

SAX を用いたブレーキ操作時の運転特性の抽出

岩崎賢太^{†1} 白石陽^{†2}

概要： 近年、自動運転技術に関する研究開発が活発に進められており、様々な企業や研究機関で無人自動運転車両の公道走行実験が行われている。そのため、近い将来に自動運転車両が普及することが考えられる。しかし、自動運転車両の開発は困難であり、自動運転車両の生産が日本の車人口に達するまでには、10年以上かかると思われる。したがって、自動運転車両が普及するまでに、自動運転車両と手動運転車両が混在した環境が想定される。自動運転システムと人間のドライバとは、停車時のブレーキ操作の仕方や交差点に安全に進入するためのタイミングなどの運転基準が異なるため、自動運転車両の運転によっては、事故や渋滞の原因になることが考えられる。したがって、自動運転車両と手動運転車両が混在した環境を考慮した自動運転技術の開発が必要である。本研究では、ドライバの運転基準はドライバの運転特性に依存すると考え、運転基準を把握するために運転特性の抽出を行う。ここで、運転特性とは、ドライバの運転操作による車両挙動の特徴とする。運転特性を抽出する方法として、本研究では、SAX (Symbolic Aggregate Approximation) を用いる。SAX は時系列データを文字列に変換することで、時系列データを抽象化する手法である。SAX を用いることで、センサーデータが抽象化され、ドライバの運転の違いを検出できると考える。運転特性を抽出する流れは、まず、スマートフォンを車載することで、車両挙動データを収集する。次に、収集した車両挙動データを SAX によって文字列に変換し、時間情報を含む部分的な文字列に分割する。最後に部分的な文字列に対して、文字列長や出現する文字の割合を分析することで、運転特性の特徴量を抽出する。本実験では、4人の被験者に対して走行実験を行い、収集した車両挙動データに表現文字種類が4, 8, 16種類のSAXを適用し、文字列長と文字変化割合を算出した。分析の結果、表現文字種類が多いほど、各ドライバの属性において異なる特徴が現れ、SAXを用いた車両挙動データ分析が運転特性の抽出に有効であることが示唆された。

Extraction of Driving Characteristics in Brake Operation Using SAX

KENTA IWASAKI^{†1} YOH SHIRAISHI^{†2}

1. はじめに

近年、自動車社会の安全と利便性の向上と環境負荷の軽減を目的として、自動運転技術の研究開発が進んでおり[1]、ZMP や Waymo などの様々な企業や研究機関で無人自動運転車両の公道走行実験が行われている[2][3]。現在までに、ドライバの不注意による事故を防ぐために、光ビーコンや電波メディアを用いて、ドライバに注意を促す安全運転支援システム (Driving Safety Support Systems, DSSS)[4]や車間距離を一定に保持しながら追従走行する ACC (Adaptive Cruise Control)、車線の逸脱を検出・予測しドライバに警告する車線逸脱防止支援システムなどで構成される先進運転支援システム (Advanced Driver-Assistance Systems, ADAS)[5]が実用化されており、近い将来には、自動運転車両が普及し、一般道路を走行することが考えられる。

自動運転システムには、自動化の程度や性能に応じた基準[6]があり、全ての地域の自動運転に対応した「レベル5」の自動運転システムの開発は困難である。また、フロスト

&サリバン ジャパンは、「レベル3」以上の自動運転システムを搭載した車両の普及予測[7]を公開しており、2018年末の日本の自動車保有車両数[8]が約8,000万台であることを考えると、自動運転車両は急激に普及するのではなく、十数年、数十年と長い時をかけて徐々に普及することが考えられる。そのため、自動運転システムが運転する自動運転車両と人間のドライバが運転する手動運転車両が混在した環境を想定することが重要である[9]。自動運転システムと人間のドライバでは、停車時のブレーキ操作の仕方や交差点に安全に進入するためのタイミングなどの運転基準が異なるため、自動運転システムが急な割り込みや想像よりも動きが遅い時に、ドライバが自動運転システムの運転に対応できずに誤操作する可能性があり、事故や渋滞の原因になることが考えられる。したがって、自動運転車両と手動運転車両が混在した環境を考慮した自動運転技術の開発が重要であると考えられる。

自動運転車両と手動運転車両が混在した環境を想定した研究では、車車間通信や路車間通信といった車両間、車両と道路間で情報を共有する研究がある[10][11]。文献[10]では、各自動運転車両の情報を収集し、自動運転車両を制御するための自動運転方策の学習方法を提案している。文献[11]では、非優先道路から優先道路への交差点進入のた

^{†1} 公立はこだて未来大学システム情報科学研究科
Graduate School of Systems Information Science, Future University
Hakodate

^{†2} 公立はこだて未来大学システム情報科学部
School of Systems Information Science, Future University Hakodate

めのプロトコルを提案している。しかし、ドライバの運転には個人差があるため、交差点に安全に進入する際の必要な距離が変化することが考えられる。そのため、ドライバの個人差や周辺環境を考慮した運転基準の把握が重要であるとする。ここで運転基準は、停車時のブレーキ操作の仕方や交差点に進入するタイミングなどといったドライバが安全に運転するための指標を表す。そこで本研究では、ドライバの運転基準は、発進や停車といった運転行動中に行われるアクセルやブレーキなど運転操作の結果である車両挙動の特徴に依存すると考え、この車両挙動の特徴をドライバの運転特性と捉えて、運転特性を抽出するための車両挙動データ分析を行う。抽出したドライバの運転特性を共有することにより、自動運転システムは各ドライバの運転基準に合わせた運転が可能になり、混在した環境において、様々なドライバの運転に対応することができると考える。

そこで本研究では、車載スマートフォンを用いて収集した車両挙動データに SAX (Symbolic Aggregate Approximation) を適用し、車両挙動データを文字列で表現する。SAX は時系列データを文字列に変換することで、時系列データを抽象化する手法である[12]。SAX は時系列データの抽象度を調整できるため、ドライバの運転の違いの検出や日によるドライバの運転の違いを吸収できると考える。そして、SAX によって変換した文字列に、文字列処理による車両挙動データ分析を行うことで、停車におけるブレーキ操作時の運転特性の抽出を行う。

以降、2 章では運転特性を抽出に関する研究について述べる。3 章では、本研究で提案するドライバの運転特性の抽出のための車両挙動データ分析手法について述べる。4 章では、停車時のブレーキ操作による車両挙動データの分析について述べる。5 章では、本論文についてまとめる。

2. 関連研究

本研究では、ドライバのブレーキ操作時の運転特性を抽出する。そこで、運転特性に関する研究として、2.1 節では運転特性の抽出に関する研究について述べる。その中でも、センサやデバイスなどをドライバに装着した研究と CAN (Controller Area Network) や車載スマートフォンなどの車載センサを用いた研究について述べる。次に 2.2 節では車両挙動の分析に関する研究について述べる。

2.1 運転特性の抽出に関する研究

2.1.1 装着型デバイスを用いた研究

装着型デバイスを用いた研究として、筋電センサを用いた研究[13]と加速度センサを用いた研究[14]がある。

まず、筋電センサを用いた研究として、鳥居らは、顔と腕に筋電センサを装着し、緊張、不快や不安などに関連が

あるとされている筋電位、視線情報と皮膚情報から、追従走行時のギア比特性の特徴量を抽出している[13]。さらに、抽出した特徴量からギア比特性を識別するのに有効な特徴量を選択するために、k-means 法による分析を行い、ドライバのギア比特性の分類精度を評価することで、有効な特徴量を検討している。

次に、加速度を用いた研究として、小林らは、腕と手に加速度センサを装着し、ハンドル操作の加速度データを収集している[14]。収集した加速度データに特異値分解を適用することで、ドライバに共通する類似成分とドライバの特徴を表す成分を抽出することで、ドライバごとの差異を把握し、運転操作の改善を促すことで、運転操作を含む運転技量の向上を促進している。

しかし、文献[13][14]は、データ収集を行う際に装着型デバイスを着用しているため、ドライバへの装着負担が大きい。また、車両ごとにハンドルの重さや加減速の大きさなどの車両特性が異なるため、同一のセンサデータが得られたとしても、運転操作結果の車両挙動変化が同一であるとは限らない。手動運転車両では、同じ普通車でも多くの種類があるため、運転特性の抽出に誤差が生じることが考えられる。ドライバに負担を与えず、車両特性による影響が少ないデータ収集が必要である。

2.1.2 車載センサを用いた研究

車両挙動に伴う車両の振動や動きなどを収集できる車載センサを用いた研究として、CAN を用いた研究[15][16]とスマートフォンを用いた研究[17]がある。

CAN を用いた研究として、谷口らは、ドライバの車両挙動は暗黙的に二重分節構造を含んでいると仮定し、時系列データからチャンクを抽出する手法を提案している[15]。この手法は、CAN から収集した運転時系列データに二重分節解析を行うことで、チャンクを抽出している。さらに、ドライバの運転意図や認識状態と抽出したチャンクを比較することによって、車両挙動のパターンを抽出している。岡田らは、車載センサから収集したアクセル開度とブレーキ圧に DTW (Dynamic Time Warping) を適用し、アクセルパターンとブレーキパターン頻度の割合を分析することで、各ドライバの運転特性を抽出している[16]。

スマートフォンを用いた研究として、林らは、車両に固定したスマートフォンから位置情報と 3 軸加速度などを収集し、SVM (Support Vector Machine) を用いた回帰モデルを構築することで、コーナリングにおけるドライバの運転特性を抽出している[17]。

文献[15][16]の CAN 情報を用いた手法では、坂道や下り道などの道路環境の違いによるアクセル開度やブレーキ圧の変化を考慮することが難しいため、運転特性の抽出に誤差が生じることが考えられる。文献[17]のスマートフォンを用いた手法では、上下方向の加速度によって、坂道や下

り道などの道路環境を考慮することができ、最終的な運転操作結果である、車両挙動を収集しているため、車両特性による影響が小さいと考える。しかし、車両のアクセル開度やブレーキ圧などの情報が取得できないと考える。前項で挙げた装着型デバイスを用いた研究では、ドライバの身体の動きから直接的にデータを収集しているため、ドライバの意思決定から実際に運転操作するまでの時間間隔が短い。一方、車載センサを用いた研究では、運転操作時の車両情報もしくは、車両挙動を間接的に収集しているため、ドライバの意思決定からの時間間隔がやや大きく、装着型デバイスよりもドライバの運転の感覚から離れることが考えられる。しかし、デバイスをドライバに装着する必要がないため、装着負担が小さいこと、車両情報または車両挙動を収集するため、車両特性の影響が小さいことから、車載センサによるデータ収集は、ドライバの運転特性の抽出に有効であると考えられる。

2.2 車両挙動データの時系列分析に関する研究

車両挙動の分析に関する研究として、DTW を用いた研究[18]と SAX を用いた研究[19]がある。

赤松らは発進、停車、右左折に対して、OBD2 (On-Board Diagnostic second generation) を用いて加速度データを収集し、時系列間の類似度を算出する手法である DTW を適用することで、ドライバの運転特性を分類している[18]。しかし、停車以外の運転行動では、ドライバの運転特性に大きな違いが確認できていなかったことから、車両挙動の変化が小さい運転行動において、運転操作の違いがあっても同様の、もしくは類似した運転特性が抽出されることが考えられ、運転基準の把握に影響があることが推測される。

横山らは、スマートフォンを車載して収集したセンサデータに SAX を適用することでセンサデータを抽象化し、N-gram や BoW (Bag of Words) といった自然言語処理技術を用いて車両挙動の種類を推定している[19]。この手法では、SAX によって変換した文字列に対して、ランレングス符号化を行い、文字成分と数値成分に分割することで、センサデータの変化の大きさと文字成分に対応した時間に分けて車両挙動データを表現している。車両挙動データを表現した文字列に対して、任意の文字数に分割する N-gram と文字列中に存在する部分文字列の頻度を算出する BoW を適用することで、車両挙動の種類を推定している。しかし、N-gram で作成した部分文字列の時間情報が考慮されておらず、抽出した文字列が全体の車両挙動のどの部分に相当するかがわからないため、車両挙動の順序関係が考慮できず、運転特性の一つであるタイミングの特徴が抽出できない。よって、時間情報を考慮した車両挙動データ分析が必要であると考えられる。

3. 提案手法

本章では、まず 3.1 節で本研究における研究目的について述べる。次に、3.2 節では本研究における研究課題とアプローチについて述べる。3.3 節では本研究で対象とする道路環境について述べる。3.4 節では車載スマートフォンを用いた車両挙動データの収集方法について述べる。3.5 節では、提案手法の詳細について述べる。

3.1 研究目的

本研究の目的は、ドライバの運転基準を把握するために、車両挙動からドライバの運転特性を抽出することである。本稿では、代表的な運転行動の一つである「停車」の分析結果について述べる。1 章で述べたように、自動運転技術の研究開発において、自動運転車両と手動運転車両が混在した環境を想定した技術開発が不可欠である。自動運転システムと人間のドライバでは、運転基準が異なるため、自動運転システムの運転によっては、人間のドライバは「危険」に感じることがあり、事故や渋滞につながる事が考えられる。そのため、自動運転システムが周辺ドライバの運転基準に合わせて運転することが必要である。そこで本研究では、車両挙動に関するデータを収集し、SAX による分析を行うことで、運転特性を抽出する。

3.2 研究課題とアプローチ

3.1 節で述べた研究目的を達成するには、以下の 4 つの課題を解決する必要がある。

- 運転特性の抽出に有効なデータ収集方法の検討
- 文字列による車両挙動データの表現
- 車両挙動データ分析の時間情報の考慮
- 文字列処理による運転特性の抽出

課題 a のアプローチとして、車載したスマートフォンに内蔵されているセンサから車両挙動に関するデータを収集する。2.1 節で述べたように、装着型センサを用いた場合は、データ収集時のドライバへの装着負担が大きい。また、車両特性が異なり、収集したデータと実際の車両挙動の変化が一致するとは限らないため、分析結果に誤差が生じる原因になる。車載センサを用いた場合は、ドライバにデバイスを装着する必要がないため、ドライバへの装着負担がない。また、アクセル開度やブレーキ圧、エンジンの回転数などの車両情報もしくは、運転操作の結果である車両挙動を収集するため、装着型デバイスよりも車両特性による影響が小さい。車載センサを用いた方法としては、CAN とスマートフォンを用いた方法が挙げられるが、最終的な運転操作結果の車両挙動の収集を目的としているため、車両特性の影響が最も小さく、坂道や下り坂の勾配が算出可能

であることから、車載スマートフォンを用いる。

課題 b に対するアプローチとして、収集したセンサデータに SAX を適用して文字列に変換することで、車両挙動を文字列として表現する。ドライバの運転は日によって変化する可能性があり、ドライバの運転特性の抽出に誤差が生じることが考えられる。そこで、SAX のデータの抽象度を調整することで、運転特性の誤差を軽減できると考える。文献[19]では、SAX を用いた車両挙動データ分析が、車両挙動の種類の推定有効であることを示唆されている。ここで、ドライバの運転特性を把握するためには、発進や停車、右左折などの運転行動の運転操作ごとにドライバの運転の特徴を抽出する必要があると考える。運転行動の代表的な例として、「停車」について考える。停車は、ブレーキ操作による「ブレーキ開始」、「ブレーキ」、「停車」という3段階の運転操作から構成され、各段階での運転特性として、ブレーキ開始時のタイミング(信号までの距離)、ポンピングブレーキの有無、停車時の停止線までの距離などがあり、これらの特徴はドライバごとに異なる。この様子を図1に示す。

ブレーキ開始	ブレーキ	停車
		
<ul style="list-style-type: none"> ブレーキの強さ 開始距離 	<ul style="list-style-type: none"> ブレーキの強さ ポンピング 	<ul style="list-style-type: none"> ブレーキの強さ 信号までの距離

図1. 「停車」の運転操作における車両挙動の例

図1に示す一連の車両挙動データに SAX を適用することで、運転行動の一連の流れを考慮し、各運転操作の特徴の抽出を試みる。そこで本研究では、センサデータに SAX を適用して文字列に変換し、車両挙動を表現する。

課題 c に対するアプローチとして、ランレングス符号化を行い、文字成分と数値成分を抽出し、数値成分から累積和を算出し、各成分と対応づけることで車両挙動データ分析の時間情報を考慮する。2.2 節で述べたように、横山らの手法では、N-gram で作成した部分文字列の時間情報が考慮されていないため、タイミングの特徴抽出ができないと考える。よって、時間情報を考慮した車両挙動データ分析が必要である。そこで、SAX によって変換した文字列にランレングス符号化を適用し、文字列を文字成分と数値成分の二つに分ける。さらに、先頭の数値成分から各数値成分までの累積和を算出し対応づける。これにより、データ開始時点からの時間情報が把握できるため、時間情報を考慮した車両挙動データ分析が可能になる。よって、ランレングス符号化を適用し、抽出した数値成分から累積和を算出し、対応づけることで時間情報を考慮した車両挙動データ分析を行う。

課題 d に対するアプローチとして、基準文字を設定し、基準文字ごとに元の文字列を分割することで、部分文字列を作成する。運転特性の一つであるタイミングの特徴を抽出するには、それぞれの運転操作に対応する部分文字列を作成する必要がある。各運転操作に対応する部分文字列を作成するために、まず、運転操作の区切りとなり得る「基準文字」を設定する。次に、設定した基準文字から次に基準文字が現れるまでの文字列を部分文字列として作成する。基準文字の定義と部分文字列の作成手順の詳細は後述する。このように作成した部分文字列に、課題 c で述べた累積和による時間情報を付与することにより、タイミングの特徴が抽出できると考える。

3.3 想定道路環境

本論文では、自動運転車両が交差点にて右折をしようとしている状況(図2)、自動運転車両が非優先道路にて右折しようとしている状況(図3)を想定する。

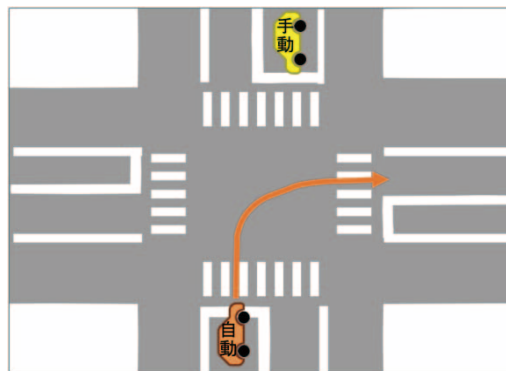


図2. 想定道路環境(交差点)

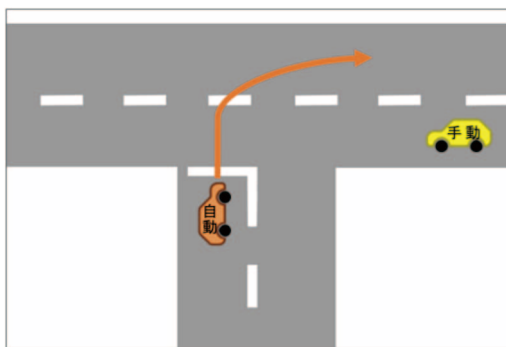


図3. 想定道路環境(T字路)

図2では、対向車線に手動運転または自動運転車両が走行している時、自動運転車両が一時的に対向車線に進入しても、手動運転車両のドライバの運転基準について調査する必要がある。図3では、自動運転車両がT字路の非優先道路に位置し、右折しようとしている。右折の場合は、図2の交差点の時と同様に考えることができる。しかし、T字路の場合、右折する時、自動運転車両は右折した後に前

方、後続車両と同じ速度に達するまで加速する必要がある。そのため、右折するときは、十分な速度になるまでの運転基準を考慮する必要がある。特に、周辺環境によって、各ドライバの運転基準が変化するため、将来的には周辺環境を考慮した運転基準の把握が必要であると考え。したがって、自動運転車両と手動運転車両が混在した環境下において、自動運転システムとドライバの運転基準の違いが事故や渋滞に結びつきやすい図2と図3の道路を想定する。

3.4 車両挙動に関するデータの収集

本研究では、車載ホルダーを用いてスマートフォンを車両のダッシュボードの上に設置し、車両挙動データを収集する。まず、車両の動きや傾き、振動などが計測できるセンサデータとして、加速度センサ、角速度センサ、地磁気センサからセンサデータを取得する。収集するセンサデータは、サンプリングレート 50Hz の 3 軸加速度センサ、3 軸角速度センサ、3 軸地磁気センサとサンプリングレート 10Hz の GPS による位置情報である。データ収集時のスマートフォンは、各 3 軸センサの X 軸が車両の左右の方向、Y 軸が鉛直方向、Z 軸が進行方向となるようにダッシュボード上に設置する（図4）。

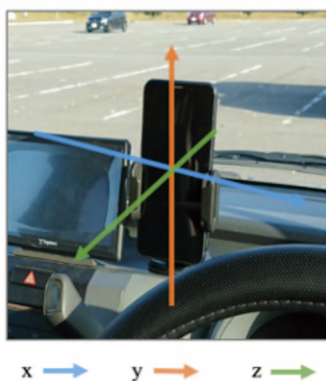


図4. スマートフォンの設置環境とセンサ軸の向き

3.5 SAX を用いた車両挙動データ分析

本節では、収集したセンサデータから運転特性の特徴量を抽出するまでの流れについて述べる。3.5.1 項で、SAX によってセンサデータを文字列に変換する流れを述べる。

3.5.2 項で、ランレングス符号化することで、文字列から文字成分と数値成分を抽出と累積和の算出について述べる。

3.5.3 項で、基準文字を設定し、部分文字列を作成する手順について述べる。3.5.4 項で文字変化割合による車両挙動データ分析について述べる。

3.5.1 SAX によるセンサデータの文字列変換

SAX は時系列データを文字列に変換する手法で、時系列データのノイズ除去やデータ容量が削減できることが示さ

れている[5][20]。SAX によるデータの抽象度を調整することで、日毎によるドライバの運転の違いを吸収できると考える。本研究で SAX を適用する前処理として、センサデータの標準化を行う。SAX によって時系列データを文字列に変換する手順を以下に示し、そのイメージを図5に示す。

- (1) 時系列データが正規分布に従っていると仮定し時系列データを標準化（平均が 0、分散が 1 になるように変換）する。
- (2) 時系列データを時間軸に対して等間隔に分割する。
- (3) 分割された時間内のデータの平均値を算出する。
- (4) 正規分布に従って分割した区間に文字を割り当てる。
- (5) 手順(3)より算出した値を手順(4)に基づいて文字に変換する。

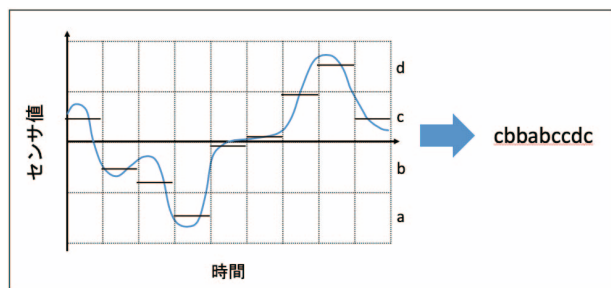


図5. SAX の概要

3.5.2 ランレングス符号化による車両挙動の表現

時系列データに SAX を適用して変換した文字列をランレングス符号化する。3.5.1 項でセンサデータを文字列に変換する手順について述べた。SAX によって変換した文字列は、センサデータ値の変化情報と時間情報の二つを含んでいる。そこで、ランレングス符号化を行い、文字成分と数値成分に分けることで、車両挙動データ分析を容易にする。ここで、ランレングス符号化は、元の文字列の情報を完全に保持したまま、文字列を圧縮できるため、ランレングス符号化された文字列（以下、ランレングス符号化文字列）から元の文字列への復元が可能である。よって、SAX によって変換した文字列に、ランレングス符号化を適用しても、運転特性の抽出の影響は少ないと考える。ランレングス符号化文字列は、文字と数値が交互に並んで構成されており、各数値部分に対してそれまでの数値成分の累積和を計算し記録することで、先頭文字からの経過時間を表現する。

3.5.3 基準文字による部分文字列の抽出

累積和を用いた運転特性の特徴を抽出するために、基準文字を設定し、ランレングス符号化文字列から抽出した文字成分を基準文字に従って分割する。分析対象の運転行動としては発進、停車、右左折などがあるが、課題 d で述べたように、各運転行動によって、運転操作に対する車両挙

動データの変化の仕方が異なるため、運転操作に対応する部分文字列の作成が必要である。そのため、各運転行動と各センサデータに応じて基準文字を設定する必要がある。ここでは、停車の進行方向の加速度を例に部分文字列を作成手順について説明する。まずは、基準文字を設定する。進行方向の加速度は、ブレーキ操作を行うと、進行方向の加速度の値は上下に振動し、一定の強さでブレーキペダルを踏み続けた場合、加速度は0に収束する。そのため、基準文字として、0を含む領域、または、0に最も近い正の領域の文字を設定する。次に、設定した基準文字が現れた箇所から、次に基準文字が現れる箇所までの文字列を抽出することで、部分文字列を作成する。最後に、作成した部分文字列に対して、各成分の対応付けを行う。対応付けを行うことで、ランレングス符号化文字列の情報を部分文字列に反映できる。これにより、それぞれの運転操作に対応した部分文字列を作成し、運転特性であるタイミングの特徴が抽出できると考える。この一連の処理を図6に示す。

文字成分	C B A B C	C D C	C B C
数値成分	1 2 1 1 2	2 2 2	2 1 1
累積和	1 3 4 5 7	7 9 11	11 13 14

図6. 基準文字による部分文字列の抽出

3.5.4 文字変化割合に車両挙動データ分析

抽出した部分文字列の文字成分の文字変化割合を分析することで、ドライバのブレーキの強さの特徴が抽出できると考える。各部分文字列の文字成分と数値成分を用いて、部分的なブレーキ操作による車両挙動の文字変化割合を分析することで、ドライバのブレーキの強さの特徴を抽出する。ここで、文字変化割合を算出する方法について述べる。まず、SAX適用後の文字列長を L ，“aa”や“ab”といった文字列中の2文字を i, j とし、その文字の出現数を S_{ij} としたとき、文字変化割合 P_{ij} を以下に記す。

$$P_{ij} = \frac{S_{ij}}{L-1} \quad (1)$$

ここで、文字変化割合は、ランレングス符号化で抽出した文字成分のように同じ文字が連続しない文字列を対象にしても文字変化割合を算出できるが、数値成分の情報が欠落することが考えられる。そのため、“aa”といった同じ文字が連続する文字も対象にすることで、数値成分の情報も文字変化割合に与えることができる。各車両挙動データに上記の式を算出することでドライバのブレーキの強さの特徴を抽出する。

さらに、各部分文字列には、累積和の情報を付与してい

るため、ブレーキ操作のタイミングとブレーキの強さの特徴がどの時系列で現れたかが把握できる。そのため、ブレーキをかけ始めた位置で強めにブレーキを踏み、徐々に減速したドライバと停車位置の直前にブレーキを強く踏んで減速・停車したドライバの違いが抽出できると考える。

4. 実験および考察

本章では、まず4.1節では、車両挙動データ分析のためのデータ収集方法について述べる。次に4.2節では、ポンピングブレーキの特徴抽出に向けた文字列長と部分文字列の分析について述べる。次に4.3節では、ブレーキの強さの特徴抽出に向けた文字変化割合の分析について述べる。

4.1 車両挙動データ分析のためのデータ収集方法

本実験では、停車のブレーキ操作による車両挙動データを収集するため、普段車を運転している4人の被験者に対して、長さ200mの直線道路を走行させ、指定した地点で停車させる実験を行った。ここで、各被験者の詳細について、表1に示す。

表1. 各被験者の詳細

被験者	運転歴(年)	ブレーキ操作の傾向
P ₁	2	やや緩やか
P ₂	1	強め
P ₃	2	やや強め
P ₄	2	とても緩やか

収集したデータは、3.4節で述べた通りに行った。さらに、ドライバのブレーキ操作のタイミングを確認するために、タイムスタンプを収集した。

実験手続きとして、まず、実験者は、被験者に走行するコース、停車位置、車両が停車した時の運転の説明を行った。次に、実験者はセンサデータの計測と同時にストップウォッチで時間を計測した後に、被験者に指定したコースを走行するように教示した。最後に、実験者は被験者がコースを走行している間、ブレーキ操作のタイムスタンプを収集するために、被験者の足の動きを確認しながら、タイムスタンプを記録した。被験者は、実験者による実験内容の説明を受けた後、車両感覚に慣れるために、コースを走行、停車する練習を行った。本番では、実験者による合図を受けた後、停車位置までに時速40kmを維持して走行し、普段どおりの運転感覚でブレーキ操作を行い、停車した。この流れを1試行とし、各被験者に対して10試行分を行った。

4.2 文字列長と部分文字列による分析

文字列長と部分文字列による分析では、停車時のブレーキペダル操作の傾向であるポンピングの特徴を抽出する。

ランレングス符号化文字列の文字成分は車両挙動の変化の大きさを表しており、車両挙動が変化すると文字も変化する。そこで、表現文字種類 $W=4, 8, 16$ において、Z 軸加速度データに SAX を適用し、ランレングス符号化文字列の文字列長と基準文字により分割された部分文字列数を被験者ごとに算出し比較を行った。基準文字は、 $W=4, 8, 16$ の場合、それぞれ ‘c’, ‘e’, ‘i’ と設定した。抽出した文字成分の文字列長を図 7 に、部分文字列の数を図 8 に示す。

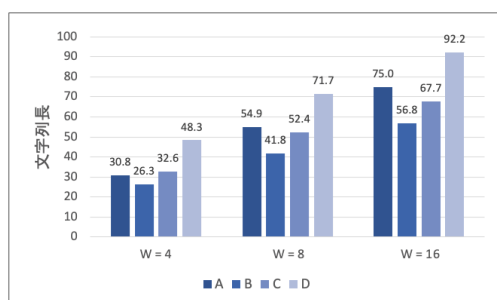


図 7. 文字列長の平均

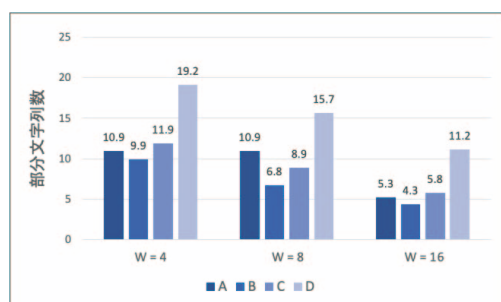


図 8. 抽出部分文字列数の平均

図 7 より、各表現文字種類 W において、被験者 P_4 は他の被験者と比較して文字成分の文字列長が大きい傾向にある。これは、Z 軸加速度データが細かく変化し、文字成分の文字列長が大きくなったことが考えられる。よって、被験者 P_4 のブレーキ操作は、慎重なブレーキ操作で細かくペダル操作したことがわかる。また、被験者 P_2 は他の被験者と比べて文字列長が小さい傾向であることが読み取れる。このことから、ドライバのブレーキペダル操作の仕方によって生じる車両挙動の変化が、文字成分の文字列長の大小に影響したことが考えられる。よって、文字成分の文字列長から、ドライバのブレーキ操作の傾向、ポンピングの特徴が抽出できると考える。

図 8 より、各表現文字種類 W が大きくなるにつれて、全被験者の抽出部分文字列数が減少傾向にあった。被験者 P_4 においては最も抽出部分文字列数が多くなり、他の被験者と比較して 5 個以上多く部分文字列が抽出されている。3.5.3 項で述べたように、ブレーキペダルを操作すると加速度の値が上下に振動し、一定の強さでブレーキペダルを操作すると 0 に収束する。そのため、被験者 P_4 の部分文字列

数が大きいことから、ブレーキペダル操作を細かく行っていたことが推測できる。次に、文字列長が最も小さかった被験者 P_2 の抽出部分文字列数は、被験者 P_1 と P_3 より 1 つ分少ない結果になった。

以上の 2 つの分析結果から、ブレーキペダル操作によって、文字成分の文字列長と抽出部分文字列数の大小の傾向に違いが見られた。よって、各被験者のブレーキペダル操作の傾向に違いがあることが示唆された。さらに、表現文字種類 W を増やすと被験者ごとの違いがより明らかになったことから、文字成分の文字列長と部分文字列数は運転特性の特徴量の一つとなり得ること示唆された。

4.3 文字変化割合による分析

文字変化割合による分析では、停車時のブレーキの強さとタイミングの運転特性を抽出する。表現文字種類 $W=4$ において、3.5.4 項の式(1)から算出した文字変化割合とその文字変化の差のグラフを図 9 に示す。

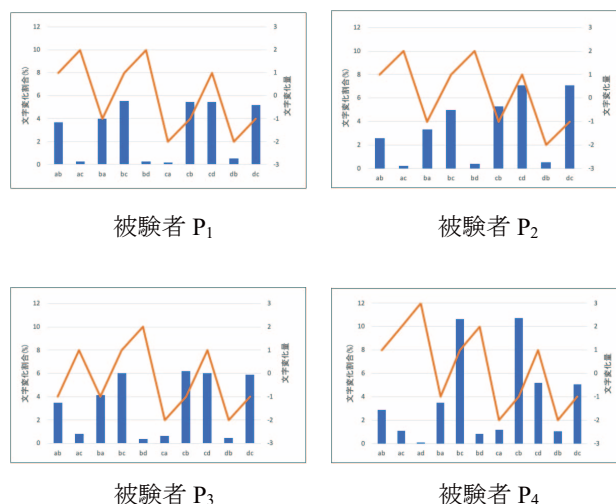


図 9. 文字変化割合 ($W=4$)

まず、グラフの説明を行う。上記のグラフの横軸は Z 軸加速度データ値が小さい順に並んでいる。 $W=4$ の場合は、“ab” が最も加速度の値が小さく、“dc” が加速度の値が最も大きいことを示している。青色の棒グラフは、文字の変化の割合を示している。全体の文字変化の中で、“X” から “Y” に文字が変化した割合を示している。橙色の折れ線グラフは、文字の変化量を表す。ブレーキ時の進行方向の加速度データの変化の場合、値が正であれば加速度が上昇し、負であれば加速度が減少したことを示す。例えば、“ab” の場合は、変化量が +1、“ac” の場合は、変化量が +2、“db” の場合は、変化量が +2、となる。さらに、値が 0 から離れるほど、文字変化量が多くなるため、車両挙動の変化が大きいことを表す。

図 9 の $W=4$ の文字変化割合では、全被験者において

“bc”と“cb”と“cd”と“dc”の割合が高かった。特に被験者 P₄は“bc”と“cb”の割合が他の被験者より高い傾向にあった。文字変化割合の傾向をみると、被験者 P₁と P₃, P₄は左右対称的なグラフとなっており、P₄は車両挙動変化が小さい“bc”と“cb”の割合が高い山型でP₁とP₃は比較的平らなグラフとなった。ここで、被験者 P₄は、文字変化量が-1, +1である“ab”と“dc”の割合が低く、“bc”と“cb”の割合が他の被験者よりも高い。W=4の場合の基準文字は‘c’であることから、“ab”と“dc”よりも“bc”と“cb”方が加速度の値が0に近いので、被験者 P₁や P₃よりも慎重で細かなブレーキ操作であったことがわかる。被験者 P₁と P₃では、文字変化割合に大きな違いは見られず、ほとんど同じ結果となった。被験者 P₂は右肩上がりのようなグラフとなっている。特に“cd”と“dc”の割合が高い。また、横軸の文字列は、加速度の値が小さい順から並べられているため、“cd”と“dc”は最も加速度の値が大きいことを示し、ブレーキを強く踏んだことを意味する。よって、被験者 P₂は、他の被験者よりもブレーキペダルを強く踏んだ傾向が見られた。このことから、文字変化割合と文字変化量から被験者のブレーキ操作の特徴が抽出できると考える。次に文字表現種類を8種類と16種類にし、センサデータの抽象度を落とした分析結果を図10と図11に示す。

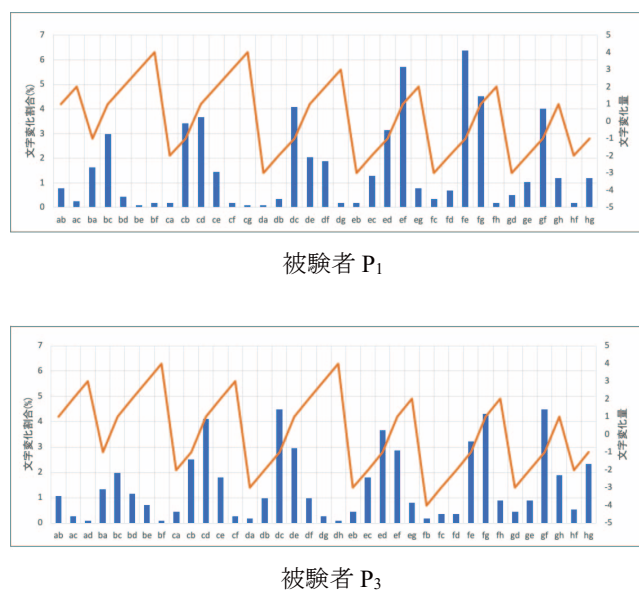


図 10. 文字変化割合 (W=8)

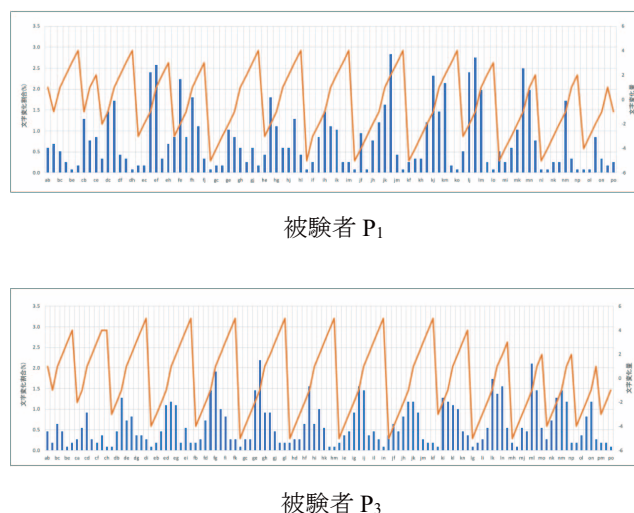


図 11. 文字変化割合 (W=16)

図9のW=4の時では被験者 P₁と P₃で大きな違いは見られなかったが、図10のW=8で同様の傾向を示していたが、被験者 P₁は基準文字よりも加速度の値がやや大きい文字変化の割合が高いグラフ、P₃は文字変化割合のばらつきが P₁と比較して小さいグラフとなった。特に、被験者 P₁の“ef”と“fe”の文字変化割合が高い傾向が見られた。このことから、文字表現種類Wを増やし、センサデータの抽象度を落とすことによって、運転操作による車両挙動の変化を細かく表現できることがわかった。また、図10と図11の文字変化量に着目すると、各表現文字種類Wにおける基準文字‘c’(W=8)と‘i’(W=16)に近づくほど、文字の変化量が0から離れる傾向が見られた。さらに、文字変化量の値が振動しながらやや減少する傾向が見られた。これは、SAXを適用する際に、文字を割り当てる領域を定める手法として、正規分布を用いているためである。これにより、基準文字に近づくにつれて文字の領域が狭くなる。そのため、基準文字に近づくにつれて文字変化量が0から離れ、振幅が大きいグラフになる傾向が見られたと考える。

図9, 10, 11の分析結果から、各被験者によって文字変化割合と文字変化量から共通する部分と異なる部分が見られた。特に、Wを多くすることで、各被験者の文字変化割合にそれぞれ異なる傾向が見られた。よって、数値成分を考慮した文字変化割合を算出することで、ブレーキ操作によるブレーキの強さの特徴を抽出していると考えられる。

5. まとめ

本研究の目的は、ドライバの運転基準を把握するために、ドライバの運転特性を抽出することである。本論文では、SAXを用いたブレーキ操作時の運転特性の抽出について述べた。本研究では、車載したスマートフォンからセンサデータを収集し、そのセンサデータにSAXを適用すること

で文字列に変換する。変換した文字列をランレングス符号化することにより、車両挙動の変化情報である文字成分、車両挙動の変化に要した時間情報である数値成分、データ計測時からの時間情報である累積和の3つの要素で車両挙動を表現する。最後に、基準文字を基に部分文字列を抽出し、文字成分、数値成分、累積和の3つの要素を用いて車両挙動データの分析を行う。

本論文では、提案手法を実装し、その有効性を示すために直線道路で指定した地点で停車させる実験について述べた。本実験では、ブレーキ操作時における4人の車両挙動データを分析して、ドライバの運転特性の特徴量抽出が可能であるか調査した。文字変化割合と文字変化の差を分析した結果、文字表現種類 W が小さい場合、センサデータの抽象度が大きいと、文字変化割合ではドライバの運転操作の特徴が確認できなかったが、表現文字種類 W を大きく設定し、抽象度を落とすことで、ドライバごとのブレーキ操作による車両挙動の変化の特徴を抽出した。したがって、本研究の手法を適切なパラメータを設定し、適用することで、ブレーキ操作時におけるドライバの運転特性の特徴量が抽出可能であることが示唆された。

今後の課題として、SAX を適用する際に表現する文字種類 W と閾値の設定が挙げられる。 W が小さいと、データ抽象度が大きくなるため、分析結果に違いが現れにくいことがある。また、閾値が異なれば、変換される文字列が異なり、分析結果に大きな影響を与える。そのため、運転特性を抽出するために、SAX の表現文字種類 W と閾値の設定について調査する必要がある。本論文では、正規分布に従って設定した閾値を基に、 $W=4, 8, 16$ の3種類で文字列に変換したが、正規分布以外の手法で設定した閾値を適用した車両挙動データ分析を行う。次に、運転基準の把握手法の検討が挙げられる。本研究の最終目的は、自動運転システムがドライバの運転基準を把握することである。そのため、ドライバの運転基準を計測し、抽出した運転特性と対応づける必要がある。計測方法として、シミュレータを検討している。実際の走行環境では、同じ状況を再現することは非常に困難であるが、シミュレータでは、同じ状況を再現することが容易で、様々な状況を再現、生成することが可能であり、安全に実験を行うことができる。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP17K00128, JP20K11793 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 青木啓二, 自動運転車の開発動向と技術課題: 2020 年の自動化実現を目指して, 情報管理, Vol.60, No.4, pp.229-239 (2017).
- [2] 三原寛司, 景山浩二, 自動運転システムにおける情報処理技術の最新動向: 6. 自動運転に関する法規制と実証実験, 情報処理, Vol.57, No.5, pp.460-464 (2016).
- [3] Timothy B. Lee, Waymo makes history testing on public roads with no one at the wheel, <<https://arstechnica.com/cars/2017/11/>

fully-driverless-cars-are-here/> (参照 2020 年 5 月)

- [4] 一般社団法人 UTMS 協会, 安全運転支援システム (DSSS), <<https://www.its-jp.org/wp-content/uploads/2013/09/b0852ec5a4c971d6834ab879f9933bae.pdf>> (参照 2020 年 5 月)
- [5] Adam Ziebinski, Rafal Cupek, Damian Grzechca, Lukas Chruszczyk, Review of advanced driver assistance systems (ADAS), AIP Conference Proceedings, Vol.1906, No.1 (2017)
- [6] SAE International, Taxonomy and Definitions for Terms, Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, J3016 201806, pp. 1-35 (2018).
- [7] フロスト&サリバン ジャパン プレスリリース, <<https://www.frost.co.jp/232/pressrelease11142018/>> (参照 2020 年 5 月).
- [8] 国土交通省, 自動車保有車両数, <<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=dataset&toi=00600700&tstat=000001109495&cycle=1&class1val=0>> (参照 2020 年 5 月)
- [9] 辻野照久, 坪谷剛, 自動運転自動車の研究開発動向と実現への課題, 科学技術動向, Vol.133, No.1-2, pp.9-16 (2013).
- [10] 石川 翔太, 荒井 幸代, 渋滞低減に向けた路車間・車車間協調を実現する自動運転方策の学習法, 人工知能学会論文誌, Vol.34, No.1, pp.1-9 (2019).
- [11] 古川義人, 清原良三, 自動運転車両の普及過渡期における非優先道路から優先道路への進入待機時間の削減手法, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.10, pp.1809-1817 (2019).
- [12] Jessica Lin, Eamonn Keogh, Stefano Lonardi, Bill Chiu, A Symbolic Representation of Time Series, with Implications for Streaming Algorithms, SIGMOD Workshop, pp.2-11 (2003).
- [13] 鳥居 耕太, 河中 治樹, 長瀬 功児, 小栗 宏次, ドライバ運転感覚の定量化に向けた筋電位特徴量抽出, 情報処理学会研究報告 高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS), Vol.2017-ITS-70, No.7, pp.1-6 (2017).
- [14] 小林 一夢, 秋月 拓磨, 高橋 弘毅, 章 忠, 加速度センサを用いた交差点左折時における運転操作の個人特徴に関する検討, 第 61 回自動制御連合講演会, Vol.12C3, pp.887-892 (2018).
- [15] 谷口 忠大, 山下 元気, 長坂 翔吾, 坂東 誉司, 竹中 一仁, 人見 謙太郎, 運転時系列のベイズ重分節解析によるチャック抽出, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.11, pp.1047-1056 (2013).
- [16] 岡田 将吾, 人見 謙太郎, ナイワラ P. チャンドラシリ, 呂 有為, 新田 克己, 車載センサログの時系列データマイニングに基づく運転挙動の分析, 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol.11, No.4, pp.387-390 (2012).
- [17] 林 政行, 伊藤 孝行, スマートフォンを用いた走行データの収集とドライバー行動モデルの構築, 情報処理学会第 80 回全国大会講演論文集, Vol.2018, No.1, pp.403-404 (2018).
- [18] 赤松 伸樹, 河辺 徹, 合原 一究, 縦加速度と横加速度の時系列データに基づく乗り心地指標を用いた運転特性解析, 第 61 回自動制御連合講演会, pp.1292-1297 (2018).
- [19] 横山 達也, 白石 陽, 交通状況把握のための運転行動の時系列性を考慮した車両挙動分析手法, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.1, pp.87-100 (2019).
- [20] Pimwadee Chaovalit, Chalermopol Saiprasert and Thunyasit Pholprasit, A Method for Driving Event Detection Using SAX with Resource Usage Exploration on Smartphone Platform, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol.2014, No.1, pp.1-11 (2014).