

ドライバの運転動作解析に関する研究

日大生産工(院) ○清水 俊喜
日大生産工 栗谷川 幸代 日大生産工 景山 一郎

1. 緒言

現在、自動車は移動手段や輸送手段として利用され、その手軽さや利便性から人々の生活に必要不可欠な道具として定着している。その一方、自動車による交通事故が後を絶たず、近年では交通事故死者数は減少傾向にあるものの、依然として交通事故件数は高いままである。そこで、各メーカーなどでは安全性や利便性、快適性の向上の為に様々な運転支援システムの開発が行われている。さらに、近年では自動車を運転するドライバと自動車の協調性が大きく取り上げられており、人間-自動車系としてのシステム構築が注目されている¹⁾。今後、人間に適応したシステムを開発するにあたり、人間と自動車の協調性を有するシステムが望まれる。

過去より人間の運転行動の表現や自動運転、支援システムを目的とした様々なドライバモデルが構築されてきた。それらの多くは人間の行動を同定することにより、平均的な特性として取り扱っている。しかし、人間の特性として「個人差が大きい」、「常に特性が変化する」といったものが挙げられる。このことから既存のモデルでは個人特性や特性の時系列変化の取扱いが十分でないと思われる。そこで人間の特性変化を定量的に推定することが可能となれば、運転特性の把握や状態推定等に应用可能であると考えられる。

本研究では、周辺環境と操舵行動からドライバモデルを構築し、モデルを用いて人間の運転行動の解析を行う。

2. 実車実験

通常の人間の運転行動を把握するために一般道路を用いた実車実験を行った。実験車には当研究室で保有するドライバモニタリングカーを用いた。図1に実験車を示す。実験コースは以下の条件で選定を行った。1)比較的にゆるやかなワインディング路、2)対向車・歩行者が少ないこと、3)交差点がない一本道であることを条件とし、条件にあった道路を選定した。使用した道路は全長1.4km、幅員5～6.5m、最小曲率半径65mのセンタラインの無い農道である。実験コースと曲率を図2に示す。道路情報を取得するためにRTK-GPSを用いて高精度な道路形状の計測を行った。



Fig.1 Driver Monitoring Car

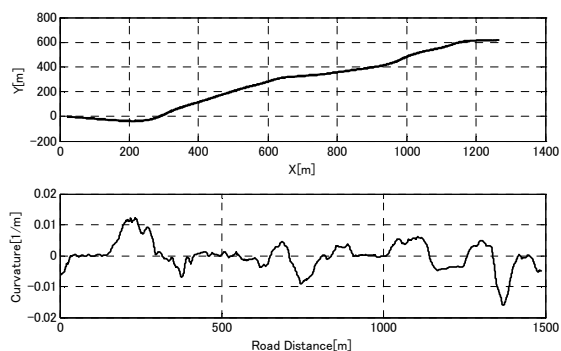


Fig.2 Experimental Course

被験者には20代男性4名を選定した。実験にあたり、被験者には実験内容を説明し、インフォームドコンセントを得た。走行速度は具体的な規定はせず、法定速度内で各被験者の判断に委ねた。計測機器は光学式2軸車速計、ハンドル力角計、3軸加速度計・ジャイロセンサ、RTK-GPS、CCDカメラを用いて計測を行った。

3. ドライバモデル

人間は自動車を運転する際に、周辺環境を視覚情報や聴覚情報より取得し、それらの情報から目標コースの決定や制御行動を決定していると考えられる。また、人間の主な横方向制御となる操舵動作は、前方の情報より予測したフィードフォワード動作と、自ら定めた目標コースと自車位置との偏差や外乱などから修正を行うフィードバック行動により構成されていると仮定する。これらの関係からドライバの予測操舵と修正操舵を表現したドライバモデルをPIDモデルを用いて構築した。

Study on Analysis of Driver's Behavior.

Toshiki SHIMIZU, Yukiyo KURIYAGAWA and Ichiro KAGEYAMA

図3に構築したドライバモデルを示す。本モデルは周辺環境と運転行動の関係からPIDモデルを用いて本研究では本モデルを用いて、一般道路を運転した際の運転行動よりドライバの運転行動の解析を行う。

3.1 フィードフォワードモデル

ドライバの予測操舵として周辺環境、特に道路形状に対して目標コースを規定し、それに沿うように自動車を運転していると考えられる。そこで、ドライバの運転行動と周辺環境との関係性を調べたところ、操舵角と曲率、道路ヨー角速度との相関が高い事がわかった³⁾⁴⁾⁵⁾。曲率と道路ヨー角速度は道路形状より決定される値であり、ドライバがフィードフォワード情報として用いていると考えられる。ここでは、車両の速度を考慮する為に道路ヨー角速度をフィードフォワード情報として採用した。操舵角と道路ヨー角速度の位相時間を求めた結果、約0.4秒の位相遅れとなりドライバへの入力と考えられる。

過去の報告よりドライバの操舵角は道路形状成分に依存する低周波成分と修正操舵に関わる比較的高い周波数成分に分けられると報告されている²⁾。そこで、実験より得た操舵角に遮断周波数0.2Hzのローパスフィルタを掛け、低周波成分をフィードフォワード成分として取り扱う。図4に操舵角より推定したフィードフォワード操舵角を示す。図より、実験値に比べ、滑らかな操舵角になっていることが分かる。算出した操舵角の低周波成分と道路ヨー角速度の相関が非常に高い為に、本解析ではこの値を用いる事とする。

3.2 フィードバックモデル

ドライバは自ら定めた目標コースと自車位置との偏差や外乱などから修正操舵を決定していると考えられる。そこで、操舵角の修正操舵成分と相対情報の関係から重回帰モデルを構築する。目的変数を操舵角の実験値から、フィードフォワード成分を差し引いた値をフィードバック成分として用いる。また、説明変数として相対情報である目標コースと車両の相対ヨー角、相対横位置の比例値、微分値、積分値の6変数を採用する。これはフィードバックモデルが相対ヨー角と相対横位置に対してPID制御を行なっていると仮定したためである。同定に用いた重回帰式を式1に示す。

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots a_nx_n \quad (1)$$

ここで、 y :目的変数、 a_i :偏回帰係数、 x_i :説明変数、 a_0 :切片を表す。この時、フィードバックのむだ時間として、重回帰分析において目的変数をずらしながら分析を行い、重相関係数が最も高い点の時間を採用した。上記のフィードフォワードモデルとフィードバックモデルの同定した結果の一例を図5に示す。フィードバックの実験値とモデル出力の重相関係数は0.885であり、十分にドライバの修正操舵を表現できていることがわかる。また、フィードフォワードモデル出力とフィードバックモデル出力を足し合わせた操舵角と実験値の相関係数も0.986と

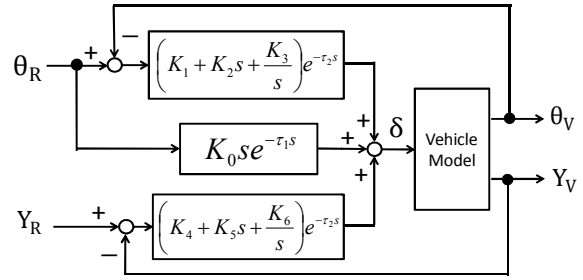


Fig. 3 Driver Model

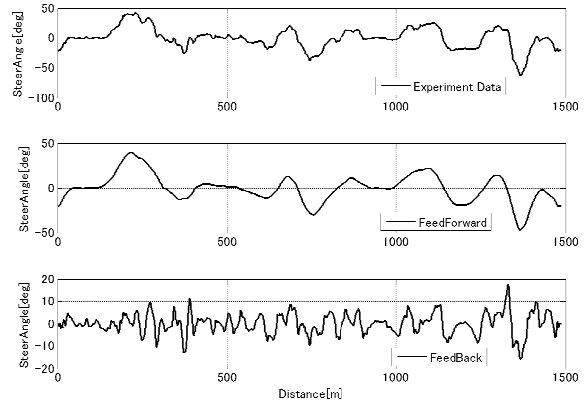


Fig.4 FeedForward and FeedBack Steering Angle

高い値を示しており、十分にドライバの動作を表現できていることが分かる。

以上の結果からドライバの運転行動に関して検討を行う。

4. 運転行動解析

4.1 フィードバックゲインの検討

前項で構築したドライバモデルの同定結果を用いて、被験者ごとのフィードバックゲインの比較を行う。フィードバックゲインの比較には説明変数、目的変数をそれぞれ標準化して重回帰分析を行った際の標準偏回帰係数を使用する。標準化したことにより各説明変数が目的変数の変動に貢献しているかを比較することが出来る。ここで値が大きい説明変数はドライバが修正操舵を加える際に重視している相対情報と考えられる。図6に被験者ごとのフィードバックゲインを、図7にフィードバックゲインの絶対値を割合で表した図を示す。図中のゲインの記号は、相対横位置の比例値(P-Y)、相対横速度(D-Y)、相対横位置の積分値(I-Y)、相対ヨー角の比例値(P-Yaw)、相対ヨー角速度(D-Yaw)、相対ヨー角の積分値(I-Yaw)を表す。

図より各被験者共に相対横位置(P-Y)、相対横速度(D-Y)、相対ヨー角速度(D-Yaw)を重視して修正操舵を行なっていることが分かる。各ゲインを被験者ごとで比較すると、重視している情報が異なっており、各被験者の特徴を現すものと考えられる。全体の傾向を見るとゲインの分布が似た傾向が見られる。この理由として、今回の実験では片側1車線の道路を用いたため、走行ラインの自由度が大きかったことが考えられる。また、フィードバック係数がマイナスとなっている変数がある。これは応答性を上げるために部分的に人間-自動車系が不安定系になっている可能性を示している。

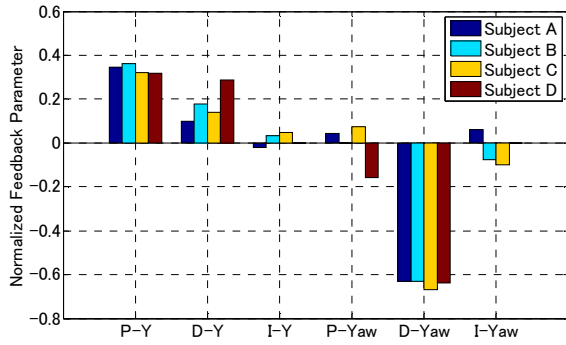


Fig.6 FeedBack Gain

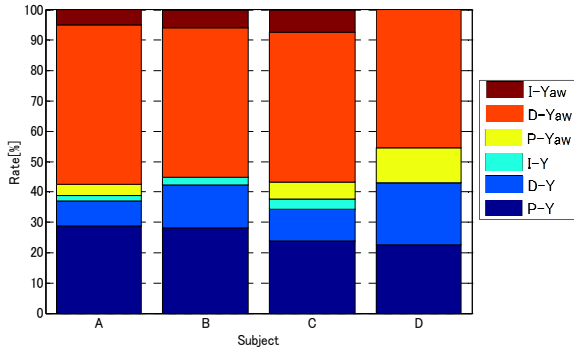


Fig.7 FeedBack Rate

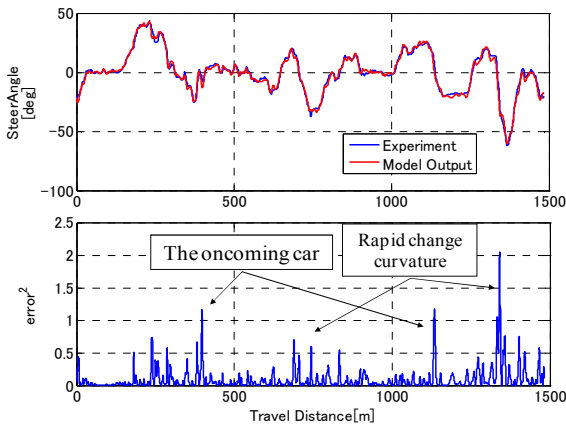


Fig.8 Deviation of the experimental values and model values.

4.2 推定誤差の検討

次に、実験の操舵角とモデル出力値の偏差について検討を行う。図8に被験者Aの実験値とモデル出力値の二乗誤差を示す。本モデルでは入力情報と出力情報の間に線形関係があると仮定し、重回帰分析を用いて同定を行なっている。しかし、二乗偏差を見ると部分的に誤差が大きくなっており、人間の操舵を再現できていない部分が確認できる。二乗偏差が増加した部分を確認してみると、対向車回避による急操舵などが確認でき、人間の非線形部分が現れていると考えられる。また、曲率の切り替り点などによって偏差が大きくなっている部分が見られる。このポイントはドライバの運転スタイルの切替え点であると考えられる。よって、ドライバモデルの出力との偏差を見ることにより、ドライバへの外乱や運転の変化点を確認することが出来た。

4.3 時系列解析方法

これまでのモデル同定では計測データ全体に対して重回帰分析を行い、フィードバックゲインを算出しているため、1回の走行の平均的な特性として取り扱っている。しかし、実際の運転ではドライバは周辺環境に対して時々刻々運転特性を変化させて走行していると考えられるため、特性の時系列変化を検討する必要がある。そこで、時系列解析として重回帰分析を行う際に解析区間を短時間で一区切りとし、解析区間をずらしながら解析を行った。

解析区間をある点での前後2.5秒(データ点500点)を一区切りとし、サンプリング時間(0.01秒)ずつずらして重回帰分析を行った。

まず、時系列解析の結果が正しく推定出来ているかを確認する必要がある。そこで、データ全体を用いた解析と時系列解析の結果の比較を行う。操舵角の推定結果と、実験値との二乗偏差を算出した。

算出結果を図9に示す。それぞれの解析区間での相関係数を求めるといずれも0.8以上の高い相関が得られた。また、図中の通常解析に対し、時系列解析の二乗誤差が少なくなっていることが分かる。このことから時系列解析を行うことによってドライバの行動を精度よく再現でき、本解析より得たフィードバックゲインによりドライバの特性変化の確認が可能であると考えられる。

4.4 フィードバックゲインの時系列変動

上記の結果からドライバの時々刻々の特性変化について検討する。解析結果を図10、11に示す。図10は被験者Aの推定結果を、図11には被験者Bの推定結果を示す。横軸に時間、縦軸に各標準偏重回帰係数とコース形状として曲率を示す。図より実験コースを走行中に各ゲインが大きく変動していることが分かる。

カーブを走行中には相対横位置(P-Y)と相対横速度(D-Y)に顕著な変化が見られる。これはカーブを走行中に目標コースとの横位置の偏差が発生し、それを修正するために相対横位置を重要視して走行していると考えられる。また微分ゲインを大きくすることにより、目標コースへ素早く収束するように制御していると考えられる。

図中のゲインが大きく変動をしている部分に注目し、実験動画を確認すると対向車や自転車回避している部分が見られた。対向車が来た場合には相対横位置(P-Y)の増加が全ての条件で見られた。これは対向車が来たことによって、目標コースから横方向にずれる必要があり、ハンドルを操舵していると考えられ、ゲインの変化からも同様な変化が見られる。

本実験コースでは直線からカーブに変化するなど曲率が急激に変化する地点が見られる。その時のゲインの変動を確認すると、相対横位置のゲインはあまり変化していないのに対し、相対ヨー角のゲイン(P-Yaw, D-Yaw, I-Yaw)に変化が現れていることが確認できる。これは、曲率が変化することにより道路ヨー角も変化するため、曲率が変化する地点ではドライバは相対ヨー角のゲインを多く用いて制御していると考えられる。また、曲率の切り替り地点では相対ヨー角の微分ゲインを多く用い収束性を上げ、そのあとは比例ゲインを多く用いることで、定常偏差を減らすように制御しているのが確認できる。

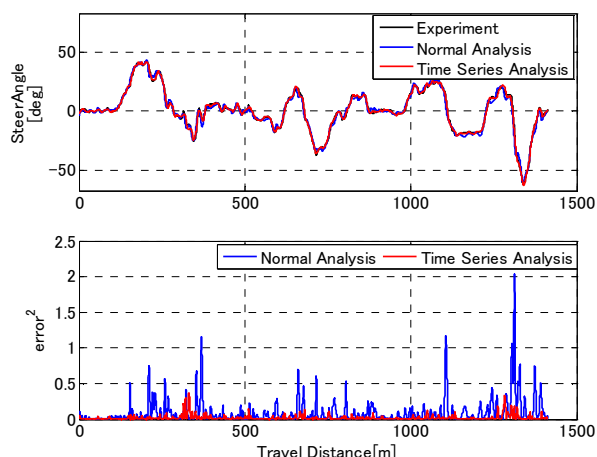


Fig.9 Deviation of the Normal Analysis and Time Series Analysis

同様なゲインの変化は他のドライバでも確認できた。

以上のことから、本モデルがドライバの時々刻々の特性変化を表現しており、本解析がドライバの特性変化だけでなく、状態推定等に応用可能であると考える。

5. 結言

本研究は自動車を運転する人間の制御パラメータに注目し、ドライバモデルを用いて自動車を運転するドライバの運転行動について検討を行った。ドライバの制御動作を予測操舵と修正操舵のモデルで表現し、モデルの妥当性を確認した。被験者ごとのフィードバックゲインの違いや、実験値とモデル値の偏差と周辺環境の関係性を検討し、周辺環境との関係性を考察した。また、ドライバ特性変化を時系列に重回帰分析を行うことで、フィードバックゲインの変化を明らかにし、コース形状と周辺環境からのゲインの変化を確認し、時系列に表現できることを示した。以上より、本モデルがドライバの内部パラメータ解析に用いることができる可能性を示し、今後ドライバの状態推定に応用可能であると考える。

今後は、ドライバの状態推定の可能性が見られた本モデルを用いて、ドライバに副次タスクを与えた場合などのディストラクション時の内部パラメータの変化について適用可能と考えられる。また、ドライバの状態変化を定量的に表現するための検討が必要となる。

参考文献

- (1)古川 修：アクティブセーフティ技術の現状と今後の動向，自動車技術，Vol.63，p.54~59
- (2)磯村ほか：ドライバのハンドル操作におけるヒューマンファクタ，自動車技術会論文集，Vol.27，No.1，(1996)
- (3)Ichiro Kageyama：Analysis for Control Action of Driver's Steer -An Example of Aged Driver-，JSAE Annual Congress Proceedings，No.64-05，p.1~6，(2005)

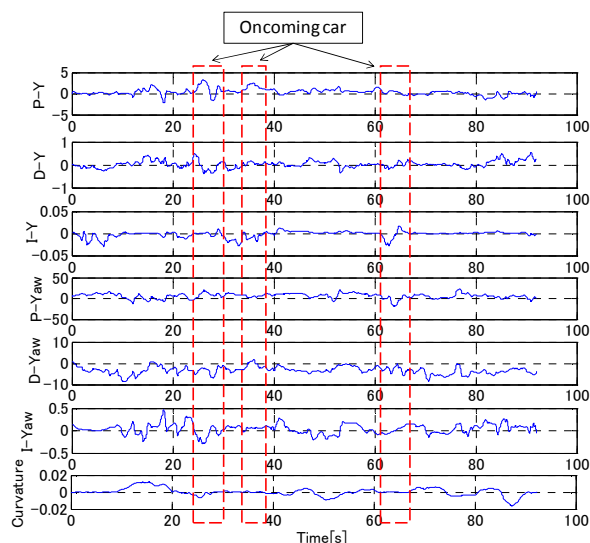


Fig.10 FeedBack Gain Variations (Subject A)

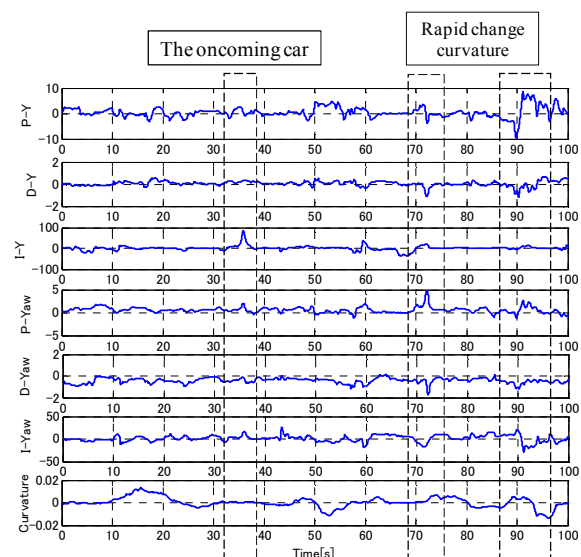


Fig.11 FeedBack Gain Variations (Subject B)

- (4)景山ほか：ドライバモデルを用いた操縦動作解析，自動車技術会学術講演梗概集，No.117-06，(2006)
- (5)景山ほか：ドライバ特性評価のためのドライバモデル構築に関する研究，自動車技術会学術講演会前刷集，No.123-10，(2010)
- (6)岡田ほか：ドライバモデルパラメータのオンライン推定に関する研究，日本機械学会交通物流部門講演論文集，No.07-51，(2007)
- (7)磯部ほか：ドライバの情報処理評価に関する研究，日本機械学会交通物流部門講演論文集，No.03-51，(2003)