様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　２ 年　 ５ 月 ２９ 日現在

機関番号：１３９０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2017～2019
課題番号：１７Ｋ０６２５２

研究課題名（和文）市街地運転支援のための潜在的危険要因の行動予測に基づく経路計画システムの構築

研究課題名（英文）A research of motipn planning system for automated vehicles based on a prediction method of potential risk factors for urban driving.

研究代表者
赤木　康宏（Akagi, Yasuhiro）

名古屋大学・未来社会創造機構・特任准教授

研究者番号：９０４５１９８９

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、市街地運転行動データの収集および危険シナリオの分類方法の構築、運転行動データから危険運転行動モデルの標本抽出法の構築、および、自動運転システムへの適用と市街地走行実験を実施した。運転行動データの収集では、交通オントロジーに基づく新たなアノテーション方式を提案し、検索効率を10倍以上にした。危険運転行動の抽出法では、運転行動データから危険な標本のみを抽出する手法を構築し、国内外のデータを用いてその効果を検証した。市街地走行実験では、右折の開始判断を自動化する機構を実装し、被験者実験により周辺の交通参加者に与える危険度感を調査し、5%の被験者が危険な運転行動だと感じる結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究の成果のうち、人間の運転行動データから危険な運転行動の特徴を抽出し、その行動範囲を予測する手法は、自動運転車の行動判断機能の設計や、安全性評価試験のサンプルデータとして有用である。近年、自動走行機能をもつ車が次々と市販されている中で、その安全性を客観的に評価する手法の開発が求められており、本手法により試験サンプルを客観的かつ自動的に生成することで、課題解決に貢献できる点は社会的意義がある。また、自動運転車に搭載される行動判断機構がどのような指標により動作しているのかを客観的に示すことができる点は、自動運転車による公共的な交通サービスの実現に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：This research project consists of three part : to collect and analyse urban driving behavior data, a sampling method for dangerous driving behavior models from the driving data and applied the dangerous driving index to an automated driving system and conducted an urban driving experiment.
For the collection of driving behavior data, we proposed a new annotation method based on traffic ontology and increased the search efficiency by more than 10 times. In the sampling method of dangerous driving behavior, we constructed a method to extract only dangerous samples from driving behavior dataset and verified its effect using domestic and foreign dataset. In an urban driving experiment, a decision-making algorithm of an automated vehicle to start a right turn is implemented, and a subject experiment is conducted to investigate the degree of danger given to traffic participants. Then 5% of the subjects felt that the right turn behavior of the automated vehicle was dangerous.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：運転行動データベース　自動運転　マルコフ連鎖モンテカルロ　安全性評価

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

先進運転支援システムおよび自動運転に関する研究は、国外では欧州の AdaptIVe、米国の ITS Strategic Plan 等、国内では内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）等に代表される、大規模プロジェクトが実施されており、部分的な自動運転機能を有する自動車の販売も開始されている。現在販売されている車両に搭載されている技術は、高速道路や幹線道路で先行車を自動的に追従する機能や車線を認識して走行位置を維持する機能（NHTSA レベル 2 に相当）であり、可視の対象物への対応が主眼である。一方で、市街地における運転支援システムには交差点からの飛び出しのような、潜在的な危険状況を予見し、あらかじめ準備をしておく技術が必要であり、いまだ研究段階にある。研究代表者は、名古屋大学 COI において市街地自動運転システムの研究開発を行っている。この研究において、駐車車両の側方通過や、見通しの悪い交差点の通過といった場面において、飛び出し等を回避できる、安全な運転行動の生成技術を構築した経緯をもつ。このようなシステムにより生成された運転行動は、同様の死角等をもつ路地等対しては同様に減速行動を行ってしまう。一方で、規範的な運転者（人間）はその地点の危険要因の出現率に応じた対応を行っており、規範的な運転者の行動と、運転知能との間には乖離がある。そして、この乖離を解消しなければ、運転知能による支援が人間にとって受け入れ難いものとなり、実用化は困難となる。そこで、この問題を解決するために、危険要因の顕在化率の予測を導入する本研究の着想に至った。

２．研究の目的

市街地を運転する際には、交差点からの飛び出しや自転車の急な進路変更等の、潜在的な危険を予見する技能が運転者に求められる。本研究では、潜在的な事故要因の行動予測に基づく顕在化予測手法を構築し、市街地における高度運転支援を実現するための経路計画システムを実装・評価する。事故要因の顕在化が予測できれば、危険度の高い場面では事故を確実に回避できる慎重な運転行動を行い、危険度の低い場面では予備的な動作を行うような、熟練運転者と同等以上の運転行動を生成できる。

３．研究の方法

本研究は次の 3 手法により構成される。

・市街地運転行動データの収集および危険シナリオの分類方法の構築
・運転行動データから危険運転行動モデルの標本抽出法の構築
・市街地自動運転システムへの適用と被験者実験

各項目について、以下の細目で報告する。

３．１　市街地運転行動データの収集および危険シナリオの分類方法

市街地における典型的な事故やヒヤリハット事例を収集および分類するためのデータベース構築法を提案した。研究代表者が所属する東京農業大学では、約 12 万件のヒヤリハット事例を収集したデータベースを運用していたが、このデータベースを継承し、さらに効率的に交通イベントを分析するための手法として、交通オントロジーに基づく新たな交通形態分類法を構築し、成果発表を行った（自動車技術会論文集・2019）。

従来のデータベースでは複合語（例：交差点右折時）によるアノテーションがされており、計測地点（＝交差点）と進路（＝右折）や時間経過（＝時、他に開始前、開始後等）が分離されておらず、検索及び分析の効率に悪影響を及ぼしていた。これに対して、図１に例を示すように、交通オントロジーの考え方に基づきアノテーションに用いるキーワードを地点や進路等の基本要素ごとに分類し、整理しなおすことで、同様の意味を持ちながら、分解能の高いデータ表現を実現することができた。その結果、交通イベントの表現から冗長性を排し、より客観的な表現に改めるという効果、および、データベース構造の簡素化を実現し、検索効率を高めるという効果が得られた。検索効率は、図２に示すように 10 倍以上の検索時間の高速化を実現した。これにより、数十万件以上の大規模な事例分析に耐えうるデータベースシステムを構築できるようになった。

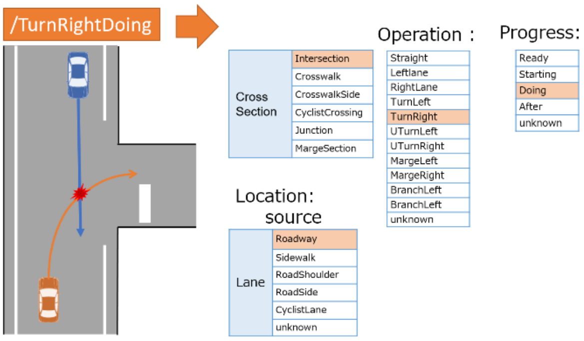

図１ヒヤリハットデータのアノテーション方式の改善

Search conditions	Processing time (s)	
	Previous system	New system
Incident level: High	9.93	0.84
+ Object type: Vehicle	9.95	0.13
+ Operation: Right turn	6.65	0.12
+ Weather: Fine	6.99	0.23

図２　データベース検索効率の比較

３．２　運転行動データから危険運転行動モデルの標本抽出法の構築

人間の運転行動データから運転行動の特徴を抽出する技術は、危険行動の予測を行ったり、自動運転システムの安全性評価の試験データに用いたりすることに応用可能であり、有用である。本研究では、危険な運転行動の特徴と傾向を客観的かつ自動的に抽出するために、確率論的モデルに基づき、危険な運転行動が運転行動全体のどのような位置に分布するのかを明らかにする手法を構築した。その方法と成果について本節で説明する。

運転行動を客観的に分析する際に、車両の位置や速度などの計測可能な時系列データを直接的に扱うことはデータ量が多く相互比較も困難であるので、運転操作を車両運動の物理モデル等により近似することで、より少数のパラメータにより表現する方法をとる。運転行動を少数のパラメータにより表現することができれば、そのパラメータ分布を解析することで、安全な運転行動と危険な運転行動との境界を明らかにするなどの解析が容易となる。本報告ではその一例として、車線変更時の運転行動をモデル化した事例を報告する。

図３に車線変更時の走行軌跡（上段・緑線）を示す。この車線変更動作を運転者の操舵と加減速操作として捉えると、操舵（ヨーレイト変化）は Sin 関数に類似しており（中段・青線）、加速度（アクセル・ブレーキ操作）は矩形波（下段・青線）により近似することが可能であるとわかった。これらのモデルにより車線変更時の操作を近似すると、５ 種のパラメータ（図中の記号“p”で表される値）により表現できる。

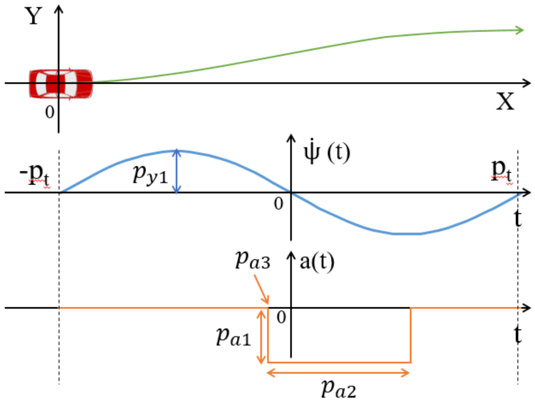

図３　運転行動のモデル化

このように、運転行動を少数のパラメータにより表現し、データベースに登録しておくことで、運転行動の分析を効率化できる。次に、このようにパラメータ化した運転行動データから、危険な運転行動の特徴を抽出するための手法について報告する。図４に危険度に着目した運転行動の抽出手順を示す。まず、運転行動データから対象とする運転場面（シナリオ）を選択し、パラメータセットをデータベースから得る。この時、シナリオの選択には３．１で述べた交通オントロジーに基づくアノテーションに用いるキーワードセットを用いる。次に、集出されたパラメータセットのパラメータ空間上での分布を混合ガウスモデルによりモデル化する。混合ガウスモデルを用いる理由としては、入力パラメータの次元数に依存することなくモデル化が可能であり、かつ後述する標本抽出法との親和性が高いことが挙げられる。ここで得られるパラメータ分布は入力の運転行動データ全体の傾向分布であり、平均値は安全な運転行動である場合がほとんどである。そこで、この分布から危険な運転行動のみを抽出する手法を構築した。その方法は、運転行動パラメータの分析の際に、危険度指標（例：車間距離、衝突余裕時間）を追加しておき、標本抽出の際に制約条件として、一定の危険度を下回る標本を却下することで、危険な運転の特徴のみを抽出する方法をとる。この方法は、メトロポリス・ヘイスティングス法としてよく知られており、これを交通の危険度予測に応用した方法を提案した。

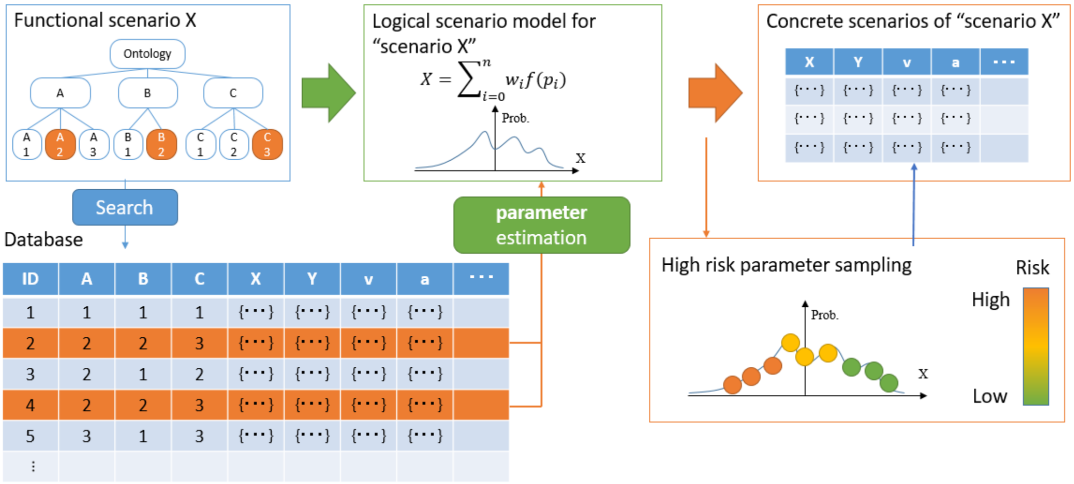

図４　危険運転行動のモデル化および抽出法

本手法の効果を検証するために、国内（日本自動車研究所・運転行動データベース）および国外（独 ika・HighD）の構築した走行データを用いて危険な運転行動の抽出を実施し、成果発表を行った（ITSC・2019）その結果を図５に示す。

図５は前述のデータベースに含まれる車線変更時の後続車との車間距離（縦軸）および相対速度（横軸）を表したものである。緑および青の点が入力となる全運転行動データであり、車間距離は小さいほど、相対速度は大きいほど危険な運転行動となる（追突されやすい傾向にある）。これに対して、危険な運転行動の特徴を分析し、標本抽出を行った結果（＝危険な運転行動の傾向を予測したもの）を、赤及び橙で示す。抽出され運転行動の標本は分布全体の左下方を覆う形で示されており、危険度の高い行動となっている。また、非常に危険度が高く、物理的に事故の回避が不可能なような無謀な運転行動（図左下の空白領域に相当する）は抽出されていないという特徴もある。これは、標本抽出により得られるデータの分布は入力データである人間がとりうる運転行動に従うので、論理的には可能である者の、過剰に危険であり人間がとりえない行動が除外されているということを表している。この結果から、本研究により現実的に発生しうる範囲での危険行動をモデル化できたといえる。これは、自動走行システムを設計する際に考慮すべき他者の行動範囲を示しているもので、1 章の背景でも述べた、過剰に防衛的な行動を予防するための指標として利用可能である。

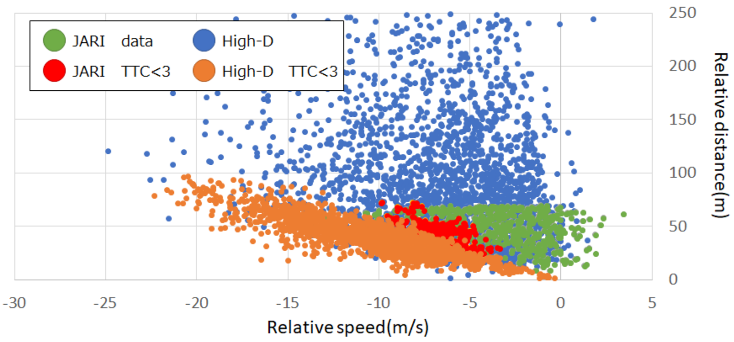

図５　データベースからの危険運転行動の予測結果

３．３　市街地自動運転システムへの適用と被験者実験

提案手法の応用として、自動運転車に対して危険度評指標を用いた安全性評価法を実装し、市街地走行実験時にその走行に対する危険度を調査する実験を実施した。本実験は、名古屋大学車両実験専門委員会および同大未来社会創造機構研究倫理委員会の承認のもとに実施した。実験は図６に示す市街地信号交差点を右折する場面に対して、衝突余裕時間に基づき対向車との危険度を計測し、右折の可否を判断するシステムを実装し、実施した。その際に、対向車に被験者を乗車させ（安全性を考慮して関係者が運転、助手席から自動運転車を観測）、前方を右折通過する自動運転車への危険度感をアンケート調査した。その結果、154 回の走行実験中 8 回の走行に対して危険度を感じるという結果となった。危険度を感じる事例は少数であったものの、今後の自動運転車の無人化などを考えると、さらに低減する必要がある。危険を感じさせる要因としては、センシングや通信の遅れなどにより発進タイミングが遅れることで、設計よりも短い時間的余裕をもって被験者車両の前を通過した点がある。よって、システム全体の応答性を高めるとともに、安全マージンをデータ処理の遅れ状況を監視しながら変化させるなどの対応が必要である。

図６　市街地走行による危険度感評価

４．研究成果

国内で収集された運転行動データおよび海外で公開されている車両の走行データを用いて、危険な運転行動の特徴を抽出する手法を構築し、成果発表を実施した。本研究ではまず、車両の物理運動モデルにより加減速および操舵を少数のパラメータで表現し、様々な運転行動をパラメータ空間上の分布としてデータ化する手法を提案した。その際、常時計測型の運転行動データを用いると、そのデータから得られるパラメータ分布は安全な運転行動がほとんどを占めるので、そのまま標本抽出を行うのみでは危険な運転行動のモデル化はできないという課題があった。そこで、少数の危険な運転行動パラメータの特徴を抽出するために、衝突余裕時間等の広く用いられている走行の危険度指標を制約条件とした、マルコフ連鎖モンテカルロ法に基づく標本抽出法を構築した。本手法は、走行データから危険な行動を抽出するばかりではなく、危険な運転行動のパラメータ空間上での分布を予測する方法であり、入力データの環境で発生しうる危険な運転行動の予測を行うことができる。これにより、自動運転システム等の安全性評価試験を実施する際に、実際の交通流の中で発生しうる、危険な運転行動を自動生成することができ、実効性の高い試験を実施することができる。また、市街地環境において、本手法で予測される危険な運転行動を避けるように設計された自動運転車を走行させ、周辺の交通参加者が感じる心理的危険度を調査した。その結果、5%の被験者が危険な運転行動だと感じた事例があり、物理的な安全マージンと心理的な安全マージンの間に差異があることが明らかになった。より安心感のある自動運転車等を構築するうえでは、危険度指標に対する心理的な側面も考慮する必要があり、今後の研究の課題となった。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計1件（うち査読付論文　1件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　1件）

１．著者名	４．巻
赤木 康宏、大北 由紀子、那住 正樹、菅沢 深、毛利 宏	50
２．論文標題	５．発行年
多様な利用法を受容するためのヒヤリハットデータベースの機能拡張に関する研究	2019年
３．雑誌名	６．最初と最後の頁
自動車技術会論文集	629～635
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	査読の有無
10.11351/jsaeronbun.50.629	有
オープンアクセス	国際共著
オープンアクセスとしている（また、その予定である）	－

〔学会発表〕　計3件（うち招待講演　0件／うち国際学会　1件）

１．発表者名
Y. Akagi
２．発表標題
Ontology based collection and analysis of traffic event data for developing intelligent vehicles
３．学会等名
IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics（国際学会）
４．発表年
2017年

１．発表者名
赤木康宏，大北　由紀子，那住正樹，菅沢深，毛利宏
２．発表標題
多様な利用法を受容するためのヒヤリハットデータベースの機能拡張に関する研究
３．学会等名
自動車技術会2018年春季大会
４．発表年
2018年

１．発表者名
赤木康宏，金森亮，劔持千歩，立石定芳，森川高行
２．発表標題
自動運転車の動作記述方式の提案と実路走行評価
３．学会等名
自動車技術会2019春季大会
４．発表年
2019年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

_

6．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考