2110 交差点黄信号時における車両・ドライバ系のモデリングに関する研究 Research on Vehicle and Driver Modeling at Intersection during Yellow Traffic Signals

○学 大竹 正俊 (茨城大院) 正 道辻 洋平 (茨城大学)
多田 智樹 (茨城大学) フェロー 永井 正夫 (東京農工大学)

Masatoshi OHTAKE, Ibaraki University, 4-12-1, Nakanarusawacho, Hitachi, Ibaraki

Yohei MICHITSUJI, Ibaraki University

Tomoki Tada, Ibaraki University

Masao Nagai, Tokyo University of Agriculture and Technology

In Japan, many traffic accidents occur at intersections. Thus, the necessity of countermeasures for safety at intersections becomes evident in reducing traffic accident. Especially, it is thought that yellow light at signalized intersection is more dangerous because of driver's dilemma. In order to realize safe and reliable traffic environment, it is necessary to comprehend driver behavior. In this study, driver model which control vehicle stopping maneuvering at intersection during yellow phase is studied. Drivers characteristic parameters such as time delay, brake pedal stroke velocity during yellow light are identified. In order to evaluate the validity of proposed driver model, numerical simulation with some driver models combined with a vehicle model is elaborately compared with actual driving data.

Key words: Drive Recorder, Driver Behavior, Driver model, Yellow Light, Vehicle Dynamics

1. 緒 言

近年、衝突安全技術の発達や医療技術の向上により、交通事故死者数・重傷者数は減少しているが、事故件数自体は依然として高い水準にある。我が国の事故件数のうち約60%が交差点で発生しているが、その中には黄信号における交差点において、ドライバの判断の迷いが発生し事故につながってしまう黄信号のジレンマによるものがあるといわれる^[1]。しかしながら、リアルワールドにおける黄信号のジレンマに関する個々のドライバの挙動・癖などは十分に解明されていない。安心安全な交通社会の実現には、個々のドライバ特性を理解し、それに適した予防安全技術を考える必要がある。そこで本研究では、交差点黄信号におけるドライバ行動を把握するために、黄信号開始をトリガとし、交差点手前で停止するドライバモデル^{[2][3]}を作成する。実交通に近いドライバモデル作成のため、ドライブレコーダ^[4]を用いた、普段の運転データからなる運転行動データベースを活用する。また、車両モデルと組み合わせることにより、精度の高い停止時のモデル化をおこなう。

本報告では、複数ドライバにおける日常運転データから、ドライバごとに黄信号開始から操作するまでの遅れ時間、およびブレーキ踏込速度の傾向を、黄信号に対する停止余裕時間という概念を導入し特徴づける。分析結果をもとに、車両・ドライバ系の黄信号開始からの停止モデルを作成し数値シミュレーションをおこない、運転行動データベースにおける実交通データと比較することでモデル化手法の妥当性を評価する。

2. 分析に用いる運転行動データベース

2.1 運転行動データベース^[5]

本研究では、個々のドライバの特性を抽出するために(社)人間生活工学研究センター(HQL)の運転行動データベースを活用した。図1にドライブレコーダ前方映像の一例と走行コースを示す。このデータベースは、広角 CCD カメラによる前方映像と各種計測器を搭載した実験車両を用いて実施され、20~71歳の男女計97名の被験者が、普段通りの運転で茨城県つくば市周辺に設定した一般道ルート(1周約30分、約15km)を1ヶ月間にわたって走行した実験結果である。このデータベースには、同一ルートを複数の運転者が繰り返し運転する行動データが蓄積されたデータであり、ドライバごとの個人差や、個人内差を解析することができる。

2.2 解析対象の場面

本研究では、黄信号交差点におけるドライバモデルを作成するため、ドライバの運転行動を分析する必要がある。運転行動を収集するために黄信号における停止行動と進入行動の映像を検索し、停止線までの距離、速度、減速度、ペダル踏込操作を抽出する。この時、ドライバの黄信号に対する判断のみで停止しているデータが望ましいので、前方車両の存在や自車が右左折するような、黄信号以外の停止要因の影響を強く受けていると思われるものは除外した。対象被験者はデータベース内にある20代から50代までの男女、計7名のデータを分析した。表1に今回用いた被験者データ一覧を示す。

Fig.1 An example of driving data in the driving database

Table1 Driver data

Driver	Sex	Age	Driving career
A	Man	23	5
B	Woman	29	10
C	Man	58	20
D	Woman	36	10
E	Man	37	15
F	Woman	47	20
G	Woman	52	10

3. 制動時の車両モデル

3.1 車両モデルの概要

本研究の車両モデルは交差点手前停止線への停止を記述するのが目的であるため、車両モデルは、前後方向移動の自由度と前後タイヤの回転自由度の計3自由度の車両モデルとして作成する。ここで、車体ピッチ角は考慮しないが荷重移動による制動力の変化を考慮する。これらによって、前後の荷重移動とタイヤのスリップを考慮した車両モデルにより制動時挙動を精密にシミュレーションできる。なお、以下の制動運動のモデル化は参考文献 [6] に基づいている。

3.2 制動時の車両モデル

車両モデルの情報線図を図2に示す。車両モデルはドライバからブレーキ踏込量 $P(t)$ を入力され、タイヤの制動トルク T_{brake} を発生させる。このとき、車輪の慣性力として

$$I\ddot{\theta}_i = F_i \cdot r - T_{\text{brake}} \quad \dots(1)$$

ここで、 I は車輪の慣性モーメント、 F_i ($i=f$ は前輪、 $i=r$ は後輪)は制動力、 r は車輪半径である。上式から車輪の回転角速度を積分によって導出でき、それに車輪半径 r を乗するとタイヤ回転速度 $V_{\text{wheel}, i}$ を求めることができる。次に車体速度 V_{vehicle} とタイヤの接地面での回転速度 $V_{\text{wheel}, i}$ の関係から、スリップ率 S_i

$$S_i = \frac{V_{\text{vehicle}} - V_{\text{wheel}, i}}{V_{\text{vehicle}}} \quad \dots(2)$$

を求める。これを用いてスリップ率とタイヤ・路面の摩擦力の関係から、摩擦係数 μ_i が求められる。さらに、前後輪による制動力 F_i は以下となる。

$$F_f = \mu_f Mg \frac{l_r + \mu_f h}{l - h \cdot (\mu_f - \mu_r)} \quad \dots(3)$$

$$F_r = \mu_r Mg \frac{l_f + \mu_f h}{l - h \cdot (\mu_f - \mu_r)} \quad \dots(4)$$

ここで、 M は車体重量、 h は車両重心高、 l は重心から前輪・後輪までの長さである。これらを用いると車両の運動方程式は

$$M \cdot a = F_f + F_r \quad \dots(5)$$

となる。ここで、 a は車両加速度である。加速度の正負を入れかえて、車両の減速度は

$$d = -g \cdot \frac{\mu_f l_r + \mu_r l_f}{l - h \cdot (\mu_f - \mu_r)} \quad \dots(6)$$

となり、これを積分することによって車両減速時の運動軌跡を求めることができる。

3.3 車両モデルの制動シミュレーション

図3に車両制動シミュレーションの結果を示す。実験車両の質量、ホイールベース長などの緒元を反映させた車両モデルに、ブレーキペダル踏込量 $P(t)$ をステップ入力として、ペダルストロークの30[%]を与えた時の車両モデルの減速度の立ち上がり方をシミュレーションした結果である。図示される通り、ステップ入力の踏込量に対して車両の減速度の立ち上がりが遅れており、車両の制動時の運動特性をモデル化できている。

4. 黄信号停止時のドライバモデル

4.1 ドライバモデルの構成

本来ドライバは運転中に、危険リスクとなる重要な対象を認知し、次にどのような運転をすべきかを判断し、実際にその判断をもとに車両を操作する。本研究ではこの運転の三大要素である認知・判断・操作に分割して交差点停止のドライバモデルを作成する。

ここで定義するドライバモデルは、黄信号点灯時をトリガとして、

黄信号に対する認知・判断の遅れ時間 τ や、ブレーキ操作における踏込み速度 $V_{\text{B.P. Stroke}}$ を考慮する。ここで、黄信号開始時の車両速度と交差点手前にある停止線までの距離から、停止するまでの停止余裕時間という概念を導入し、遅れ時間 τ や $V_{\text{B.P. Stroke}}$ を、この停止余裕時間と関連付けてモデルを記述することとする。

4.2 目標減速度 d^* の定義

黄信号点灯時の時間を $t=0$ とした時、停止線までの距離 $L(0)$ から一定減速度 d で停止線に停止するための条件は下式となる。

$$L(t) - L(0) = V(t) \cdot (T_{\text{stop}} - t) - \frac{1}{2} d (T_{\text{stop}} - t)^2 \quad \dots(7)$$

この式から、時間的に変化する停止線までの距離 $L(t)$ に対して、その時点から一定減速度で停止線へ止まるための目標減速度 $d^*(t)$ を下式に定義する。

$$d^*(t) = \frac{2[V(t) \cdot (T_{\text{stop}} - t) - \{L(t) - L(0)\}]}{(T_{\text{stop}} - t)^2} \quad \dots(8)$$

ここで、記号の意味は以下である。

$V(0)$: 黄信号点灯時における速度

$L(0)$: 黄信号点灯時における交差点手前の停止線までの距離

$V(t)$: 黄信号点灯後の $t[\text{sec}]$ における速度

$L(t)$: 黄信号点灯後の $t[\text{sec}]$ における交差点手前の停止線距離

T_{stop} : 黄信号点灯時から停止に必要な時間

図4は、車両の時々刻々変化する位置 $L(t)$ と速度 $V(t)$ から、ドライバがペダル踏力を発生し、目標減速度 $d^*(t)$ を生成するモデル線図である。ここで $d^*(t)$ から $P(t)$ を生成するテーブルは、赤信号時などの一定減速度の停止データから求められる、車両の減速度とペダル踏込量のデータから生成している。

Fig.2 Overview of vehicle deceleration model

Fig.3 Time history of value of B.P. Stroke and vehicle applied deceleration.

Fig.4 Overview of Driver-Vehicle connected model

4.3 黄信号に対する認知・判断の遅れ時間 τ の算出

各ドライバにおける黄信号を認知してから操作するまでの遅れ時間 τ とブレーキ踏込速度 $V_{B.P.Stroke}$ を定量化する際に、ドライバの黄信号における緊急度を表すパラメータである、停止余裕時間 T_s を定義する。まず、ある一定減速度 d' で停止できる制動距離 L_d の条件は下式となる。

$$L_d = \frac{V(0)^2}{2d'} \quad \dots(9)$$

ここでの減速度 d' をドライバが黄信号停止において発生する最大値とされる $0.3[G]$ を用いることとする。この L_d を用いて停止余裕時間を下式より定義する。

$$T_s = \frac{L(0) - L_d}{V(0)} \quad \dots(10)$$

T_s が正となるときは、黄信号停止線までの距離が長く余裕がある。

例としてドライバ F, G の停止余裕時間と遅れ時間 τ の関係を図 5 に示す。図より、停止余裕時間が小さいほど、遅れ時間は短くなっている傾向がわかる。なお同図には、停止余裕時間に対する遅れ時間の関係を最小二乗法で近似した直線も加えている。

4.4 黄信号に対するブレーキ踏込み速度 $V_{B.P.Stroke}$ の算出

ブレーキ踏込の立ち上がりの遅れは、一次遅れ系を用いて同定する。図 6 に例を示すとおり、実測データのペダル踏込量の最大値と踏込開始時における接線の傾きから時定数 T を求めると以下となる。

$$T = P_{\max} \left/ \frac{dP(t)}{dt} \right|_{t=\tau} \quad \dots(11)$$

また、時定数 T よりブレーキ踏込速度を以下の式で求める。

$$V_{B.P.Stroke} = 0.633 \frac{P_{\max}}{T} \quad \dots(12)$$

停止余裕時間とブレーキペダル踏込速度の関係を図 7 に示す。図示したとおり停止余裕時間とブレーキ踏込速度の関係では、余裕時間が小さいとブレーキ踏込速度も大きく、緊急性の高いのブレーキ動作になっている。なお同図には、停止余裕時間に対する踏込み速度の関係を最小二乗法で近似した直線も加えている。

5. シミュレーション結果

黄信号時停止場面における実測データと、今回作成した車両・ドライバモデルを比較し、モデルの精度を検証する。

図 8(a), (b) はドライバ F の時系列波形と車両位置の軌跡を図示したものである。ここで図(a)では黄信号点灯後における 1[sec] ごとの車両の位置を比較している。図示されるように、黄信号点灯からある遅れを持ってブレーキを踏む様子がモデル化されており、また車両軌跡の観点からもよく一致した軌跡をたどっていることがわかる。

Fig.5 Identified data of Time delay τ

図 9(a),(b) はドライバ G の場合を同様に図示したものである。実測データとシミュレーションデータにおけるブレーキ踏込量の時系列波形を比較すると、実測データでは、停止線直前でペダルを緩めて低速走行するような癖がみられる。しかしながら、車両軌跡はほぼ同じ軌跡をたどっていることがわかる。

Fig.6 Identification method of parameter T

Fig.7 Identified data of B.P. stroke velocity

(a) Trajectory of Vehicle

(b) Time history of distance, velocity and B.P. Stroke

Fig.8 Comparison between Simulation and Experiment (Driver F)

(a) Trajectory of Vehicle

(b) Time history of distance, velocity and B.P. Stroke

Fig.9 Comparison between Simulation and Experiment (Driver G)

(a) Trajectory of Vehicle

(b) Time history of distance, velocity and B.P. stroke

Fig.10 Comparison between Driver F and Driver G

図10はドライバFとGについて、黄信号点灯時における車両位置 $L(0)=50[\text{m}]$ 、速 $V(0)=50[\text{km/h}]$ と同じ初期条件で行ったシミュレーション結果を比較したものである。図示されるとおり同じ条件でもドライバによって認知判断の遅れやブレーキ踏込速度の違いが現れており、個人差を反映したモデルとなっている。

6. シミュレーションと実測データの誤差の総合的な評価

構築した車両・ドライバモデルの正確性を確認するため各ドライバの実測データとシミュレーションを、車両軌跡により比較した。時間 t における実測データとドライバモデルの車両位置の誤差

$$e(t) = L(t) - L_e(t) \quad \dots(13)$$

を用いその最大誤差を $e_{\max}$ とする。また、車両の位置誤差 $e(t)$ と黄信号点灯時から停止線停止までの時間 T_{end} より偏差 σ を下式とする。

$$\sigma = \frac{1}{T_{\text{end}}} \int_0^{T_{\text{end}}} \sqrt{e(t)^2} dt \quad \dots(14)$$

図11に各ドライバの $e_{\max}$ の分布を示す。図より最大のものはドライバDで約6[m]の誤差が生じたが、単位時間あたりの偏差 σ でみるとどちらも約2.5[m]程度の誤差範囲であった。また、全体的に見ると、約2[m]~3[m]の誤差の頻度が多く、構築した車両・ドライバモデルは、黄信号後の車両軌跡の観点から、実測データとよく一致した軌跡をたどっていると考えられる。

7. 結 言

本研究では、車両の特性やドライバの停止動作における癖などに着目し、黄信号停止場面における車両・ドライバ系のモデル化を検討した。得られた結論を以下に示す。

- 黄信号開始時における、自車位置と速度から定義される停止余裕時間という指標を定義し、その指標と、遅れ時間、ブレーキ踏込み速度の傾向を分析した。分析結果から、停止余裕時間が小さいと遅れ時間も小さく、ブレーキ踏込み速度は大きくなる傾向がわかった。
- 車両運動特性、およびドライバの黄信号に対する認知遅れ時間、ブレーキ踏込み速度を考慮した、車両・ドライバモデルを構築した。車両軌跡による誤差評価を行ったところ、最大車一台分の位置のずれは生じるが、全般的によく一致する結果を得た。今後は、ドライバの黄信号中におけるブレーキの踏み方や、外部の影響による影響のモデル化を検討し、さらに精度が良く、一般性のある交差点進入・停止のドライバモデル構築を行っていく。

本研究の実験データは、(社) 人間生活工学研究センター(HQL)の運転行動データベースを活用した。関係各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- 道辻洋平ほか、ドライブレコーダを活用した交差点黄信号における急停止判断要因の分析, JATSS Review Vol.33, No.4
- 古川修ほか、交通運転支援システム効果評価のためのUDMを用いた交通シミュレータの開発, 自動車技術, Vol. 63, No.2, P104-105
- 田島淳ほか、計算結果信頼性確保を目指した予防安全シミュレータASSTREETの開発, 自動車技術会(2009), No.60, 1-18
- 永井正夫ほか、ドライブレコーダ活用によるヒヤリハット研究, 自動車技術 Vol.60, No.12, 2006
- (社)人間生活環境センター、運転行動データベース, <http://www.hql.jp/database/drive/index.html>
- 田中信壽ほか、予防安全支援システム効果評価(ASSESS)における車両モデルの開発, 自動車技術会(2009), No.60, 25-28

Fig.11 Distribution of maximum error of vehicle for each driver