

インテリジェントヘッドライトシステムにおける 運転者による歩行者認知に効果的な点滅光照射パターンの分析*

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

Analysis of Effective Flicker Light Patterns to Improve the Pedestrian Detectability
from a Driver for an Intelligent Headlight System

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

In this paper, we analyze headlight flicker patterns to improve a pedestrian's detectability from a driver. Recently, headlights are becoming capable of selectively projecting light on a pedestrian in addition to the normal forward projection. However, it is still not analyzed how the light should be projected to effectively improve the detectability of the pedestrian. Firstly, we confirm the effectiveness of the flicker light projection in a real-world setting. Next, we conduct an experiment in ambient light conditions using a driving simulator to find the effective flicker pattern in each condition. As results, we confirmed that the flicker light projection contributes to improve the pedestrian's detectability from a driver and effective fundamental frequencies of flicker lights are different depending on the ambient light conditions.

Key words: ITS, headlight, flicker, pedestrian detectability, perception, driving simulator

1. 緒 言

近年、様々な高度運転支援システム(ADAS:Advanced Driver-Assistance Systems)が開発されているが、いまだ多くの人が交通事故で亡くなっている。状態別割合では歩行中が最も多く、薄暮時や夜間に多発する傾向がある¹⁾。この原因として、そのような時間帯においては運転者による歩行者の視認が困難になり、見落としや発見遅れが発生することが挙げられる。運転者による過失が原因で発生した事故の7割が認知に関わることも報告されており²⁾、事故低減のためにも、運転者による歩行者の認知を支援する技術が必要とされている。

夜間における歩行者認知の支援技術として、赤外線カメラや測距センサを用いて歩行者を検出した後、画像によってその存在や位置を運転者に知らせるものがある。しかし、運転者は提示された情報を確認する際に、視線を提示装置に動かす必要があるため、一時的に視線が前方から外れ、危険な状況を誘発する可能性がある。また、音声によって運転者に歩行者の存在を伝える方法も考えられるが、音声だけでは歩行者の正確な位置を提示することは困難である。このように歩行者の検出ができた場合でも、その位置などの情報の提示方法に課題がある。

一方、夜間における前方状況の認知支援器具として前照灯の使用が義務付けられている。近年ではその制御技術が向上してきており、ADASへの活用が期待されている。近年の前照灯は、LEDが従来のHID(High-Intensity Discharge)灯に取って代わるようになり、特に複数のLEDで構成されたものは、個々のLEDが独立にその照射強度を制御可能である。この技術に

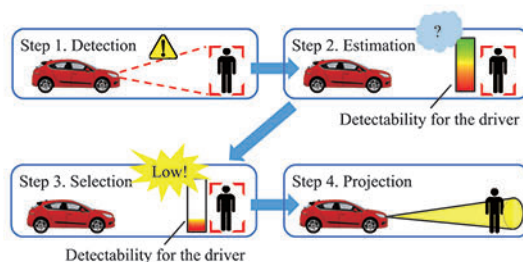


Fig.1 Scheme of the intelligent headlight system

より、通常の前方向射に加え、LEDの一部を用いて指定した領域のみに選択的に照射することが可能になりつつある。

我々はこの技術を応用して、歩行者領域を指定して前照灯の光を照射することにより、運転者から見た歩行者の見つけやすさを向上させるインテリジェントヘッドライトシステムの実現を目指している。図1に示すように、本システムは4つの処理から構成される。まず、赤外線カメラ等を用いて自動車前方の歩行者を全て検出する。その全てに対して光を照射すると、運転者の視覚的注意を必要以上に誘導したり、運転者を注意散漫の状態に陥らせてしまう恐れがあるため、視認補助が必要な歩行者のみに照射を行なうことが望ましい。そこで、検出した歩行者の見つけやすさを推定し、見つけやすさが低い歩行者を選択し、その歩行者のみに光を照射することを考える。これにより、歩行者側も光照射を受けることによって車の接近に素早く気づける可能性が高くなり、運転者との双方による迅速で効果的な回避行動を促すことができると考えられる。

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、可視光カメラでは検出が困難であるため、赤外線カメラや測距センサを用いた歩行者検出が有効であると考えられる³⁾⁴⁾。次の段階である歩行

* 原稿受付 令和元年5月7日

掲載決定 令和元年8月6日

** 名古屋大学 大学院情報学研究所 (名古屋市千種区不老町)

*** 名古屋大学 未来社会創造機構 (名古屋市千種区不老町)

† 名古屋大学 情報連携統括本部 (名古屋市千種区不老町)

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⁵⁾、また Imaeda らが人間の視覚の暗順応に着目して、薄暮時における歩行者の見つけやすさを推定する手法を⁶⁾、各々提案している。このように歩行者の検出や見つけやすさ推定に関して様々な手法が提案されており、本システムにも活用できる。そのため、本研究では歩行者の検出および見つけやすさ推定に関しては既存技術の使用を想定する。

歩行者への照射技術に関しては、色やテクスチャ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の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⁷⁾。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、運転者から見た歩行者の見つけやすさが向上することが期待される。実際に、日比らや平塚らが照射光として点滅光に注目し、歩行者を見つけてやすくする点滅光の性質に関する研究を行なっている^{8) 9)}。しかし、日比らは画像加工で点滅光照射を模擬し、また平塚らは歩行者を印刷した紙に点滅光を照射したため、実際に歩行者に光を照射した場合と比較して運転者の認知が異なる可能性がある。また、両者は背景となる周辺環境が固定された特定の環境での実験であったが、周囲環境の明るさや視覚的注意を引く光源の有無といった周辺光条件の違いによって、効果的な点滅光照射パターンが異なると考えられる。

本論文では、点滅光照射により歩行者の見つけやすさを向上させるインテリジェントヘッドライトシステムについて、より効果的に見つけやすさを向上させる点滅光照射パターンを分析する。本論文の貢献として、まず、点滅光が見つけやすさの向上に寄与することを典型的な実環境における実験によって確認する。その後、複数の周辺光条件を設定して構築した模擬環境における実験によって、それぞれの条件に応じた効果的な点滅光照射パターンを明らかにする。

2. 点滅光照射による歩行者の見つけやすさ向上の確認

本節では、点滅光照射が運転者から見た歩行者の見つけやすさの向上に寄与することを確認するために行なった実験について述べる。

実環境において点滅光を照射した際に有用となるであろう知見を得るためには、可能な限り実際の光照射環境および交通環境を再現することが重要である。現実には様々な環境で車と歩行者は遭遇するが、あらゆる環境下で実験を行なうことは多大なコストを要する。そこで、典型的な周辺光条件を設定し、実環境の道路上で歩行者に扮する実験協力者に対して定常光および点滅光を照射して、それを実験参加者が模擬運転席から主観評価することで点滅光照射の効果を確認する。また、定常光と比較して、見つけやすさを向上させるのが点滅パターン全体か、一部の点滅パターンのみかを分析するために、定常光のほかに複数の点滅パターンを設定する。

2.1 実験環境

図2に実験環境の模式図を示す。実験参加者から約50m前方に歩行者1名を配置し、歩行者に対してプロジェクタ^{*1}を用

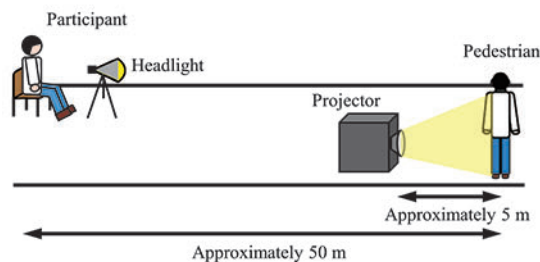


Fig.2 Schematic diagram of the environment in the real-world experiment



Fig.3 View from participants

いて光を照射する。歩行者の服装は白色のシャツとベージュ色のパンツとする。実際の交通シーンにおいて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ため、照射範囲から顔を除外する。実験場所として、背景に過度に視覚的注意を引く物体が存在しない大学構内の道路を使用する。実際の交通環境を模擬するために、椅子に着席させた実験参加者のすぐ前方に前照灯^{*2}を単体で配置し、ロービームで照射を行なう。図3に実験参加者から見た様子を示す。

2.2 評価方法

歩行者の見つけやすさは、「運転者による歩行者の存在の知覚および認知のしやすさ」であり、発見率や発見に要する時間で評価することが多い。しかし、本実験において歩行者の発見をタスクとして課し、発見率で評価すると、全てのパターンで歩行者を発見してしまい、差異が表れない恐れがある。また、実験参加者に対する歩行者の位置が変化しないため、発見に要する時間で評価することも困難である。そこで、本実験では人間の感覚を介在させることができる主観評価法のうち、Thurstoneの一对比較法によって見つけやすさを定量化する。その後、間隔尺度値の最小値が0、最大値が1になるように正規化し、その値を歩行者の見つけやすさとする。見つけやすさが1に近いほど見つけやすい点滅パターンである。ただし、見つけやすさが0でも、見つけることが不可能ということの意味しない。この評価方法を導入する利点としては、評価結果が偶発的なヒューマンエラーの影響を受けにくいことが挙げられる。また、Thurstoneの一对比較法は、対比較の数が少なくても適用することが可能であり、実験参加者の負担を減らすことができる。

2.3 実験設定

従来研究では、LED灯の見つけやすさについて、連続点灯時間と連続滅灯時間の関係が分析されている¹⁰⁾。本研究で想

*1 SONY 製 VPL-FX37. 有効光束 6,000lm.

*2 IPF 製 341HLB. 色温度 6,500 K.

Table 1 Nine flicker patterns considered in the real-world experiment

		Lighting duration s			
		0.125	0.250	0.500	1.000
Duty ratio	0.250	○	○	×	×
	0.500	○	○	○	×
	0.750	×	○	○	○
	1.000	×	×	×	○

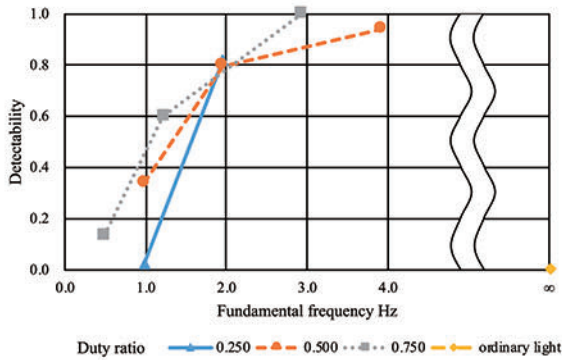


Fig.4 Result of the real-world experiment

定している LED 灯による歩行者への点滅光照射の場合にも同様の傾向があると仮定するが、連続点灯時間と連続滅灯時間は値域が広いので、デューティ比を操作する。ただし、デューティ比だけでは点滅パターンを一意に定めることができないため、連続点灯時間も操作する。本研究ではデューティ比 3 種類 (0.250, 0.500, 0.750) と連続点灯時間 4 種類 (0.125 s, 0.250 s, 0.500 s, 1.000 s) を組み合わせて 12 通りの点滅を生成し、極端に遅い点滅や速い点滅を除外した 8 通りの点滅パターンを分析する。また、点滅の有効性を確認するために、定常光照射パターン (デューティ比 1.000) を追加する。表 1 に本実験で用いる点滅パターンを示す。また、立上り速度が速いと歩行者の見つけやすさが向上するという知見⁸⁾に基づき、本実験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。

2.4 実験手順

実験参加者に、実際に歩行者に照射された異なる 2 つの点滅パターンを観察し、「運転者からの視点を想定して歩行者を見つけやすいと感じた方」を選択するタスクを課す。以下に具体的な手順を示す。

1. 提示対の点滅パターン 1 を歩行者に数秒間照射する。
2. 数秒間、何も提示しない時間を与える。
3. 提示対の点滅パターン 2 を歩行者に数秒間照射する。
4. 実験参加者に回答時間を与え、選択させる。

手順 2. で数秒間何も提示しない時間を設けるのは、前の点滅パターンにおける残像の影響を低減させるためである。提示は全組合せである 36 (= $9C_2$) 対について行ない、提示対における提示順および全組合せにおける提示対順は無作為とする。また、提示対における各点滅の観察回数および各提示対の観察回数は 1 回とする。

2.5 実験結果

9 名の実験参加者 (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 代男性) に協力を依頼して実験を行った。

図 4 に、2.2 節で述べた見つけやすさの定量化を適用して得た結果を示す。ここで、点滅の速さを直感的に認識することができるように、横軸を基本周波数で表現している。これは、各点滅パターンの矩形波に離散 Fourier 変換を適用³⁾して得られたスペクトルの第一ピークの周波数である。また、付録 A に一対比較による各点滅パターンの選択者数を示す。定常光の見つけやすさが最も低いことから、定常光よりも点滅の方が見つけやすさを向上させることができると考えられる。従って、インテリジェントヘッドライトシステムに点滅光を採用することで、歩行者の見つけやすさの向上が実現できると考える。

デューティ比ごとに分析すると、見つけやすさの差は小さく、デューティ比よりも点滅の速さが見つけやすさに与える影響が大きいことが分かる。また、各デューティ比で点滅が速くなるにつれて見つけやすさが高くなるという類似した傾向も確認できる。

2.6 考察

人間には点滅が知覚できなくなる周波数 (臨界融合周波数, CFF: Critical Fusion Frequency) が存在し、その周波数を越えた光は点滅ではなく点灯として知覚されてしまう。その場合、点滅光照射を行なっても運転者には定常光照射と知覚され、見つけやすさは点滅として知覚できる照射光と比較すると低くなってしまふと考えられる。そのため、周波数が大きくなるにつれて際限なく見つけやすさが向上するわけではなく、本実験で設定した点滅の周波数から臨界融合周波数 (夜間における運転時の環境で約 15 Hz) までの間に最も見つけやすさが高くなる周波数が存在すると考えられる。

3. 周辺光条件に応じた効果的な点滅光照射パターンの分析

本節では、複数の周辺光条件それぞれに効果的な点滅光照射パターンを分析するために行なった実験について述べる。

実環境で複数の周辺光条件に対して実験を行なうことは多大なコストを要する。また、実環境で繰り返し実験を行なう場合は、周囲の明るさ等の周辺環境を完全に統制することが困難である。近年、運転シミュレータを用いて現実の交通環境を高い水準で模擬することが可能になりつつあるため、これを用いることで、同一の環境を容易に再現することができる。そこで、本実験では運転シミュレータ上で複数の周辺光条件を設定して構築した交通環境を実験参加者が運転し、その運転操作を分析することで効果的な点滅パターンの基礎的な知見を得る。

3.1 実験環境

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、視覚的な臨場感が高い環境を構築することができるゲームエンジンである Unreal Engine⁴⁾を使用する。また、自動車の操縦や点滅光照射を実現するために、Unreal Engine 上で動作する運転シミュレータである AirSim¹¹⁾を使用する。

実験参加者の前方に 3 台の液晶ディスプレイ⁵⁾を配置し、操作のためのハンドルとペダルを設置する。なお、椅子とペダルの位置は、実験参加者が運転しやすいように適宜調節し、実験参加者とハンドルの距離は約 30 cm とする。本実験では薄暮時および夜間の交通状況を想定するが、外部光の影響により結果が左右される恐れがあるため、図 5 に示すように、実験に使用

³⁾ サンプリング間隔を 0.001 秒、サンプル数を 4096 個とした。

⁴⁾ <https://www.unrealengine.com/>

⁵⁾ Dell 製 U2412M, 24 インチ。



Fig.5 Environment of the experiment with a driving simulator



Fig.6 Example of a simulated scene with a traffic light

する装置と実験参加者を暗幕で覆い、外部光の侵入を防ぐ。

3.2 評価方法

2節の実験では、主観評価によって見つけやすさを定量化した。一方、本実験では、運転シミュレータを用いるため運転操作を計測することができる。そこで、実験参加者に、歩行者を発見後に直ちに急ブレーキを踏むというタスクを課し、歩行者への点滅光照射開始から急ブレーキを踏むまでに要する時間を測定する。その後、ペダル踏み換え時間を差し引くことで、歩行者発見に要する時間を算出し、評価指標とする。ここで、ペダル踏み換え時間とは、運転者が歩行者に気づいた後にアクセルペダルを放し、ブレーキペダルを踏むまでの時間であり、個人差がある。そのため、事前実験として実験参加者毎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する。

3.3 実験設定

歩行者発見に要する時間を計測するために、実験参加者に道路の左側を時速40kmを維持して走行し、歩行者を発見後に直ちに急ブレーキを踏むというタスクを課す。ただし、実際には時速25kmを超えた時点で運転シミュレータの内部で自動的に速度調整を行ない、ブレーキが踏まれるまでは時速40kmに固定する。これは実験参加者が主体的に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、他の実験参加者と点滅光照射時の速度条件を揃えるためである。なお、内部で速度が固定されていることを実験参加者に察知されないように、速度表示計には実験参加者の操作に応じた速度を表示する。歩行者への点滅光照射は、自転車と歩行者の距離が50mになった時点から行なうように設定する。時速40kmでの停止距離は約20mであるため、50mは十分に停止できる距離である。また、歩行者へ照射する点滅光は、歩行者以外への照射の影響を最小限に抑えるために、足元から首までを覆う円状に設定する。

3.3.1 周辺光条件

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の3つを構築する。それぞれを薄暮時と夜間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、全てを直進道路とする。図6に前方に信号機が存在する周辺環境の例を示す。

これらの周辺環境において、歩行者を自転車の進行方向に対して左手側の歩道に1名のみ配置する。服装は白色のシャツに灰

色のベスト、ベージュ色のパンツとする^{*6}。全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保つ。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する。

3.3.2 照射光

2節の実験では、デューティ比ごとの見つけやすさの差は小さかった。そこで、本実験ではデューティ比を変化させる必要はないと考え、運転時に目にする点滅で多用されている0.5に固定する。また、デューティ比が0.5の場合に、基本周波数4Hzで見つけやすさが最大となったことから、その周辺の周波数をより詳しく評価する。従来研究において平塚ら⁹⁾は2Hzと5Hzのみを評価したが、臨界融合周波数の15Hzなど、高周波の点滅も含め、2, 3, 4, 5, 6, 10, 15Hzの計7通りの基本周波数の点滅光を照射する。なお、点滅光照射の際には通常の前照灯の機能であるロービームも同時に照射する。また、歩行者への点滅光照射の有効性を確認するために、常時照射パターンとして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る。つまり、計9通りの照射パターンについて実験を行なう。

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40kmを維持するようにアクセルペダルで調節する。ただし、3.3節で述べたように内部的には時速40kmで固定される。その後、歩行者を発見した後に直ちに急ブレーキをかけて停止する。上記の試行を54(=9×6)回行なう。なお、周辺環境と照射パターンの組の試行順は無作為とする。各試行間では、10sほどの間隔を設ける。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移る可能性があり、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る。この時には歩行者を出現させない。

3.5 実験結果

9名の実験参加者(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)に協力を依頼して実験を行なった。表2に各実験参加者のペダル踏み換え時間の平均と標準偏差を示す。最大で0.2sほどの個人差があるが、各実験参加者における標準偏差は小さいことを確認できる。

*6 服装の反射率は0.3とする。

Table2 Time to switch pedals for each experimental participant

Participants	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Avg.
Avg. s	0.61	0.59	0.56	0.63	0.68	0.69	0.60	0.58	0.51	0.60
SD	0.078	0.047	0.032	0.043	0.045	0.049	0.035	0.022	0.021	0.069

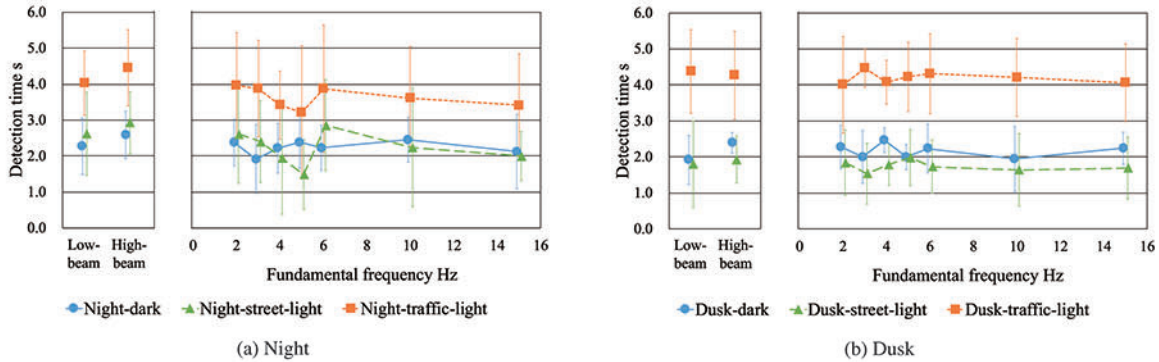


Fig.7 Experimental results for each ambient light condition

図7に歩行者発見に要する平均時間と標準偏差を示す*7。図中の dark, street-light, traffic-light はそれぞれ、周囲に明かりがない環境、街灯が存在する環境、前方に信号機が存在する環境を示す。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。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 が効果的な点滅パターンとなった。一方で薄暮時においては、ロービームやハイビームのみに比べて、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るとは限らない結果となった。周囲に明かりがない環境ではロービームのみ、街灯が存在する環境では 3 Hz、前方に信号機が存在する環境では 2 Hz が効果的な照射光パターンであった。ここで、周辺光条件ごとの歩行者発見に要する時間に照射パターン間で有意な差が認められるか否かを統計的検定によって確認する。正規性の検定と等分散性の検定を行ない、その結果に応じて一元配置分散分析もしくは Friedman 検定を行なったところ、夜間において前方に信号機が存在する環境でのみ、照射パターン間で歩行者発見に要する時間の差に有意傾向が認められた ($\chi^2 = 14.5, p = 0.07$)。有意水準 5% 以下では有意差が認められなかった理由は、データ数が不十分であり、データの分散が大きいためと考えられる。

なお、ハイビームのみの照射よりもロービームのみの方が、歩行者に光が当たるまでの時間が遅いため、発見に要する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存在する環境を除いてハイビームのみの方が発見に要する時間は長かった。前方に信号機が存在する環境では、薄暮時と夜間の両方において、他の環境に比べて歩行者の発見に時間を要したことが分かる。

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空間的にも時間的にもコントラストが大きくならなかったためと考えられる。夜間においては、3 Hz や 5 Hz の点滅光照射が効果的であった。高い周波数

の点滅は常時点灯しているように知覚されることがあり、最も大きな向上効果は得られなかっ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 の低周波数の点滅の方が発見に要する時間が短いという結果は、LED 灯における点滅の見つけやすさに関する従来知見¹²⁾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方が歩行者発見に要する時間が長かった。本実験で設定した歩行者の服装は、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直接照射されていなくても、ある程度は視認可能であった。しかし、ハイビームを照射することにより、歩行者だけではなく歩行者周辺の物体にも光が当たり、それが運転者の視覚的注意を奪った可能性がある。それゆえ、ハイビームのみを照射した場合に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。

薄暮時と夜間の両方において、信号機が存在する環境で歩行者発見に要する時間が他の環境よりも長かった。これは、想定したように、運転者の視覚的注意が信号機に奪われた影響であると考えられる。常時照射 (ロービームのみ、ハイビームのみ) を用いた場合に、発見に 4s 以上要し、時速 40 km で走行していたことから計算すると、歩行者発見時の歩行者と自転車との距離は約 6 m であった。一方で、点滅光照射のうち最も発見に要する時間が短かった夜間の 5 Hz の点滅では発見までに約 3.2 s と、常時照射パターンよりも 0.8 s 以上早く、その時点での歩行者と自転車との距離は約 15 m である。時速 40 km では空走距離に約 11 m、制動距離に約 9 m の合計 20 m が必要であり、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。点滅光照射の場合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。

最後に、2. 節で示した実環境における実験結果との整合性について考察する。図3に示すように実環境での実験における周辺光条件は、運転シミュレータを用いた実験における、夜間における街灯が存在する環境と夜間における前方に信号機が存在する環境を合わせた条件となっていた。図7(a)に示す結果から、その2つの条件ともに、歩行者発見に要する時間が最

*7 同じ周波数に対する3つのエラーバーが重なるため、左右にずらして表記している。

も短かった点滅パターンの基本周波数は 5 Hz であり、次に短かったものが 4 Hz であることを確認できる。運転シミュレータを用いた実験における点滅のデューティ比は 0.5 であり、実環境での実験における同デューティ比の結果を図 4 で確認すると、4 Hz で見つけやすさが最大となっているため、両実験の結果はほぼ整合していると考えられる。

4. 結 言

本研究では、インテリジェントヘッドライトシステムに有用な点滅光照射パターンを分析した。実環境において実際に歩行者に光を照射し、定常光と複数のパターンの点滅光を評価することで、点滅光が運転者から見た歩行者の見つけやすさの向上に寄与することを確認した。また、運転シミュレータ上で複数の周辺光条件を設定して模擬した交通環境における実験によっても、夜間において点滅光照射による歩行者の見つけやすさの向上を確認し、周辺光条件に応じて効果的な点滅周波数が異なることが分かった。

今後の課題として、繁華街のような視覚的注意が奪われやすい物体が様々な存在する環境における分析や定常光照射時における歩行者領域と周辺領域のコントラストに応じた最適な点滅パターンの分析、点滅光照射パターンに対する歩行者側の評価が挙げられる。また、周辺光条件や前方視野の視認性を説明変数として、歩行者の見つけやすさ向上に効果的な点滅パターンを推定する計算モデルを構築することも挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号：17H00745, 19K12080）による。

参 考 文 献

- 1) 公益財団法人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>, (2018).
- 2) 公益財団法人交通事故総合分析センター：歩行者死亡事故は自動車直進中に多く発生—運転者の早期危機認知が死亡事故を防ぐ—, イタルダ・インフォメーション, 94, (2012) 1.
- 3) V. John, S. Mita, Z. Liu and B. Qi: Pedestrian detection in thermal images using adaptive fuzzy C-means clustering and convolutional neural networks, Proc. 14th IAPR Int. Conf. on Machine Vision Applications, (2015) 246.
- 4) 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, (2018) 4490.
- 5) D. Engel and C. Curio: Detectability prediction in dynamic scenes for enhanced environment perception, Proc. 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, (2012) 178.
- 6) Y. Imaeda, T. Hirayama, Y. Kawanishi, D. Deguchi, I. Ide and H. Murase: Pedestrian detectability estimation considering visual adaptation to drastic illumination change, IEICE Trans. on Information and Systems, E101-D, 5, (2018) 1457.
- 7) 池田光男：眼はなにを見ているか—視覚系の情報処理—, (1988).
- 8) 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, 情報・システム (2), (2016) 89.
- 9) 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付きやすい照明—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, (2015) 256.
- 10) 白岩 史, 飛谷謙介, 下斗米貴之, 猪目博也, 藤澤隆史, 饗庭絵里

子, 長田典子, 北村泰彦: LED 警光灯の視認性向上のための感性指標に基づく点滅パターン解析, 精密工学会誌, 79, 11, (2013) 1159.

- 11) S. Shah, D. Dey, C. Lovett and A. Kappor: Air-Sim: High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles, Field and Service Robotics, Springer, (2017) 621.
- 12) 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, (2005) 207.

付録 A 一対比較結果

2.5 節で述べた、点滅光照射が運転者から見た歩行者の見つけやすさの向上に寄与することを確認するために行なった実験の結果として、表 3 に、一対比較による各点滅パターンの選択者数を示す。点滅パターン（デューティ比, 連続点灯時間）を示す昇目の色の濃度が高いほど、Thurstone の一対比較法を用いて定量化した歩行者の見つけやすさが高いことを示す。この表から、濃度差と選択者数の差が反転している提示対が多少は存在するが、全体として相関性があることを確認できる。

Table3 Paired comparison result

点滅パターン 1	選択者数	点滅パターン 2	選択者数
(0.25, 0.125)	9	(0.25, 0.250)	0
(0.25, 0.125)	3	(0.50, 0.125)	6
(0.25, 0.125)	2	(0.50, 0.250)	7
(0.25, 0.125)	7	(0.50, 0.500)	2
(0.25, 0.125)	4	(0.75, 0.250)	5
(0.25, 0.125)	5	(0.75, 0.500)	4
(0.25, 0.125)	8	(0.75, 1.000)	1
(0.25, 0.125)	7	(1.00, 1.000)	2
(0.25, 0.250)	3	(0.50, 0.125)	6
(0.25, 0.250)	2	(0.50, 0.250)	7
(0.25, 0.250)	5	(0.50, 0.500)	4
(0.25, 0.250)	0	(0.75, 0.250)	9
(0.25, 0.250)	2	(0.75, 0.500)	7
(0.25, 0.250)	6	(0.75, 1.000)	3
(0.25, 0.250)	7	(1.00, 1.000)	2
(0.50, 0.125)	5	(0.50, 0.250)	4
(0.50, 0.125)	7	(0.50, 0.500)	2
(0.50, 0.125)	7	(0.75, 0.250)	2
(0.50, 0.125)	7	(0.75, 0.500)	2
(0.50, 0.125)	9	(0.75, 1.000)	0
(0.50, 0.125)	8	(1.00, 1.000)	1
(0.50, 0.250)	8	(0.50, 0.500)	1
(0.50, 0.250)	6	(0.75, 0.250)	3
(0.50, 0.250)	8	(0.75, 0.500)	1
(0.50, 0.250)	8	(0.75, 1.000)	1
(0.50, 0.250)	8	(1.00, 1.000)	1
(0.50, 0.500)	2	(0.75, 0.250)	7
(0.50, 0.500)	1	(0.75, 0.500)	8
(0.50, 0.500)	4	(0.75, 1.000)	5
(0.50, 0.500)	7	(1.00, 1.000)	2
(0.75, 0.250)	4	(0.75, 0.500)	5
(0.75, 0.250)	7	(0.75, 1.000)	2
(0.75, 0.250)	9	(1.00, 1.000)	0
(0.75, 0.500)	7	(0.75, 1.000)	2
(0.75, 0.500)	8	(1.00, 1.000)	1
(0.75, 1.000)	7	(1.00, 1.000)	2