3206 人間-自動車系モデルを用いた灯火制御時のドライバ運転行動解析

Analysis of Driver's Behaviors with Lighting Control System using Man-Machine System Model

○学 三上 貴之 (香川大学)

正 和田 隆広 (香川大学)

学 土井 翔太 (香川大学)

正 土居 俊一 (香川大学)

Takayuki MIKAMI, Shota DOI, Takahiro WADA, Shun'ichi DOI

Kagawa University, 2217-20, Hayashi-cho, Takamatsu-shi, Kagawa

In order to improve a field of view in the nighttime, the Adaptive Front-lighting System is put to practical use. But, comprehensive evaluation including the driver characteristics and vehicle motion is required in order to fulfill the optimal lighting control system. This study investigated the lighting control effect on driver recognition and operating characteristics by using a driving simulator. Moreover, we created the man-machine system model based on the knowledge acquired from the experiment, and conducted simulation analysis. As a result, it is revealed driving behavior when using AFS, and its effectiveness was shown.

Key Words: Headlight, Curve running, Driver assist, AFS

1. はじめに

自動車を運転する際、ドライバは多くの情報を視覚から得て操作を行っている。そのため、視界が悪くなる夜間ではヘッドランプで照らされるエリアが運転操作を左右する非常に重要な要素となる。そしてより良い視界を確保するためヘッドランプの技術は進化を続けており、近年では走行状況や周囲環境に応じて配光を変化させる可変配光前照灯(Adaptive Front-lighting System: AFS)が市場に導入されてきている。これに伴い、AFSの有効性を評価するためにドライバの視線移動の変化に関する検討が行われている⁽¹⁾。

ここでドライバの運転行動について考えると、視覚、操作力、運動感覚などから運転に必要な情報を得て、目標コースと車両運動の状況を認知し、さらにそれらが適切な関係になると判断してアクセル、ブレーキ、ハンドルを操作しているといえる。そのため、最適な灯火制御システムの設計を行うためには、ドライバの運転特性とその結果である車両運動を含め総合的に評価をし、設計に反映する必要がある。これを踏まえ、車両と人間特性を一体化した人間-自動車系の立場よりAFSの有効性検討が行われている⁽²⁾⁽³⁾。これらの研究では、灯火制御がドライバの認知・判断行動に対して「注視時間変化」という形で影響を与え、その変化が後のハンドル操作や車両挙動に影響することが示されている。しかし、灯火制御時特有の操作特性や、システム使用者の評価及びその感覚特性については言及されていない。

本研究では、ドライビングシミュレータ(以下 DS と略記)による実験を行い、灯火制御時の認知、操作特性について調査を行った。また、実験より得られた知見を基に人間-自動車系モデルを構築し、灯火制御システムの効果検証及び灯火制御時の運転行動解析を行った。最後に、構築した人間-自動車系モデルを用いて、ドライバ特性に合わせたスイブル制御の効果検討を行った。

2. 実験概要

2.1. AFS 設定条件

AFS の制御方式については次の 2 種類を設定した。まず、一般的なハンドル操舵角と車速に応じてライトをスイブルさせる(左右に回転させる)制御方式で、 t 秒後の自車位置を照らすようにライトを回転させるスイブル制御を用いた⁽⁴⁾。

次にスイブル制御よりも発展的な制御で、地図情報から進行方向の道路形状を予測し、カーブ進入・脱出の手前からヘッドランプをスイブルさせるナビ協調制御を用いた。ナビ協調制御では、自車位置から t 秒後の到達予測位置における道路の曲率半径を読み取り、これを旋回半径としてスイブル角度を決定した。

2.2. 実験方法

実験では夜間運転及び AFS による灯火制御を模擬できる定置式の DS を使用した。DS 実験は、プログラムによる速度制御により 40[km/h]一定で行い、研究対象者にはハンドル操舵のみを行って走行してもらった。走行条件は AFS 無し、スイブル制御、ナビ協調制御の 3 条件とした。また、研究対象者は視線計測装置(NAC イメージテクノロジー社製 EMR-8b)を装着して頭部をヘッドレストに固定し、頭部を動かさないように指示をして実験を行った。研究対象者は、インフォームドコンセントを得た普通免許所有の学生 4 名である。実験コースにはワインディング路を模擬したコースを使用し、曲率半径 35[m]、曲線長 40[m]の右カーブを解析区間とした。

3. AFS がドライバの運転行動に与える影響

3.1. AFS の有無と視線移動の関係

ドライバの認知行動として視線移動に着目し、AFS による影響の調査を行った。初めに、視線計測装置から出力される走行映像を取得し、夜間運転時の視線移動の観察を行った。その結果、ドライバの視線がカーブ内側のタンジェントポイント(視線とカーブ内側との接点)付近を注視して走行している事が確認できた。これはドライバが道路区画線の線形変化を注視することによって道路情報の取得に努め、目標とする走行コースを

とるための横方向位置制御を行っているためと推測される。

次に、視線計測装置から出力される視点位置をもとに走行時のドライバの視線移動を解析した。カーブ走行時のドライバの注視時間推移(=注視距離/車速)を図1に示す。図のA点はカーブの開始点、B点はカーブの終了点である。カーブ走行時にドライバは時々刻々注視時間を変化させており、カーブ進入時においては、ナビ協調制御では注視時間が他の条件に比べて大きく、カーブ脱出時には、制御の有無によって値の差が大きくなっている。

3.2. 操舵安定性および車両挙動への影響

3.1節で得られたAFSによる視線移動の変化がドライバの操作及び車両挙動に与える影響の調査を行った。評価項目には、操舵角に加えて車両の安定性の評価指標として操舵により発生する車両のヨー角加速度を使用した。図2にカーブ走行時の操舵角及びヨー角加速度2乗値を示す。

Fig.1 Gaze Time When Traveling Curve

Fig.2 Steering Angle / Yaw Acceleration (DS)

図2より、操舵角に注目するとAFS無しではカーブ進入・脱出時に急操舵になる傾向が見られる。これに対し、灯火制御時にはカーブ脱出時のハンドル切り戻しのタイミングが早く、その後の操舵をゆっくりと行っている。また、車両挙動であるヨー角加速度についても制御の違いにより値に差が出る事がわかる。まず、カーブ進入時にはAFS無し>スイブル制御>ナビ協調制御の順にヨー角加速度が小さくなり、車両が安定する。またカーブ脱出時には、AFSの有無による差異が特に顕著であり、AFS無しに比べてスイブル制御及びナビ協調制御でヨー角加速度が小さくなり、車両が安定することがわかる。

次にAFSが走行軌跡に及ぼす影響の観察を行った。図3にAFS無し及びスイブル制御時の走行軌跡を示す。AFS無しでは中盤

Fig.3 Vehicle Trajectory on a Right-hand Curve (DS)

～脱出にかけてコース内側寄りを走行しており、スイブル制御ではコース中央付近を走行する傾向が見られる。AFS無しではカーブ進入・脱出時にカーブの情報を把握しにくく、急操舵や修正操舵が多くなることでヨー角加速度の2乗積算値が大きくなったと考えられる。またAFS無しではカーブ先が暗く先の予測がしにくいため、レーンキープのための目標である内側の中央線寄りのラインを走行していたものと考えられる。

4. 人間・自動車系シミュレーション解析

灯火制御の性能評価やドライバ特性を考慮した制御方法の検討を行うには、灯火制御時のドライバの運転行動モデルを構築する必要がある。ここでは、第3章において得られた灯火制御時のドライバの認知・操作挙動に関するデータベースをもとに、夜間灯火制御時の運転行動のモデル化を行った。

4.1. 予見時間可変モデル

ドライバモデルの重要なパラメータのひとつに予見時間がある。第3章において、次のような実験結果が得られている。

- ①道路区画線を注視することで道路線形を認知している
- ②カーブ走行時にドライバは時々刻々注視時間を変化させる
- ③制御による視程距離の違いによって注視時間が変化する

まず①、②の知見に関して、ドライバは前方の道路区画線を中心に注視することにより目標コースと車両将来位置との偏差を感知し、その偏差に応じたフィードバック主体の操舵を行っていると推測される。またLand and Leeは、ドライバがカーブを通るときの80%の時間、視線がカーブ内側の接点を注視していると報告している⁽⁵⁾。そこで、予測モデルには前方注視モデル(二次予測モデル⁽⁶⁾)を用い、モデルの注視距離を図4に示す自車位置からカーブ接点までの距離L[m]として計算した。次に③の知見より、スイブルによる視程距離の違いによって注視距離が変化することがわかっている。そこで、スイブル角に応じて注視距離Lを変化させるよう、図4に示すスイブル角 ω 、道路接線とヘッドランプ方向のなす角 θ を用いて(1)、(2)式による計算を行い、この値を各灯火制御時の注視距離とした。最後にこれらの注視距離を車速で割った値をカーブ走行中の予見時間として入力した。また、直線走行中の予見時間は2秒を上限とした。

$$L_{AFS} = L \cos(\theta) \quad (1)$$

$$L_{Conventional} = L \cos(\theta + \omega) \quad (2)$$

図5にモデルによる予見時間計算結果を示す。カーブ進入時、

Fig.4 Visual information extracted from preview road

スイブル制御は操舵角運動型であるため制御無しと大きな差は無いが、操舵によるスイブルにより徐々に予見時間が増加している。ナビ協調制御では進入前からランプがスイブルするため、他の条件より予見時間が大きくなっている。脱出時では、制御の有無によって値の差が大きくなっている。

Fig.5 Variable Preview Time Model

4.2. 操舵モデル

実際のドライバは、現在または直前の車両位置・方向を修正するために操舵のフィードバック制御を行っているため、モデルの操舵は目標コース偏差に応じて行うものとした。

また3.2節から、夜間運転時ドライバは前照灯で照らされるエリアをタンジェントポイント付近に近づけようとした操舵を行っていると考えられるため、モデルの操舵量 δ は上記の偏差 ε に加え、スイブル角 ω 、道路接線とヘッドランプ方向のなす角 θ を用いて式(3)、(4)とした。

$$T_s \dot{\delta}_{AFS} + \delta_{AFS} = K_1 \int \varepsilon dt + K_2 \int \theta dt \quad (3)$$

$$T_s \dot{\delta}_{Conventional} + \delta_{Conventional} = K_1 \int \varepsilon dt + K_2 \int \theta dt \quad (4)$$

なお、 K_1 及び K_2 はドライバゲイン、 T_s は操舵機構及び筋骨格系の遅れ時定数である。

4.3. シミュレーション結果とその考察

本章第1・2節のモデルを含む人間・自動車系モデルを用いて、灯火制御がモデルの制御成績に及ぼす影響を確認した。実験コースはDS実験と同様であり、車速は40[km/h]一定とした。図6にシミュレーション結果を示す。

図のA点はカーブ開始点、B点はカーブ終了点である。図よりAFS無しでは進入・脱出時に急操舵になる傾向が見られる。一方、制御有りでは脱出時の操舵タイミングがAFS無しに比べて早く、その後の操舵もゆっくりと行えており、DS実験結果を模擬できている。また、ヨー角加速度に注目すると、DS実験同様に灯火制御の違いにより差が出ている。AFS無しではカーブ進入時と脱出時で差が大きく、脱出時には操舵の切り戻しが遅

Fig.6 Steering Angle / Yaw Acceleration (Simulation)

れることによってヨー角加速度のピークも遅れ、その後の車両挙動も不安定となる。さらにスイブル制御とナビ協調制御の関係についても、カーブ進入前の注視時間の変化を模擬したナビ協調制御の条件でヨー角加速度の値が小さくなっており、DS実験結果を模擬できている。

次に、灯火制御がライン取りに及ぼす影響を確認した。図7にAFS無し及びスイブル制御時の走行軌跡を示す。

Fig.7 Vehicle Trajectory on a Right-hand Curve(Simulation)

DS実験と同様に、AFS無し条件ではカーブ中盤～脱出にかけてコース内側寄りを走行している。これは遠方の情報を得るため、ヘッドランプをタンジェントポイント付近に近づけようとする行動が寄与していると思われる。

4.4. 異なる属性のドライバに対するスイブル制御の検討

灯火制御を行う上では、様々なドライバが安心・快適な運転を行えるよう支援を行うことが望ましい。そのため、作成したモデルを用いて、異なる属性のドライバに対するスイブル制御の検討を行った。ここでは、過去の検討からスイブルの物理量として「反応時間」「速度」「ふらつき」の3つを検討すべき項目とし、これら項目に最も影響を及ぼすスイブルパラメータとしてそれぞれ「むだ時間」「t値」「スイブルの遅れ」を変化させ、各項目がドライバに与える影響を調査した。なお基準値として、むだ時間=0[s]、t値=3[s]、スイブルの遅れ=0.2[s]に設定し、各値を、むだ時間=0.5[s]、t値=1.5[s]、スイブルの遅れ=0[s]に変化させシミュレーションを行った。ドライバモデルは若年者、高齢者の2種類を想定しパラメータを設定した。

図8に若年者、図9に高齢者のシミュレーション結果として、(a)予見時間、(b)操舵角、(c)ヨー角加速度を示す。若年ドライバは遅れ=0[s]で進入時の予見時間の低下が少なく、進入～脱出にかけて操舵及び車両挙動が安定していることがわかる。高齢ドライバは遅れ=0[s]で脱出時の予見時間が減少しており、脱出時

の操舵の収束及び車両挙動が不安定になっている。高齢ドライバーは若年ドライバーに比べ操舵が不安定なため、遅れの小さいクイックなスイブルでは、かえってスイブル角が安定せず、予見時間に悪影響を及ぼしたと考えられる。また若年ドライバーは操舵が安定しているため、遅れの小さいスイブルでもふらつかず、予見時間を高く保つことができたと考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、人間・自動車系を考慮した灯火制御システム評価・設計の手法を提案することを目的とし、灯火制御がドライバーの運転行動に与える影響を調査した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) DS 実験により、灯火制御 (AFS の有無, ナビ協調制御) の違いによる車両安定性への影響を確認した結果、カーブ進入時と脱出時で効果が異なる事を明確にした。
- 2) DS 実験と人間・自動車系モデルを用いたシミュレーションの比較により、予見時間を可変としたドライバーモデルを使用することで、灯火制御 (AFS 有無, ナビ協調制御) の違いによる運転行動への影響を検証した。
- 3) 人間・自動車系モデルを用いたシミュレーションにより属性の異なるドライバーに対するスイブル制御効果を明らかにした。

本稿の検討により、灯火制御がドライバーの認知・判断行動における予見時間変化に影響を与え、この情報の差が操舵行動に反映され、それにより車両挙動及び走行ラインが変化する、という人間・自動車系としての灯火制御の有効性を明確にした。また AFS は、認知・判断・操作の繰り返しの中で、操作後の認知

に直接影響を及ぼすものであり、ドライバー特性に合わせた設計を行うことが、ドライバーの評価及び車両の制御成績改良に繋がることを明確にした。

今後は、次世代の灯火制御技術に対して、操縦性安定性への影響の更なる詳細な検討に加え、外乱等の周辺環境特性を考慮した人間・自動車系としてのアプローチを行う予定である。

参考文献

- (1) F.Panerai, D.Toffin, D.Paille, A.Kameny: Eye Movement patterns in nighttime driving: conventional and swiveling headlights, Driving Simulation Conference, (2008)
- (2) 堀井泰聡, 土居俊一, 和田隆広, 森川慶祐, 可変配光前照灯 (AFS) の有効性評価に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.40, No.6, pp.1593-1598, 2009
- (3) 堀井泰聡, 森川慶祐, 和田隆広, 土居俊一, 予見時間可変モデルを用いた可変配光前照灯 (AFS) 制御時の運転行動解析, 自動車技術会論文集, Vol.41, No.5, pp.987-992, 2010
- (4) K.Ishiguro, Y.Yamada: Control Technology for Bending Mode AFS, SAE 2004 - Annual - 633, (2004)
- (5) M.Land and D.Lee, Where we look when we steer, Nature, vol.369, pp.742-744, Jun 1994.
- (6) 吉本堅一, 予測を含む操舵モデルによる人間 - 自動車系のシミュレーション, 日本機械学会誌 第 71 巻 第 596 号 (1968)

(a) Preview Time

(b) Steering angle

(c) Yaw Acceleration

Fig.8 Simulation results (Young Driver)

(a) Preview Time

(b) Steering angle

(c) Yaw Acceleration

Fig.9 Simulation results (Aged Driver)