

ヘッドライトを用いた視認性向上のための 歩行者への点滅光照射パターンの検討

前田 高志^{1,a)} 平山 高嗣^{1,b)} 川西 康友^{1,c)} 出口 大輔^{1,d)} 井手 一郎^{1,e)} 村瀬 洋^{1,f)}

概要：さまざまな運転支援技術が開発、実用化されているにも関わらず、薄暮時から夜間にかけての対歩行者死亡事故は多発している。そのため、運転者の歩行者視認を支援するシステムへの需要が高まっている。我々はそのようなシステムとして、視認性が低い歩行者に視認性向上に有効な光を照射する「インテリジェントヘッドライト」を提案する。本報告では、その実現に向けて点滅光照射法を検討した内容について報告する。具体的には、連続点灯時間およびデューティ比（1回の点滅における連続点灯時間の割合）を変化させたときの歩行者の視認性の違いを被験者実験により明らかにし、有効な点滅パターンについて分析した。その結果、瞬間的な照射かつ高速な点滅が効果的であり、2.0 Hzの基本周波数を含む点滅において視認性が高くなる傾向を確認した。

キーワード：視認性、点滅光、連続点灯時間、デューティ比、歩行者、ITS

1. はじめに

近年、対歩行者死亡事故は減少傾向にあるものの、依然として多い。特に薄暮時から夜間にかけては、運転者による歩行者の見落としや発見遅れが起きやすいため、運転者の環境視認（歩行者の存在など）を支援するシステムへの需要が高まっている。前照灯は夜間における運転者の環境視認を支援するシステムの1つであり、近年の照明技術の発達に伴い、従来のHID（High-Intensity Discharge）灯に代わり、多数のLEDから構成された前照灯を搭載した自動車が登場している。このような前照灯は、個々のLEDの照射方向や照射強度を独立に制御できるため、照射範囲の制御が可能になる。この技術により、従来の前照灯ではハイビームが対向車両や前走車両の運転者に幻惑^{*1}を引き起こす恐れがあったのに対し、他の運転者の幻惑を回避しながらも遠方の視認性を確保できるようになった。

また、実用化には至っていないものの、夜間走行中に車両前方の歩行者を認識し、個々のLEDの制御によって歩

行者に対してのみ光を照射し、運転者の注意を歩行者に誘導する技術が研究されている。しかし、すべての歩行者に光を照射することは、運転者の注意を必要以上に歩行者に誘導したり、運転者の注意散漫を招く恐れがある。また、光を照射する場合であっても、光強度の時間的変化や色の变化など様々な照射方法が考えられる。特に、周囲の照明環境によっては歩行者の視認性を効果的に向上させる照射方法は異なる可能性がある。以上より、運転者の視認補助を必要とする歩行者のみに対して、周囲の照明環境に依りて最適な方法で光を照射する技術を搭載した前照灯が必要であるが、いまだそのような技術は開発されていない。

そこで、我々は視認性が低い歩行者に視認性向上に有効な光を照射する前照灯を「インテリジェントヘッドライト」と呼び、その実現を目指している。これまでに、歩行者の見つけやすさを推定する研究がいくつかなされており[1][2]、それらを用いることによって視認補助を必要とする歩行者を推定することは可能である。これをふまえて本研究では、周囲の照明環境に応じた適切な照射方法の検討を行なっている。その初期段階として本報告では、周囲の照明環境の1つである薄暮時を扱い、歩行者の視認性向上に有効な照射方法を提案する。なお、歩行者のみに光を照射するよう制御可能な前照灯がいまだ実現されていないため、画像加工を用いて歩行者への光の照射を模擬し、被験者実験により歩行者の視認性を定量化する。そして、得られた結果から歩行者の視認性向上に有効な照射法につい

¹ 名古屋大学
Nagoya University, Nagoya
464-8601, Japan

a) maedat@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

b) hirayama@i.nagoya-u.ac.jp

c) kawanishi@i.nagoya-u.ac.jp

d) ddeguchi@nagoya-u.jp

e) ide@i.nagoya-u.ac.jp

f) murase@i.nagoya-u.ac.jp

*1 まぶしさのために一瞬視力を失う状態

て検討する。

以下、2章で関連研究について述べた後、3章で歩行者への点滅光照射について述べる。次に、4章で歩行者の視認性を定量化するために行なった実験およびその結果について述べ、5章で考察を行なう。最後に、6章で本報告のまとめと今後の展望を述べる。

2. 関連研究

視認性とは「対象物体に注意を向けた状態での視認のしやすさ」を表す指標である。Paulmierらは、図形や歩行者などの物体の視認性に対象物体周辺の画像パターンが影響することを明らかにしている [3]。その一方で、「物体の目立ちやすさ・視覚的注意の向きやすさ」を表す指標として顕著性があり、対象物体ごとの顕著性（顕著性マップ：Saliency map）を推定する手法が提案されている [4][5]。

視認性と顕著性は類似した指標であるが、観察者の対象物体への注意の有無や影響する要因が異なる。視認性は観察者が対象物体に注意を向けている状態に対して、顕著性は観察者の注意の有無に関わらず対象物体を数値的に評価したものである。また、視認性は視認対象に対する知識や行動の目標など、観察者の内的な状態にも影響を受けて能動的に向けられる注意であるトップダウン注意が必ず影響する。一方、顕著性はトップダウン注意だけでなく、外界のシーンに存在する視覚情報のみに基づいて自動的に向けられる注意であるボトムアップ注意も関与する。このように視認性と顕著性は異なる指標であるが、「物体の目立ちやすさ」である顕著性を向上させることは、それによって注意を誘導した対象物体を視認しやすくすると考えることができるため、視認性を向上させることにおいても有効である。

従来、映像における顕著性は主に以下の5つの特徴から算出されている [6]。

- 輝度
- 色
- エッジ勾配
- 点滅
- 動き

このことから、歩行者のこれらの特徴を見かけ上変化させることによって顕著性を向上させ、運転者の視覚的注意を誘導することができると考えられる。

画像加工によって顕著性を向上させる研究として、畑らは動的な解像度制御を行なうことによって視線誘導が可能であることを示している [7]。また、Takimotoらは画像加工によって色特徴に基づく色顕著度を向上させることによって、特定領域に視線を誘導する手法を提案している [8]。これらは、「エッジ勾配」や「色」を利用した手法であるが、自動車に搭載する場合には、表示機器に画像加工の結果を表示する必要がある。しかし、一時的に注意を

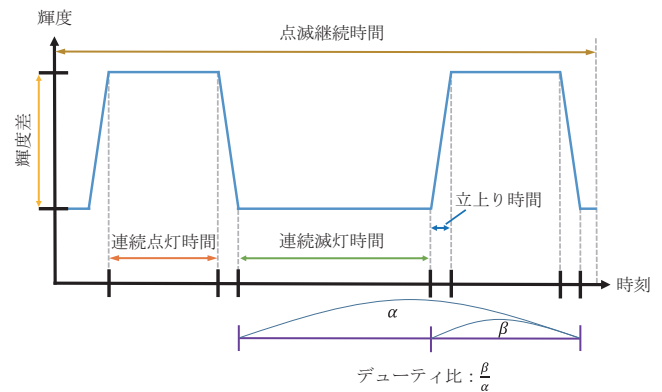


図1 点滅に関するパラメータ。

前方から表示機器に移す必要があり、危険である。また、「動き」に関しては歩行者の移動もしくは自転車の移動を考慮する必要があり、走行時に自在に変化させることは難しいと考えられる。

一方で、「輝度」や輝度変化である「点滅」は近年の前照灯の制御技術の発達により、比較的容易に制御することができると考えられる。日比らは画像中の歩行者領域を輝度変化させ、前照灯の使用を模擬した被験者実験において、輝度変化の立上り速度を速くすることにより、歩行者の見つけやすさが向上することを報告している [9]。また、白岩らは一様な視覚環境下でのLED点滅パターンについて主観評価実験を行ない、連続点灯時間および連続滅灯時間が点滅の視認性に強く関与していることを報告している [10]。このように、輝度の時間的変化である「点滅」は視認性に大きな影響を与えている。

そこで、本研究においては歩行者への点滅光照射を提案し、歩行者の視認性向上に有効な点滅パターンを検討する。

3. 歩行者領域への点滅光照射

1章でも述べた通り、本研究では歩行者への光の照射を画像加工を用いて模擬する。図1に示すように、点滅に関するパラメータとして、連続点灯時間、連続滅灯時間、立上り時間、点滅継続時間、輝度差、デューティ比（1回の点滅における連続点灯時間の割合）、点滅周波数が挙げられる。2章で述べた通り、点滅の視認性に連続点灯時間と連続滅灯時間が強く影響していると報告されており [10]、本研究では従来知見と同様に、連続点灯時間と連続滅灯時間の関係に注目し、それをデューティ比として制御する。また、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、連続点灯時間も分析パラメータの1つとして扱う。周波数を調整することでも様々な点滅を生成することが可能であるが、点滅パターンの波形として正弦波以外の波形を生成することは困難である。

よって、本研究ではデューティ比および連続点灯時間を変化させたときの視認性向上に有効な点滅パターンを検討する。なお、照射エネルギーを上げることにより歩行者の

見かけが明るくなり、歩行者の視認性が向上することは明らかであり、同様に、長時間照射した場合についても歩行者の視認性が向上することは明らかである。そのため本研究では、照射エネルギー一定および点滅継続時間は一定という条件を設ける。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 [9] 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パターンの波形として用いる。

運転状況を模擬した被験者実験を行なうため、実際の薄暮時に撮影した歩行者が 1 人だけ存在している画像を用いた。画像中の歩行者領域のみに対して点滅パターンに応じて γ 補正を施し、輝度を変化させることにより歩行者への点滅光照射を模擬した点滅映像を作成した。

点滅パターンとして、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, 0.250, 0.500, 1.000 秒) を組合せた計 12 種類を用意し、映像時間 (点滅継続時間) は全て 4.000 秒とした。なお、照射エネルギー一定という条件を満たすために、デューティ比ごとに輝度補正幅を変え、デューティ比が小さくなるほど輝度補正幅を大きくした。また、輝度補正幅はデューティ比が 0.500 のときに補正前と補正後で、各画素の HSL 色空間における L 成分平均の差 ΔL が 15.0 となるよう設定した。

4. 実験

3 章で述べた点滅光照射の再現方法によって点滅映像を生成し、それをを用いて視認性を評価する被験者実験を行った。

4.1 データセット

被験者実験を行なうためのデータセットを作成した。日没前後 1 時間に固定カメラを用いて撮影した実際の交通シーンから、歩行者 1 名が遮蔽されずに写っている画像を 3 名分抽出した。抽出した薄暮時の歩行者画像に対して、3 章で述べた画像加工を施すことによって点滅映像を生成し、それをデータセットとした。

4.2 被験者

被験者は普通自動車免許を所持し、ディスプレイを無理なく目視できる視力を有する 20 代男性 8 名であった。被験者には 4.3 節で述べる実験内容および実験手順のみ説明を行ない、それ以外の知識は与えなかった。

4.3 実験手順

図 2 に被験者実験の手順を示す。被験者には、異なる 2 種類の点滅映像を観察して、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課題を与えた。以下に各試行の具体的な手順を示す。

(1) 被験者に画面中に存在する歩行者のおおよその位置を

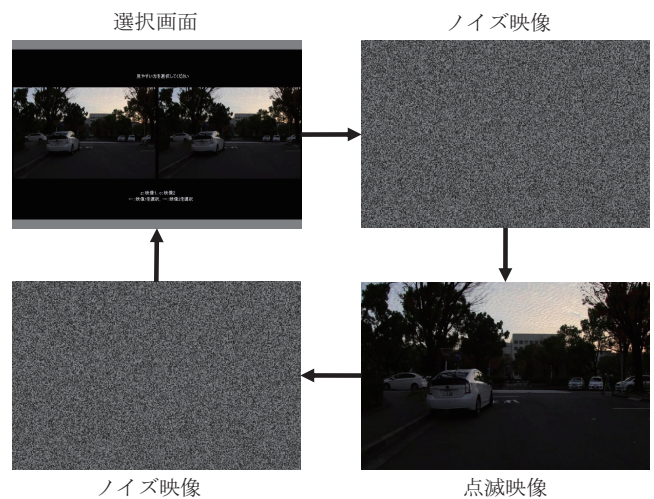


図 2 被験者実験の手順。

口頭で伝える。

- (2) 映像選択画面を提示する。このとき、左右に同一のサムネイル画像を提示する。画像中の交通シーンは後に提示する点滅映像と同一であるが、歩行者は存在しない。
- (3) 被験者は左右の映像のうち観察するものを任意に選択する。
- (4) ノイズ映像を 1 秒間提示した後、選択された点滅映像を 4 秒間提示し、再びノイズ映像を 1 秒間提示する。
- (5) 手順 (2) と同様の選択画面を提示する。
- (6) 被験者は手順 (3)、手順 (4) を繰り返し行うことで左右の映像を両方観察し、歩行者を見つけやすいと感じた方を選択する。なお、左右の映像の観察順、観察回数は任意とする。

手順 (4) において、点滅映像を提示する前後にノイズ映像を 1 秒間提示することによって、残像の効果を低減する。また、左右の映像の観察順を任意にすることによって、映像の観察順による主観評価への影響を低減する。

実験を実施する際に、被験者には事前に実験内容について説明した。疲労の影響を抑制するために、全組合せ 66 ($=_{12}C_2$) 対の半数である 33 対の試行を実施後、2 分間の休憩を与えた。また、組合せの提示順は無作為とした。抽出した 3 名の歩行者ごとに以上の試行を実施した。被験者は合計で 198 対 (= 歩行者 1 名あたりの組合せ 66 対 × 歩行者 3 名) を評価した。

4.4 実験環境

図 3、図 4 に実験環境の模式図を示す。本実験では薄暮時の交通シーンを扱うため、外部光の影響により視認性が変化のおそれがある。そこで図 5 に示すように、映像表示装置と被験者を暗幕で覆い、実験装置内部への外部光の侵入を防いだ。

また、ディスプレイ自体の発光の影響を抑えるために、

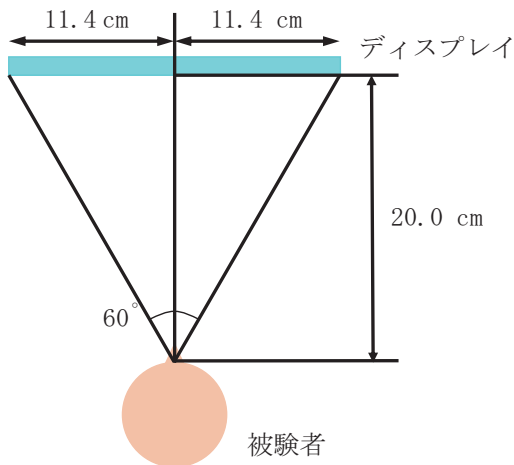


図 3 ディスプレイの配置.

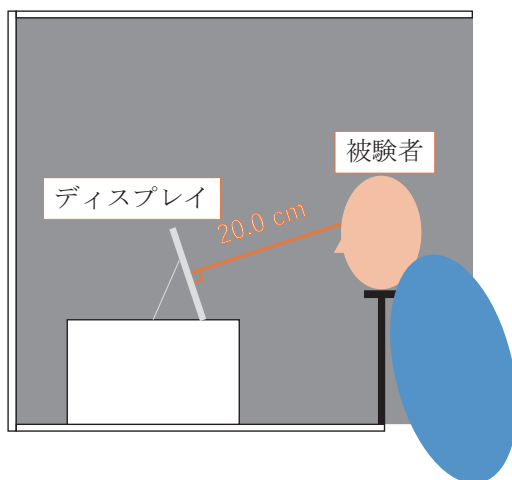


図 4 実験装置の見取り図.



図 5 実験装置の様子。ただし、実験を行なう際には被験者ごと暗幕で被覆する。

有機 EL ディスプレイを備えた富士通 (株) 製の arrows Tab F-03G タブレット端末を用いた。有機 EL ディスプレイはその発光原理により、高いコントラスト比を持ち黒色の再現性が高いため、暗闇や暗所における照明環境を表現することが可能である。

4.5 視認性の評価方法

「視認のしやすさ」を表す指標である視認性は人間の感

覚に基づく尺度であるため、その値を物理量として求めることは困難である。そこで、被験者による主観評価を行ない視認性の定量化を図った。点滅映像に対して評価値を付与することで、視認性を数値的に表現することができるが、被験者ごとに評価基準が異なったり、評価対象ごとの差異が表れない場合がある。そのため本研究では、評価対象の間隔尺度を求め、その差の程度を定量化可能な Thurstone の一対比較法 [11] を用いた。

まず N 種類の点滅パターンに対して異なる 2 種類の組み合わせである計 ${}_N C_2$ 通りの対を生成する。次に、対ごとに被験者に映像を提示し、被験者は「どちらの点滅パターンが歩行者を見つけやすそうか」という設問に対して回答する。得られた対比較結果から、選択率 $p_{k>l}$ を計算する。選択率 $p_{k>l}$ とは、点滅パターン k と l を比較したときに点滅パターン k の方が見つけやすいと評価した被験者の割合を表す。その後、式 (1) により、選択率 $p_{k>l}$ から $x_{k>l}$ を求める。ここで、 F^{-1} は式 (2) で表される正規分布の累積分布関数 F の逆関数である。なお、 μ は正規分布の平均、 σ は標準偏差である。

$$x_{k>l} = F^{-1}(p_{k>l}; \mu, \sigma) \quad (1)$$

$$F(p_{k>l}; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(\tau - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) d\tau \quad (2)$$

求められた $x_{k>l}$ を用いて、式 (3) により間隔尺度 v_l を求める。

$$v_l = \frac{1}{N'} \sum_{k=1}^{N'} x_{k>l} \quad (3)$$

ここで、 N' は比較に用いた点滅パターンの数である。最後に、間隔尺度値 v_l の最小値が 0、最大値が 1 になるよう正規化し、その値を歩行者の視認性とした。視認性が 1 に近いほど視認しやすい点滅パターンである。

4.6 実験結果

4.3 節で述べた手順に従い、4.2 節で述べた 8 名の被験者に対して被験者実験を行なった。実験で得られたデータに基づいて、4.5 節で述べた方法で視認性を定量化し、点滅パターンの分析を行なった。

図 6 に点滅パターンと視認性の関係を示す。歩行者の視認性は、デューティ比 0.250、連続点灯時間 0.125 秒の点滅パターンにおいて最も高いという結果が得られた。

5. 考察

図 6 で示した通り、全点滅パターンのうち最も歩行者の視認性が高かったパターンは、最もデューティ比が小さく、連続点灯時間が短い組合せである。これより、本実験の条件下では瞬間的な照射かつ比較的速い点滅が歩行者の視認性を最も向上させると考えられる。また、デューティ比が

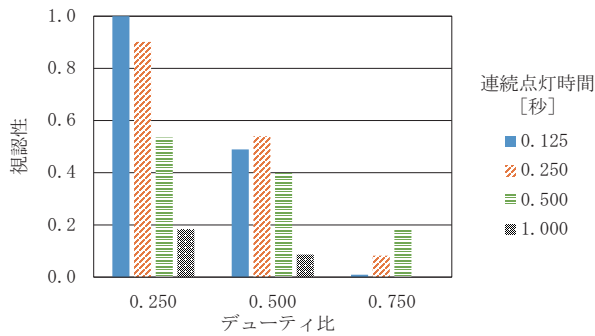


図 6 照射エネルギー一定の場合の点滅パターンと視認性の関係。

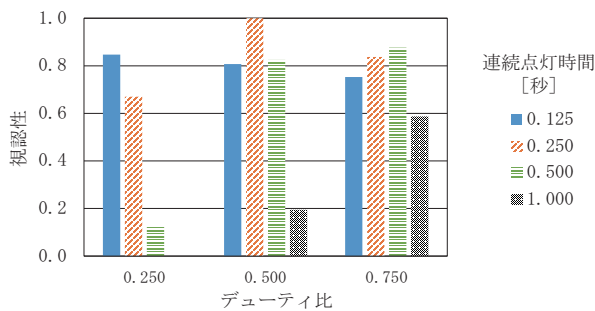


図 7 輝度補正量一定の場合の点滅パターンと視認性の関係。

小さいほど歩行者の視認性が高く、大きいほど視認性が低いという傾向が確認できる。ただし、本研究では照射エネルギーを一定にすることを条件としており、デューティ比が小さいほど輝度補正幅が大きくなり、輝度変化の大きい点滅となる。よって、輝度補正幅が大きく、輝度変化の大きい点滅を歩行者の視認性が高いと被験者が評価した可能性がある。そこで、3章で作成した12種類の点滅パターンの輝度補正幅を、デューティ比0.500における輝度補正幅に統一し、8名の被験者のうち5名に対して追加実験を行った。

図7に結果を示す。輝度補正幅一定の場合、デューティ比0.500、連続点灯時間0.250秒の点滅パターンにおいて歩行者の視認性が最大となった。照射エネルギーが一定の場合(図6)と比較すると、視認性が最大となる点滅パターンが変化していることから、輝度補正幅が視認性に大きく影響していると考えられる。交通環境で実用されている点滅パターンは視認性が高くなるように設計されており、そのデューティ比がほぼ0.500近辺であることから、本実験結果の妥当性が示唆される。一方で、そのような点滅をよく目にするのが影響して、被験者が習慣的に歩行者を視認しやすく感じた可能性も考えられる。

以上で述べた通り、照射エネルギー一定の場合(図6)と輝度補正量一定の場合(図7)で歩行者の視認性が最大となる点滅パターンが異なった。しかし、同一デューティ比では特定の連続点灯時間において視認性が高い傾向が確認できる。このことから、時間的特性が視認性に強い影響を

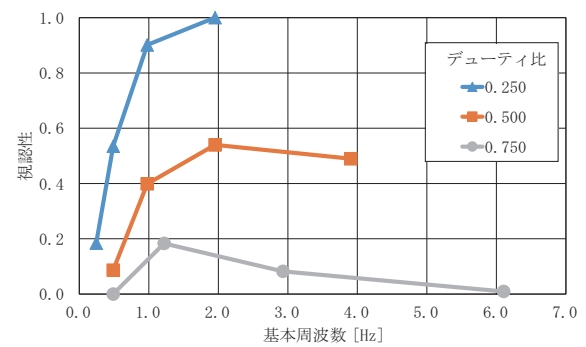


図 8 照射エネルギー一定の場合の基本周波数と視認性の関係。

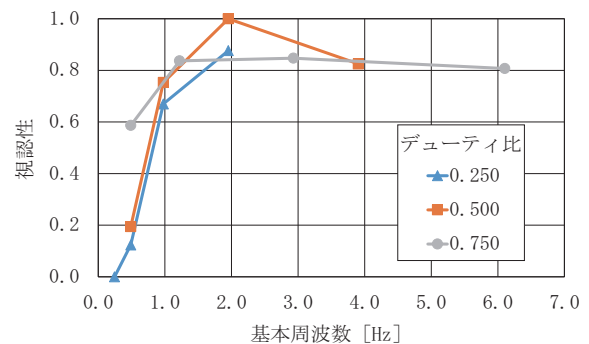


図 9 輝度補正量一定の場合の基本周波数と視認性の関係。

与えていると考えられ、その代表的な説明因子である周波数に着目し、基本周波数について分析した。

図8、図9に結果を示す。同一デューティ比では、照射エネルギー一定の場合も輝度補正量が一定の場合も、基本周波数が2.0 Hz周辺の点滅パターンにおいて歩行者の視認性が高かった。従来知見においても、2.0 Hzの点滅刺激が目立つことが報告されており[12]、本実験の結果はこの報告ともおおそ符合する。これより、照射する点滅光を基本周波数が2.0 Hz周辺を含むように設計することで、歩行者の視認性を効率的に向上させることができると考えられる。

6. むすび

本報告では、インテリジェントヘッドライトの実現に向けて、薄暮時に歩行者の視認性を向上させるための点滅光照射を検討した。デューティ比と連続点灯時間を変化させて生成した点滅パターンを用いて被験者実験を行ない、一対比較法を用いて視認性の変化を調査したところ、照射エネルギー一定の条件下では瞬間的な照射かつ高速な点滅パターンが最も視認性が高いという結果が得られた。また、輝度補正量一定の条件下では基本周波数が2.0 Hz周辺に存在する場合に視認性が高くなるという傾向が得られた。

今後、薄暮時だけでなく他の照明環境においても歩行者

の視認性を向上させるような点滅パターンについて検討する必要がある。また、本報告で紹介した被験者実験では被験者全員が20代男性であった。視認性は人間の感覚に基づく尺度であり、様々な性別や年齢の被験者による評価を行なう必要があると考えられる。

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] 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.56-66 (2016)
- [2] Imaeda, Y., Hirayama, T., Kawanishi, Y., Deguchi, D., Ide, I., and Murase, H.: “Can a driver assistance system determine if a driver is perceiving a pedestrian? — Consideration of the driver’s visual adaptation to illumination change—,” *Proc. 12th Intl. Conf. on Computer Vision Theory and Applications*, pp.611-616 (2017)
- [3] Paulmier, G., Brusque, C., Carta, V., and Nguyen, V.: “The influence of visual complexity on the detection of targets investigated by computer generated images,” *Lighting Research and Technology*, Vol.33, No.3, pp.197-205 (2001)
- [4] Itti, L., Koch, C., and Niebur, E.: “A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.20, No.11, pp.1254-1259 (1998)
- [5] Ludovic, S., Tarel, J.P., and Brémond, R.: “A model for automatic diagnostic of road signs saliency,” *Proc. Transport Research Arena Europe 2010*, 13:2-4 (2010)
- [6] Itti, L., and Dhavale, N.: “Realistic avatar eye and head animation using a neurobiological model of visual attention,” *Proc. SPIE*, Vol.5200, pp.64-78 (2004)
- [7] 畑 元, 小池英樹, 佐藤洋一: “解像度制御を用いた視線誘導,” 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.4, pp.1152-1161 (2015)
- [8] Takimoto, H., Kokui, T., Yamauchi, H., Kishihara, M., and Okubo, K.: “Image modification based on a visual saliency map for guiding visual attention,” *IEICE Trans. on Information and Systems*, Vol.E98-D, No.11, pp.1967-1975 (2015)
- [9] 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 (2016)
- [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, Vol.79, No.11, pp.1159-1164 (2013)
- [11] Thurstone, L.L.: “Psychophysical analysis,” *American J. of Psychology*, Vol.38, No.3, pp.368-389 (1927)
- [12] 藤間崇史, 萩原和人, 山本源治, 池田典弘, 永田雅典, 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 (2005)