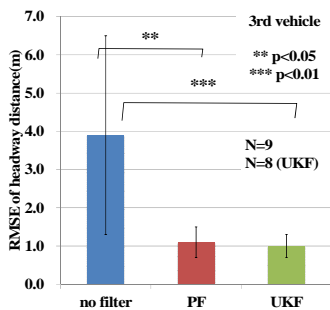


図 4 . 車間距離推定精度の比較 (実データ)

(3) 推定システムの実用化に向けた精度向上の取り組み

6 台車群への拡張

3 台の車群のみでは実用性は低いため、こ

れを 6 台の車群に拡張して同様の数値計算を行った。推定システムについては、既に UKF と PF のパフォーマンスが高いことからこれらのみとした。また、加速度と速度を計測する車両の台数は 2 台に固定、位置のみを変化させ、どの程度精度に違いがあるかを検証する試みを行った () 。

この結果を図 5 に示す。図中、# で表された数字が計測機器を搭載した車両番号 (先頭から数えて) を示す。

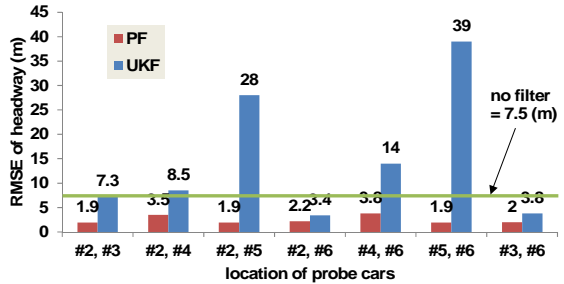


図 5 . 6 台車群での車間距離推定精度の比較

PF は計測車両がどの位置に存在していても安定して高い精度で推定が実現されていることに対し、UKF では精度が低くばらつきも大きかった。この原因を詳細に検証した結果、UKF の推定アルゴリズムを 6 台に拡張した際に変更すべき点の存在が判明し、この精度は後に改善することとなった。

突発的な状況に対する適用性

車両の追従は、必ずしも状態方程式、観測方程式通りにはなされないことが現実的である。このような状況でも UKF や PF は適用性があるかどうかを検証するため、6 台の車群のうち 3 台目の車両が突然急減速する場合を対象として推定システムのパフォーマンスを検証した () 。

この結果を図 6 に示す。PF では全ての車両で加速度と速度が計測されていれば精度は高いものの、そうでない場合には精度が悪化する結果となった。一方、UKF は一部の車両のみで加速度、速度が計測されていても非常に精度が高く安定した結果が得られることがわかった。

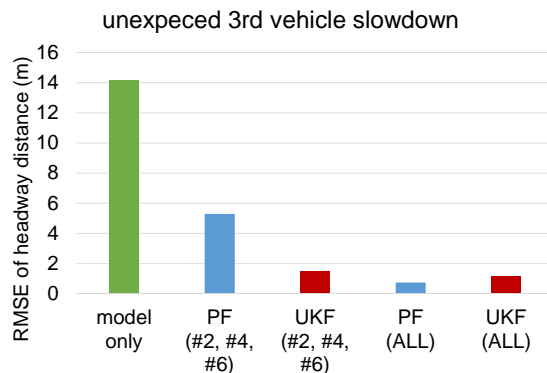


図 6 . 3 台目の予期せぬ減速時の車間距離推定精度の比較

デュアルフィルタへの拡張

可観測性を満たすために観測方程式へ導入した追従モデルにはパラメータが3つ存在する。このパラメータは事前に同定しておくことが望ましいが、実際の運用を考えると必ずしも正しいパラメータである保証はない。そこで、車間距離や速度の推定だけではなく、追従モデルのパラメータについても一つのプロセスの中で同時に推定するアルゴリズムを適用することとした。車両状態量とモデルパラメータを同時に推定するという意味で、これを「デュアルフィルタ」と呼ぶ。デュアルフィルタを UKF と PF に実装するため、デュアル UKF (DUKF)、デュアル PF (DPF) を用いて推定システムを定式化し、6 台の車群に適用した。今までの数値計算とは異なり、追従モデルのパラメータには正しい値と異なる値を入力してより厳しい条件で推定を行った。

この結果を図7に示す。異なるパラメータを入力することによって特に UKF で精度が悪化することがわかる。PF ではパラメータが異なっても PF 単体で高い精度の推定値を算出することがわかる。さらに DUKF, DPF を適用すると両者ともに安定して高い精度の推定値を出力することがわかった。デュアルフィルタが精度の向上に寄与していることが理解できる。

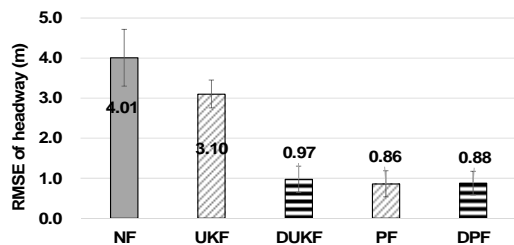


図7 . デュアルフィルタによる推定精度比較

パラメータの推定結果は図8に示す通りである。正しい値は全て1であるが、当初の予想に反して1から乖離する結果となった。この原因は特定出来ておらず今後の課題としているが、結果的に車間距離の精度向上が見込めているため、local optimum に陥っている可能性もある。

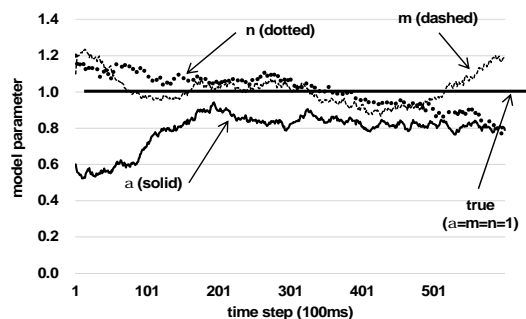


図8 . DPF によるパラメータ推定結果

以上を整理すると、PF はすべての車両で加速度と速度が計測されている場合には非常に安定した車間距離推定を実現できる一方、一部の車両のデータしか観測できない場合にはその精度が保証されない可能性があるため、その運用に際しては全ての車両で観測データを得る必要がある。

一方、UKF は、観測モデルに含まれるパラメータが正しい場合には極めて精度よく車間距離を推定でき、突発的な減速等通常とは異なる状況においても適用性が高いが、そうでない場合には精度が著しく悪化する。しかしながら、パラメータを同時に推定する DUKF を用いることでこの問題を克服することができる。

PF, UKF とともにそれぞれ一長一短があることが明らかとなったが、いずれの手法も現実的な精度で車間距離や速度を推定できる可能性が明らかとなった。

この成果は、自動車単体だけではなく車群全体の安全性向上の取り組みに対しての貢献が高いと判断される。多重衝突事故は依然として発生し、その被害も大きいことから、今後はカーブ区間も含めた問題に拡張する必要があると同時に、多重衝突事故防止に向けてドライバの加速、減速の意図や、合流、分流、織り込み区間走行時の車線変更の意図推定も必要との認識に至っている。車両の状態だけでなくそれを操る人間の意図も同時に推定する問題に拡張し、PF や UKF、あるいは DPF、DUKF の適用を考えて研究をさらに進めることとしている。

<引用文献>

- 鈴木 宏典、ニューラルカルマンフィルタを用いた車群走行車両の車速と車間距離の動的推定、計測自動制御学会論文集、48 巻、11 号、2012、781 - 789
- H. Suzuki、T. Nakatsuji、Feedback Estimators for identifying Headway Distance and Velocity of Longitudinal Platooned Vehicles, Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies、10 巻、2013、1631 - 1649
- H. Suzuki、Dynamic State Estimation in Vehicle Platoon System by Applying Particle Filter and Unscented Kalman Filter、Procedia Computer Science、24 巻、2013、30 - 41
- H. Suzuki、T. Nakatsuji、Dynamic estimation of headway distance in vehicle platoon system under unexpected car-following situations、Transportation Research Procedia、6C 巻、2015、172 - 188
- 鈴木 宏典、生駒 哲一、中辻 隆、車両追従モデルを組み込んだデュアルフィルタによる車群走行車両の車間距離推定、自動車技術会論文集、46 巻、2 号、2015、473 - 478

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5件)

鈴木 宏典、生駒 哲一、中辻 隆、車両追従モデルを組み込んだデュアルフィルタによる車群走行車両の車間距離推定、自動車技術会論文集、査読有、46巻、2号、2015、473 - 478
<http://tech.jsae.or.jp/hanbai/list.aspx?bunkenno=20154230>
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020411210/>

H. Suzuki、T. Nakatsuji、Dynamic estimation of headway distance in vehicle platoon system under unexpected car-following situations、Transportation Research Procedia、査読有、6C巻、2015、172 - 188
DOI:<http://10.1016/j.trpro.2015.03.014>

H. Suzuki、Dynamic State Estimation in Vehicle Platoon System by Applying Particle Filter and Unscented Kalman Filter、Procedia Computer Science、査読有、24巻、2013、30 - 41
DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2013.10.025>

H. Suzuki、T. Nakatsuji、Feedback Estimators for identifying Headway Distance and Velocity of Longitudinal Platooned Vehicles、Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies、査読有、10巻、2013、1631 - 1649
DOI:<http://dx.doi.org/10.11175/easts.10.1631>

鈴木 宏典、ニューラルカルマンフィルタを用いた車群走行車両の車速と車間距離の動的推定、計測自動制御学会論文集、査読有、48巻、11号、2012、781 - 789
DOI:<http://dx.doi.org/10.9746/sicetr.48.781>

[学会発表](計9件)

鈴木 宏典、中辻 隆、車両追従モデルを組み込んだ車群走行車両の車間距離推定、自動車技術会秋季学術講演会、2014年10月24日、仙台国際センター、(宮城県・仙台市)

H. Suzuki、T. Nakatsuji、Dual Particle Filter to Identify Headway Distance of Platooned Vehicles、World Automation Congress 2014、2014年8月5日、コナ(アメリカ合衆国)

H. Suzuki、T. Nakatsuji、Dynamic Estimation of Headway Distance in Vehicle Platoon System under Unexpected Car-Following Situations、International Symposium of Transport Simulation 2014、2014年6月4日、アジャクシオ(フランス)

H. Suzuki、Dynamic State Estimation in Vehicle Platoon System by Applying Particle Filter and Unscented Kalman Filter、Intelligent and Evolutionary Systems IES2013、2013年11月9日、ソウル(大韓民国)

H. Suzuki、T. Nakatsuji、Dynamic State Estimation for Vehicle Platoon System Based on Feedback Estimators、Proceedings of The Second Asian Conference on Information Systems、ACIS 2013、2013年10月31日、プーケット(タイ王国)

H. Suzuki、T. Nakatsuji、Feedback Estimators for Identifying Headway Distance and Velocity of Longitudinal Platooned Vehicles、The 10th EASTS Conference 2013、Eastern Asia Society for Transport Studies、2013年9月10日、台北(中華民国)

鈴木 宏典、中辻 隆、パーティクルフィルタを用いた車群走行状態の動的推定、計測制御自動学会、第40回知能システムシンポジウム、2013年3月14日、京都工芸繊維大学(京都府・京都市)

H. Suzuki、T. Nakatsuji、Neural Kalman Filter for Estimating Dynamic Velocity and Headway Distance in Vehicle Platoon System -Validity of Neural Kalman filter under unexpected car-following situation-、IEEE SMC2012、2012年10月15日、ソウル(大韓民国)

鈴木 宏典、中辻 隆、車群走行状態の動的推定に対するニューラルカルマンフィルタの適用性、第22回インテリジェント・システム・シンポジウム FAN2012、計測自動制御学会、2012年8月31日、浦添市でたこホール(沖縄県・浦添市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 宏典 (SUZUKI, Hironori)
日本工業大学・工学部・准教授
研究者番号：20426258