

周辺車両の運転特性および経路予測に基づく先進型車間距離制御システムの構築

代表研究者 工学院大学工学部機械システム工学科 准教授 Woo Hanwool

共同研究者 東京大学生産技術研究所 特任助教 Gwak Jongseong

【まとめ】

人は状況を認識・理解し、判断から操作を行うまでの時間を要するため、急な割り込みに対して即時に対応できない可能性が高い。もし他車の走行経路を予測することができれば、急な割り込みに対してもぶつかることなく安全に走ることができる。本研究では、他車の走行経路を予測する手法を構築し、自車の前方への割り込みをいち早く予測することで、より安全に走ることが可能な先進型車間距離制御システムの開発に取り組んだ。

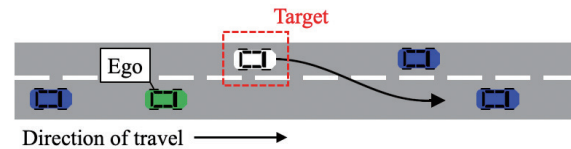


図1 想定する走行シーン

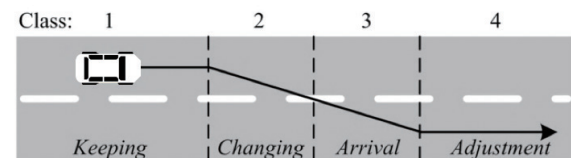


図2 車線変更のクラス定義

1. 研究の目的

交通事故を低減する運転支援システムの一つとして車間距離制御システム (Adaptive Cruise Control; ACC) が挙げられる。しかし、従来の ACC は自車の前方に割り込みが発生した場合、急激な減速を行うため後続車との衝突リスクが上昇すると報告されている^[1]。人は状況を認識・理解し、判断から操作を行うまでの時間を要するため、先行車の急激な減速に対して即時に対応できない可能性が高い。もし他車の走行経路を予測することができれば、急な割り込みに対しても大きな減速を行うことなく、安全に走ることができると考えられる。そこで本研究では、自車の前方に割り込む他車の動きを早い段階で予測し、いち早く車間距離を制御することで、大きな減速を行うことなく、より安全に走ることが可能な制御システムの構築に取り組む。

2. 研究方法と経過

2-1 問題設定

本研究では、衝突事故の主要因の一つである車線変更に注目し^[2]、図1のように他車が自車の前方に割り込む走行シーンを想定する。また、自車には周りの情報を計測可能なセンサ類が搭載されているとする。環境としては、直線道路上を走行していると仮定する。

2-2 提案手法

提案システムは他車の車線変更を予測する予測器と、その結果に基づいて車間距離を制御する制御器で構成される。

予測器では、他車の車線変更の予測を識別問題として捉え、サポートベクターマシン (Support Vector Machine; SVM) により多クラス識別を行う。現在、機械学習による識別手法として様々な手法が提案されているが、中でも SVM は先行研究で使われた実績が多く、優れた識別性能を持つ手法である。提案手法は非線形の識別問題で最も広く用いられる radial basis function を使用し、one-versus-all 戦略を用いることで、多クラス識別を行う。

本研究では、車線変更は図2に示すような4段階で行われると仮定し、現時点における運転者の意図が「Keeping」から「Changing」に変化すると、推定対象車は車線変更を行うと判断する。また、車線変更を行わない車は「Keeping」の状態が続くこととなる。

この際、SVM に入力される特徴量は推定性能を左右する重要な要素であり、有効な情報のみを使用した方が高い推定性能を有すると報告されている^[3]。本研究では、他車の車線変更予測を想定しているため、外部から計測可能な情報のみを用いる。また、車線を維持する場合を車線変更すると判断する誤認識率を抑えるため、周辺車両と推定対象車両の相対量は特徴量に含めない。提案手法は、推定対象車と中央線間の距離、推定対象車の進行方向の速度、推定対象車の横方向の速度の3つの情報を特徴量とする。

自車に実装される計測装置により測定される特徴量には誤差が含まれることが予想されるため、現在までのある時間幅内に測定されたデータ間の平均化によるフィルタリングを行

う。また、各次元における特徴量の大きさによる影響を抑えるため、正規化を行う。しかし、提案手法を車に実装し、オンラインで推定を行う際には全データから平均と標準偏差を求めて正規化を行うことは不可能であるため、平均と標準偏差による正規化は本手法に適しない。本研究では、各次元における特徴量の最大値による正規化を行う。中央線からの距離は車線の幅を最大値とし、進行方向の速度および横方向の速度は全学習データにおける最大値により正規化を行う。

予測器から推定対象車が車線変更を行うという結果が出力されたら、制御器は追従の対象を現車線の先行車から推定対象車に変更する。これにより、推定対象車が中央線を越える前からその動きに応じて車間距離を制御することとなり、急な割り込みに対しても早い段階から余裕を持って減速を行うため、より安全に走ることが可能となる。

制御器は次式に基づいて加速度の制御を行い、推定対象車との車間距離を調整する。

$$a_e = k_1(x_c - x_e - t_{hw}v_e) + (v_c - v_e)$$

ここで、 a_e は自車の加速度を、 k_1 と k_2 は重み係数を、 x_c と v_c は車線変更を行う推定対象車の位置と速度を、 x_e と v_e は自車の位置と速度を表す。また、 t_{hw} は車間時間 (time headway) を表し、パラメータである。提案システムでは、 $k_1 = 0.23$ 、 $k_2 = 0.07$ 、 $t_{hw} = 1.8$ と設定した。推定対象車が車線を維持している場合は、自車の先行車に対して同様の車間距離制御を行う。

2-2 予測器の構築および評価

予測器の構築のため、ドイツの自動車専用道路で計測された実交通流データを用いる⁽²⁾。このデータセットは上空のドローンからカメラで交通流を計測し、画像処理によってデータを数値化したものであり、約 11 万台の車両の走行データが記録されている。計測は全 6 カ所で行われた。中には、各車の車種やサイズ、速度、位置情報が記録されており、計測周期は 25 Hz、計測誤差は 10 cm である。データセットの中から 3,321 台の車線変更データを抽出し、3,000 台のデータを予測器の構築に用いる。また、残りの 321 台の車線変更データを使って構築した予測器の性能評価を行う。

2-3 ドライビングシミュレータを用いた評価被験者実験

予測器と制御器を統合したあと、車間距離の

制御を行う提案システムの総合評価のため、ドライビングシミュレータ (Driving Simulator; DS) を用いた被験者実験を実施した。実験で使った DS の様子を図 3 に示す。

使用した DS は 3 次元視覚情報を提示可能なプロジェクタを前方画面の表示に用い、ステアリング、アクセル、ブレーキ、スピードメータで構成された仮想コックピット環境を備えている。ハンドル、アクセル、ブレーキの操作量についての情報は PC に転送され、それらの操作量と車両のダイナミクスに基づいて車両の位置、姿勢が計算される。また、周辺車両の位置、速度、加速度、姿勢角などの情報が 60 Hz の周期で記録される。



図 3 実験で使った DS の様子

また、DS 走行時における実験参加者の生理反応の変化について調べるため、自律神経系の活動を表す指標である心拍計測を行った。図 4 に示すように、心拍センサーを実験参加者の肋骨付近に装着し、サンプリング周波数 1000 Hz で心電図を記録した。その生波形から心拍のピークの R 波を検出し、R 波間隔 (R-R Interval; RRI) の時系列を算出した。ここで、RRI が長くなることは心拍が遅くなることを意味する。

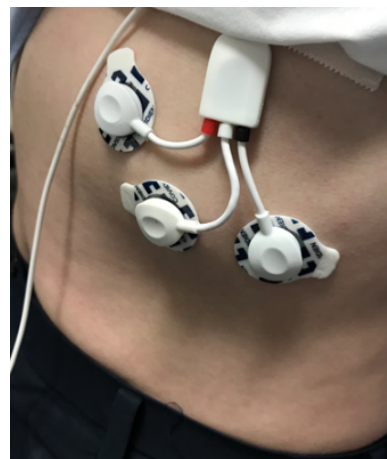


図 4 生体信号計測装置の写真

走行シーンとしては、片側 2 車線の直線の高速道路を想定する。各試行の開始から約 30 秒後に追い越しを指示するテロップが画面上に表れるように設定し、被験者にはテロップが表示されるまで左車線の先行車を追従するように予め指示する。追い越しのテロップが表示されたら被験者は右側の追い越し車線を走る車両を確認し、自分のタイミングで車線変更を実施するように指示する。追い越し車線上の車両群には車間距離を調整する制御系を搭載する。

本実験では、提案システムの有効性を評価するため、2 つの走行シナリオを用意する。追い越し車線上の車両群に提案システムを搭載し、被験者が運転する車の走行経路の予測結果に応じて車間距離を制御するシナリオと、被験者の車が中央線を越えてから車間距離を制御するシナリオである。両シナリオにおける衝突リスクを比較することにより、提案システムの有効性を評価する。

3. 研究の成果

3-1 予測器の評価結果

予測器の評価指標としては、検知精度と余裕時間の 2 つを用いた。検知精度はどれほど精確に車線変更を検知できるかを示す指標であり、Precision と Recall の調和平均から求まる F_1 スコアを用いた。余裕時間はどれほど早く検知できるかを示す指標であり、車線変更が検知された時刻から車両が中央線を跨ぐまでの時間差で定義される。すなわち、余裕時間が大きいほど、より早いタイミングで車線変更が検知できることを示し、優れた性能を持つといえる。表 1 に評価の結果を示す。

表 1 予測器の評価結果

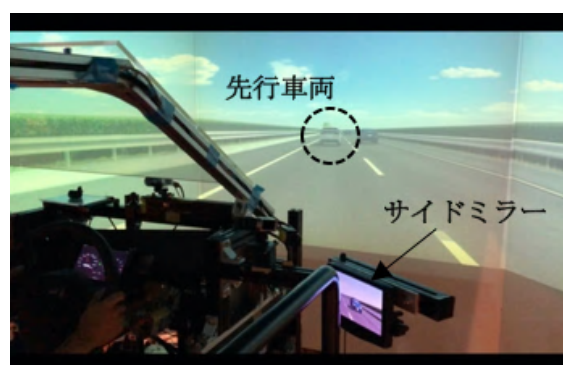
検知精度	98.7 %
余裕時間	3.4 s

検知精度と余裕時間の両指標において、高い性能が得られた。検知精度においては、すべての車線変更を検知することができたものの、車線変更しないケースを車線変更すると判断した False alarm がいくつか確認された。余裕時間においては、推定対象車が中央線を跨ぐ 3.4 秒前に車線変更を予測することができ、非常にいい性能を持つことが検証された。

3-2 DS を用いた実験の結果

実験には週に 1 回以上の運転を行う 12 名（男 6 名、女 6 名）の健常者が参加した。年齢構成は、20 代 4 名、30 代 4 名、40 代 4 名とし

た。本研究で行ったすべての人を対象とした実験は、参加者に東京大学ライフサイエンス委員会倫理審査専門委員会の承認済みの実験内容について説明を行い、インフォームドコンセントを取ってから実施した。被験者が DS の操作に慣れるよう、計測前に 2 回の試運転をしてもらった。その後、被験者ごとに 2 つの走行シナリオを 3 回ずつ、計 6 試行の計測を行った。走行シナリオの順番はランダムとした。先行車両の後ろを追従する際は、通常通りの自分の感覚で車間距離を保つように指示した。実験の様子を図 5 に示す。



(a) 追従運転時



(b) 追い越しの指示テロップ



(c) 車線変更後

図 5 実験の様子

衝突リスクを評価する指標として、衝突余裕度 (Margin-To-Collision; MTC) を用いた。この指標は先行車の後ろを後続車が追従している際、先行車と後続車が同時に加速度 -6.9 m/s^2 で急減速した場合に衝突するか否かを示すものであり、その値が 1 以下になると衝突

する可能性が高いことを表す。また、その値が高いほどより安全に走行していることを表す。提案システムと従来システムの MTC の比較結果を表 2 に示す。

表 2 衝突リスクの比較結果

	従来システム	提案システム
MTC	1.55	1.87

比較の結果、提案システムの方が従来システムと比べ、より安全に走行できることが検証された。また、被験者が運転する車が中央線を跨ぐ時刻における後ろの車との車間距離および相対速度を比較した。相対速度は負の値が後続車両が被験者の車両より速いことを表す。その結果を図 6 に示す。

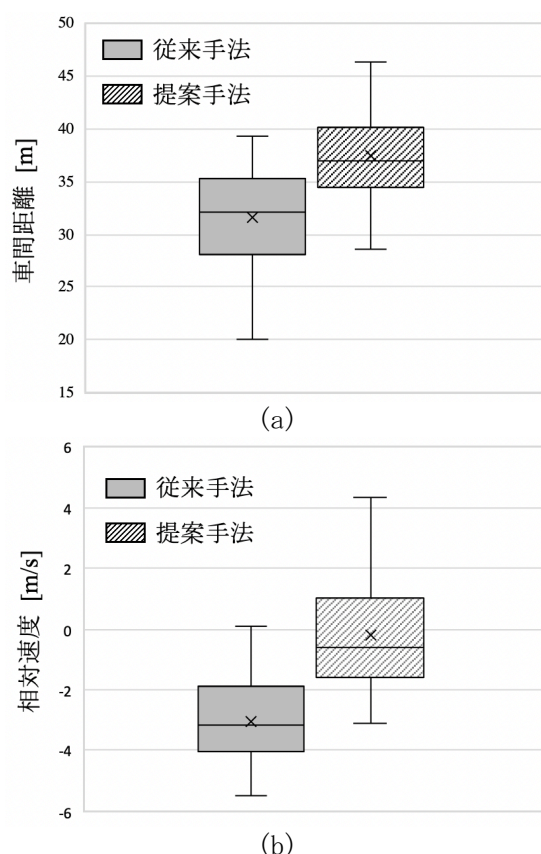


図 6 実験で使った DS の様子

提案システムは被験者の車が中央線を越えていなくても車線変更の意図を早い段階で予測し減速を行うため、被験者の車が中央線を越える時点では十分な車間距離を確保し、減速できていたことが図 6 から確認できる。

車線変更前後の 10 秒間における RRI の変化の結果について、図 7 に示す。両条件ともに車線変更前後で約 10 ms ほどの RRI の短縮がみられ、条件間に有意な差は見られなかった。

以上の結果から、提案システムにより自車の

前方に割り込む他車の動きを早い段階で予測し、いち早く車間距離を制御することで、大きな減速を行うことなく、より安全に走行できることが検証された。

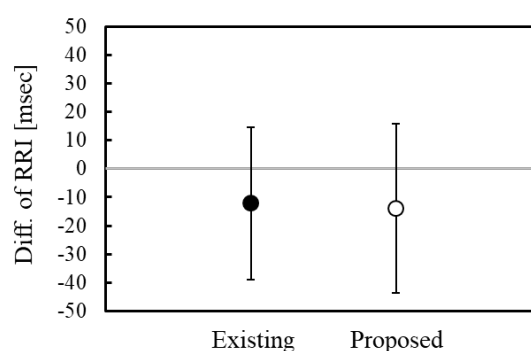


図 7 生体信号計測装置の写真

4. 今後の課題

今回の計測では、生理信号から従来システムと提案システム間の有意差は見られなかった。異なる走行シーンにおける検証実験の実施を検討している。

5. 研究成果の公表方法

今年度で開催される国内学会、または英文学術誌への論文投稿を検討している。国内学会としては 2022 年自動車技術会秋季大会を、英文学術誌としては MDPI Applied Sciences を検討している。

参考文献

- [1] A. Touran, M. A. Brackstone, and M. McDonald, A collision model for safety evaluation of autonomous intelligent cruise control, Accident Analysis and Prevention, Vol.31, pp.567-578, 1999.
- [2] U. S. Department of Transportation, Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey, USDOT, Report No. DOT HS 812 115, 2015.
- [3] J. Schlechtriemen, A. Wedel, J. Hillenbrand, G. Breuel, and K. D. Kuhnert, A lane change detection approach using feature ranking with maximized predictive power, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Intelligent Vehicle Symposium, 2014.