

運転者による歩行者の見つけやすさ向上のためのヘッドライトシステム —異なる周辺光条件における効果的な点滅照射光の分析—

前田高志 † 平山高嗣 †† 川西康友 † 出口大輔 ‡ 井手一郎 † 村瀬 洋 †

Takashi MAEDA † Takatsugu HIRAYAMA †† Yasutomo KAWANISHI †
Daisuke DEGUCHI ‡ Ichiro IDE † and Hiroshi MURASE †

† : 名古屋大学, maedat@murase.is.i.nagoya-u.ac.jp

{kawanishi, ide, murase}@i.nagoya-u.ac.jp

†† : 名古屋大学 未来社会創造機構, takatsugu.hirayama@nagoya-u.jp

‡ : 名古屋大学 情報連携統括本部, ddeguchi@nagoya-u.jp

<要約> 夜間における歩行者の交通死亡事故が多発しており, その原因として運転者による歩行者の視認が困難であることが挙げられる. 近年, 通常の前方向射に加えて選択的照射が可能なヘッドライトが開発されており, その技術を活かして歩行者に選択的に光を照射することで歩行者の見つけやすさを向上させることが考えられる. 我々はこれまでに点滅に着目して効果的な照射法を検討し, 特定の周波数において点滅光の照射が効果的であることを確認しているが, 1つの固定された周辺光条件しか想定していなかった. そこで本研究では, 周辺光条件ごとに効果的な点滅照射を分析する. 具体的には, 運転環境を模擬した臨場感のある仮想環境において6種類の周辺光条件を設定し, 通常のロービーム照射, ハイビーム照射および7種類の点滅周波数を用いて実験を行なった. 実験結果から, 点滅照射が見つけやすさ向上に有効であることや, 異なる周辺光条件では効果的な周波数が異なることを確認した.

<キーワード> ITS, ヘッドライト, 点滅, 見つけやすさ

1 背景

様々なADAS(高度運転支援システム)の登場により交通事故死者数は減少傾向にあるものの, 依然として多くの方が亡くなっている. このうち, 歩行中における死亡事故の占める割合が最も高く, 特に薄暮時から夜間にかけて多発する傾向がある[1]. この原因として, 薄暮時から夜間にかけては昼間と比較して明るさが低下しているため, 運転者による歩行者の視認が困難であることが挙げられる. ADASにおける歩行者認識支援システムとしては, 赤外線カメラやLiDARを用いて歩行者を検出した後, 音や画像によって運転者にその存在を知らせるものがある. しかし, 音での提示だけでは歩行者の正確な位置を把握することは難しい. また, 画像の提示では運転者がダッシュボードに設置された提示装置を見る必要があり, 前方から一時的に視線を外すことになるため, 危険を伴う場合がある.

一方で, 夜間において運転者の視界を補助する機器として一般的に前照灯が広く知られている. 近年ではその制御技術の発達から, ADASへの活用に期待が高まっている. 従来のヘッドライトはHID(High-Intensity Discharge)灯が用いられていたのに対して, 近年ではLEDで構成されることが多くなっている. 特に複数のLEDで構成されたヘッドライトの中には, 各LEDがその照射強度や照射方向を独立に制御可能なものがあり, この技術によって通常の前方向射に加え, LEDの一部を使用して指定の範囲を選択的に照射することが可能になりつつある. よって, 歩行者を選択的に照射することが可能と考えられ, その場合, 歩行者領域が明るくなり, 歩行者を見つけやすくと考えられる.

我々はこの技術を応用して, 運転者による歩行者の見つけやすさを向上させるヘッドライトシステムの実現を目指している. 本システムは, 歩行者検出, 歩行

者の見つけやすさ推定，歩行者への照射という3段階の処理からなる．まず，自車前方の歩行者を全て検出する．そのすべてに対して光を照射することは，運転者の視覚的注意を必要以上に誘導したり，逆に注意散漫の状態に陥ってしまう恐れがある．そのため，視認補助が必要な歩行者のみに光の照射を行なうことが望ましい．そこで，検出した歩行者に対してその見つけやすさを推定し，見つけやすさが低い歩行者のみに光を照射することを考える．

最初の段階である歩行者検出技術に関しては，これまで様々なものが提案されている．夜間においては，可視カメラでは検出を行なうことが困難となるため，冒頭でも述べたように赤外線カメラやLiDARを用いた歩行者検出が有効であると考えられる．その中でも，YinらはLiDARによって得られた3次元データを空間上で分割し，Region Proposal Network [2] を利用することで高精度に歩行者検出を行なう手法を提案している [3] ．

次の段階である歩行者の見つけやすさ推定技術に関しては，Engelらが車載カメラ画像から抽出した特徴量を用いた手法を提案しており [4] ，谷繁らは人間の中心視野と周辺視野における視覚特性の違いを考慮した手法により推定精度の向上を実現している [5] ．このように歩行者検出や歩行者の見つけやすさ推定は様々な手法が提案されており，本システムにも活用することができる．そのため，本研究では歩行者検出および歩行者の見つけやすさ推定に関しては既存技術の使用を想定している．

歩行者への照射技術に関しては，色の照射やテクスチャの照射といった様々な照射が考えられる中で，どのような照射が歩行者の見つけやすさ向上に効果的であるかが明らかになっていない．夜間など暗い状況下では人間の視覚は色の弁別性が低下してしまう一方で，明るさの時間的変化に敏感であることが知られている [6] ．そのため，自動車の方向指示器などにも使用されている点滅に着目し，歩行者に対して点滅光を照射することにより，運転者の視覚的注意を歩行者に誘導し，運転者による歩行者の見つけやすさを向上させることが期待される．平塚らは点滅光や明暗が時間経過により交互に入れ替わる縞模様を照射し，実験参加者の反応時間が常時照射よりも短くなったことを報告している [7] ．しかし，彼らの実験においては印刷した紙で歩行

者を模擬しており，実際に歩行者に光を照射した場合と比較して運転者の知覚が異なる可能性がある．

我々もこれまでに点滅光に着目して効果的な照射法を検討し，実際に歩行者に点滅光を照射する実験を通して，特定の周波数が有効であることを確認している [8] ．しかし，明るさの違いや注意を引く光源の有無といった周辺光条件について，これまでは1つの固定された環境しか扱ってこなかった．車両の周辺環境において，周辺光条件によって効果的な点滅周波数が異なることが考えられる．本発表では，周辺光条件ごとに効果的に歩行者を見つけやすくする照射法について，周辺光条件と点滅の周波数を変化させ，実験を通して調査した結果を報告する．

2 周辺光条件および歩行者への点滅照射

実環境下で調査を行なうことが望ましいが，複数の異なる周辺環境で実験及び評価を行なうことは多大なコストを要する．近年では，ハードウェア等の発達に伴いシミュレータを用いて現実環境を高い水準で模擬することが可能になってきている．そこで，我々はシミュレータを用いて複数の環境を構築し，シミュレータ上で評価を行ない基礎的な知見を得ることを目標とする．設定する周辺光条件に従って様々な環境を構築するために，臨場感ある環境を構築できるゲームエンジンであるUnreal Engine¹ を使用する．また，自動車の操縦や点滅光照射の実現のために，Unreal Engine上で動作する運転シミュレータであるAirSim [9] を利用する．周辺環境として，周囲に明かりがない暗い道路，街灯が存在し少し明るい道路，前方に信号機が存在し運転者の視覚的注意が信号機に奪われると想定される道路を構築する．それぞれ夜間と薄暮時における明るさに調節し，計6種類の周辺光条件を設定する．なお，カーブや曲がり角といった大きなハンドル操作を必要とする道路は用意せず，すべて直進道路とする．図1に設定した周辺環境の例を示す．

上述の周辺環境において，歩行者を自動車の進行方向に対して左手側の歩道に1名のみ配置した．歩行者は成人男性とし，服装は白のシャツに灰色のベスト，クリーム色のパンツとした．すべての環境において歩行者は同じ服装の同一人物であり，実験中は静止状態を

¹<https://www.unrealengine.com/>



図 1 設定した周辺環境の例（夜間において前方に信号機が存在し運転者の視覚的注意が信号機に奪われると想定される環境）

保った。ただし、実験参加者が歩行者の位置を記憶することを防ぐために、自動車の進行方向に対する位置は無作為に設定した。

本研究では照射光の点滅周波数を制御することにより様々な点滅を生成した。立上り速度が速いと歩行者のを見つけやすさが向上するという知見 [10] に基づき、本研究では立上り時間が最も短い矩形波を点滅波形として用いる。1 回の点滅における点灯している時間の割合であるデューティ比は、運転時に目にする点滅で多用されている 0.5 とした。我々の以前の実験では、基本周波数 3 Hz もしくは 4 Hz で見つけやすさが最大となっていた [8]。そこでその周辺の周波数をより詳しく調査するとともに、より高周波数の点滅も含め、2, 3, 4, 5, 6, 10, 15 Hz の計 7 種類の基本周波数の点滅を作成した。なお、点滅照射の際には通常のヘッドライト機能であるロービームも同時に照射した。また、歩行者への照射の有効性を確認するために、ロービームのみの照射およびハイビームのみの照射を加えた。そのため、計 9 種類の照射パターンを設定して実験を行った。

3 実験

本節では、歩行者への点滅光照射について、効果的な照射パターンを調査するために行なった実験について述べる。実験参加者は自動車運転免許を所持し、運転に支障をきたさない視力を有する 20 代男女 9 人であった。

3.1 評価方法

本研究では、運転者による歩行者のを見つけやすさ向上を目的としている。そこで、歩行者発見までに要した

時間を評価指標とした。そのために、実験参加者には歩行者に気づき次第すぐに急ブレーキを踏むというタスクを与え、歩行者への点滅光照射開始から急ブレーキを踏むまでの時間を測定し、そこから実験参加者のペダル踏み換え時間を引いて歩行者発見までに要した時間を算出した。ペダル踏み換え時間には個人差があるため、事前に合図から急ブレーキを踏むまでの時間を複数回測定し、その平均をペダル踏み換え時間とした。

3.2 実験設定

歩行者発見までの時間を計測するために、実験参加者には、道路の左側を時速 40 km を維持して走行し、歩行者を見つけ次第すぐに急ブレーキを踏むというタスクを与えた。ただし、内部的にはブレーキを踏むまで速度は時速 40 km に固定した。これは実験参加者が操作を行なうことによって実際の運転を模擬する一方で、他の実験参加者と条件を同じにするためである。なお、速度表示計には内部的に速度が固定されていることが実験参加者にわからないよう、実験参加者の操作相当の速度を表示した。歩行者への点滅照射は自転車と歩行者の距離が 50 m になった時点から行なうよう設定した。また、歩行者への照射光は、歩行者以外への照射の影響を最小限に抑えるために、歩行者の足元から首までを覆う円となるよう設定した。実際の交通シーンにおいて歩行者に対して光を照射した場合に、歩行者の顔へ照射すると、歩行者が幻惑状態に陥ってしまう恐れがある。それを防ぐためには照射範囲から顔を除外する必要があり、本実験の設定においても照射範囲から顔を除外した。

3.3 実験環境

本研究では薄暮時および夜間の交通シーンを想定するため、外部光の影響により結果が左右される恐れがある。そのため、図 2 に示すように、実験に使用した装置および実験参加者を暗幕で覆い、外部光の侵入を防いだ。

3.4 実験手順

実験参加者は自転車を停止している状態からアクセルペダルを踏み加速させる。その後、時速 40 km を維持するようアクセルペダルで調節する。ただし、3.2 節で述べたように内部的には時速 40 km で固定されている。その後、歩行者に気づいた時点ですぐに急ブレーキを



図 2 実験環境（実験時には被験者を含め暗幕で被覆した）
かけ停止する。上記の試行を $54 (= 9 \times 6)$ 回行なった。なお、周辺環境と照射パターンの組の提示順は無作為とした。各試行間では、10 秒ほどの間隔を設けた。これは試行間で、夜間から薄暮時、薄暮時から夜間といったように、明るさが異なる環境に遷移する可能性があり、遷移先の明るさに眼を順応させるためである。なお、実験参加者が運転シミュレータに慣れるために、実験前に自由に運転する時間を設けた。このとき歩行者は出現させなかった。

3.5 結果

図 3 に結果を示す。夜間においてはロービームやハイビームのみよりも、歩行者への点滅光照射を行なった方が、歩行者を早く見つけられた。また、周囲に明かりがない環境では 3 Hz、街灯が存在する環境および前方に信号機が存在する環境では 5 Hz が効果的な照射パターンとなった。

一方で薄暮時においては、ロービームやハイビームよりも歩行者への点滅光照射を行なった方が歩行者を早く見つけられたとは言いがたく、必ずしも歩行者への点滅光照射が見つけやすさを向上させるとは限らない結果となった。ただし、最も歩行者の発見時間が短かったものは点滅光照射のものであった。また、最も効果的な周波数こそ違うものの、夜間と同様に周波数が低い点滅光照射が効果的であった。

ハイビームのみよりもロービームのみのほうが、歩行者に光が当たるまでの時間が遅いため発見時間が長くなると予想していたが、薄暮時における前方に信号機がある環境を除いてハイビームのみのほうが発見時間は長かった。前方に信号機が存在する環境では、夜間および薄暮時の両方において、他の環境に比べて歩行者の発見に時間を要していることがわかる。これは

実験参加者が信号機に注意を奪われたため、歩行者に気づくまでに時間を要した可能性が考えられる。

3.6 考察

薄暮時において、必ずしも歩行者への点滅光照射が見つけやすさを向上させなかった原因として、夜間と比較して明るく、歩行者に点滅光を照射した場合にコントラストが大きく変化しなかったためであると考えられる。薄暮時においては点滅光照射による見つけやすさ向上の影響は小さかったものの、最も歩行者の発見時間が短かったものは、夜間・薄暮時ともに点滅光照射のものであり、低い周波数に集中していた。高い周波数であると点滅ではなく常時点灯しているように知覚されることがあり、点滅変化に気づけずこのような結果が得られたのではないかと考えられる。なお、10 Hz などの高周波数の点滅よりも 3~5 Hz のような低周波数の点滅の方が発見時間が短いという結果は、LED 色彩表示器における点滅の従来知見 [11] と合致する。

薄暮時における前方に信号機が存在する環境を除いて、ロービームのみの照射よりもハイビームのみの照射のほうが歩行者の発見時間が長かった。本実験で取り扱った歩行者の服装は、比較的明度が高い色を選択した。そのため、ヘッドライトの光が当たっていてもある程度のコントラストが存在している。しかし、ハイビームを照射することにより、歩行者だけでなく歩行者周辺も明るくなってしまい、コントラストが低下したことで、ハイビームのみを照射した場合よりもロービームのみを照射した場合よりも歩行者発見に時間を要したと考えられる。

夜間・薄暮時の両方において、歩行者の発見時間が他の環境よりも長かった信号機がある環境では、常時照射パターン（ロービームのみ、ハイビームのみ）を用いた場合、発見に 4 秒以上を必要としており、時速 40 km で走行することから歩行者発見時の歩行者と自転車との距離はおおよそ 6 m と計算できる。一方で点滅照射のうち最も発見時間が短かった夜間の 5 Hz の点滅では発見までにおおよそ 3.2 秒と、常時照射パターンよりも 0.8 秒以上早く、その時点での歩行者と自転車との距離はおおよそ 15 m となる。時速 40 km では空走距離におおよそ 11 m、制動距離におおよそ 9 m の合計 20 m 必要であり、常時照射の場合はブレーキが利き始める距離に満たず、時速 40 km のまま衝突してしまう。点滅照

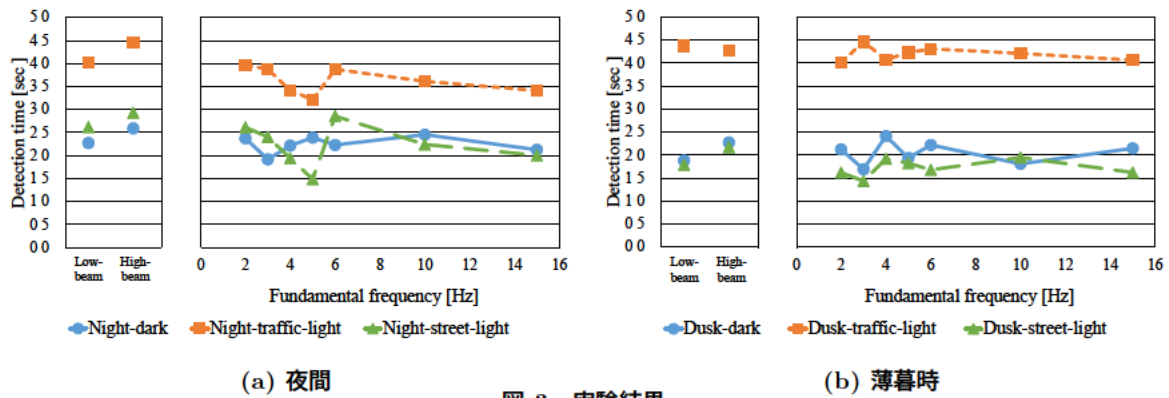


図 3 実験結果



図 4 通常時の視線の推移. 上記画像は約 0.2 秒間隔で左上から右下に推移していく. ダッシュボード付近に速度が表示され, 前方の消失点と速度表示を往復するような視線配布となっている.

射に関しては停止までには至らないものの, ブレーキを踏み減速する余裕があり, 衝突時の衝撃が小さくなるため, 重大な事故を回避できる可能性が高くなる.

また, 運転中の実験参加者の視線推移を調査するために, 1 人だけではあるが, 実験参加者の視線を計測した. 視線計測装置として運転に影響が少ない眼鏡型の pupil labs² を使用し, 装着に十分慣れてから実験を行った. 図 4 に時速 40 km を維持して走行している際の実験参加者の視線の推移を示す. 速度を維持して走行するというタスクを与えたため, 実験参加者は前方の消失点と自車の速度表示を交互に見る視線配布を行っていた. また, 図 5 に歩行者発見時の実験参加者の視線の推移を示す. 歩行者に気づいていない段階 (左端の画像) では前方の消失点付近を見ている. しかし, 歩行者に気づいたタイミングで実験参加者の視線は歩行者がいる方向に移動し, その後ブレーキを踏んだことにより自車の速度が落ちていることが確認できる. これらのことから, 実験参加者は自車の速度に気がつくとともに, 歩行者を中心視野で視認してからブレー

キを踏み停止していることがわかる. さらに, 図 6 に信号機がある環境での実験参加者の視線の推移を示す. ここでは, 信号機に近づくと実験参加者は信号機を見るようになり, その後歩行者を見る視線の推移になっていることがわかった. このことは, 実験参加者は信号機に注意を奪われ, その結果歩行者発見までに時間がかったということを示唆している.

4 むすび

本研究では, 種々の周辺光条件において歩行者の見つけやすさを向上させる効果的な点滅照射パターンを調査した. 運転シミュレータを用いた実験を通して, 夜間において点滅光照射による歩行者の見つけやすさ向上を確認し, 異なる周辺光条件では効果的な点滅周波数が異なることがわかった.

今後の課題として, 繁華街のような極度に視覚的注意が奪われるような周辺光条件における調査等が挙げられる. また, 周辺光条件を数値化し, そこから効果的な点滅照射パターンを推定することも挙げられる.

²<https://pupil-labs.com/>



図 5 歩行者発見時の視線の推移. 上記画像は約 0.4 秒間隔で左から右に推移していく. 赤い円が実験参加者の視点である. 赤枠のフレームで消失点から歩行者がいると思われる方向に視線方向が移動している. その後, 歩行者に気づき, 減速している.

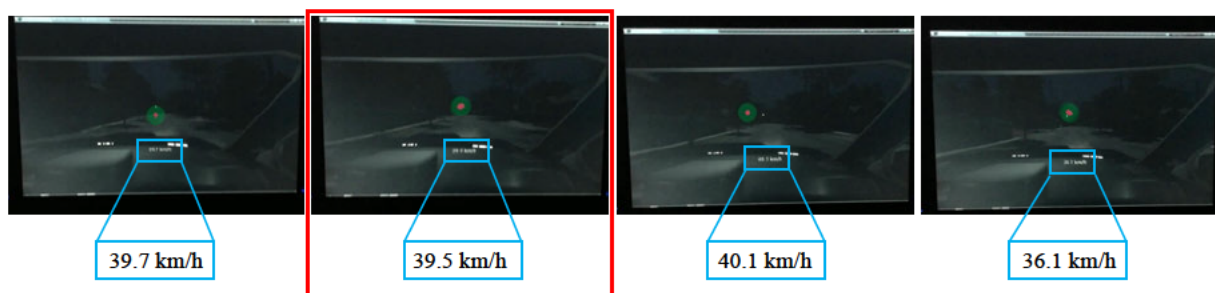


図 6 信号機がある環境での視線の推移. 上記画像は約 1 秒間隔で左から右に推移していく. 赤い円が計測された実験参加者の視点である. 赤枠のフレームで消失点から視線が信号機の方に移動している. その後, 歩行者に気づき, 減速している.

謝辞

本研究の一部は, 科学研究費補助金による.

参考文献

- [1] 交通事故総合分析センター, “交通統計 平成 28 年版,” <http://www.itarda.or.jp/materials/publications.php?page=4>, July 2018. (2018/12/18 参照)
- [2] S. Ren, K. He, R. Girshick and J. Sun, “Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks,” Proc. 29th Conf. on Neural Information Processing Systems, pp.91–99, Dec. 2015.
- [3] Y. Zhou and O. Tuzel, “VoxelNet: End-to-end learning for point cloud based 3D object detection,” Proc. 2018 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.4490–4499, June 2018.
- [4] D. Engel and C. Curio, “Detectability prediction in dynamic scenes for enhanced environment perception,” Proc. 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.178–183, June 2012.
- [5] 谷繁龍之介, 道満恵介, 出口大輔, 目加田慶人, 井手一郎, 村瀬洋, “運転時の人間の視野特性を考慮した歩行者の見落としやすさ推定手法,” 電子情報通信学会論文誌 (D), vol.J99-D, no.1, pp.55–66, Jan. 2016.
- [6] 池田光男, “眼はなにを見ているか—視覚系の情報処理—,” 平凡社, Aug. 1988.
- [7] 平塚誠良, 小島真一, 白木伸征, 塚田敏彦, 樋口和則, 島岡敬一, 浅岡和也, 増田翔, 中島和彦, 山本敦司, “視覚特性に基づいた夜間歩行者に気づきやすい照明—歩行者認知支援効果の実証—,” 自動車技術会 2015 年春季大会学術講演会講演予稿集, pp.256–261, May 2015.
- [8] T. Maeda, T. Hirayama, Y. Kawanishi, D. Deguchi, I. Ide and H. Murase, “Analyzing head-

- light flicker patterns for improving the pedestrian detectability from a driver,” Proc. 21st IEEE Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems, pp.3113–3118, Nov. 2018.
- [9] S. Shah, D. Dey, C. Lovett and A. Kappor, “Air-Sim: High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles,” Field and Service Robotics, pp.621–635, Springer, Nov. 2017.
- [10] 日比雅仁, 平山高嗣, 出口大輔, 川西康友, 井手一郎, 村瀬洋, “輝度の明滅が歩行者の見つけやすさに与える影響の初期検討,” 2016年電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol. 情報・システム(2), p.89, Mar. 2016.
- [11] 藤間崇史, 萩原和人, 山本源治, 池田典弘, 長田雅典, 阿山みよし, “LED色彩表示器の目立ち度の評価,” 平成7年度照明学会全国大会講演論文集, p.207, July 2005.