

神経生理学モデルを考慮したエッジ検出手法の開発と検証 —トンネル内の明視性評価への応用—

学生会員 志田 輝（東京理科大学） 正会員 橋本 晃一（東京理科大学）
専門会員 吉澤 望（東京理科大学） 専門会員 小平 恭宏（コイト電気株式会社）

Development and Verification of Edge Detection Method Based on Neurophysiology-based Models —Application to Visibility Evaluation in Tunnels—

Student Member **Hikaru Shida** (Tokyo University of Science),
Member **Koichi Hashimoto** (Tokyo University of Science),
Fellow Member **Nozomu Yoshizawa** (Tokyo University of Science) and
Fellow Member **Yasuhiro Kodaira** (Koito Electric Industries)

ABSTRACT

Luminance-based visibility evaluation methods can enhance lighting design flexibility in near future, in which case edge detection technologies will be essential. We developed an edge detection method by including a normalization algorithm based on neurophysiology and validated it by examining the relationship to subjective evaluation in tunnel spaces. The result showed that the algorithm in this research could estimate the visibility with sufficient accuracy. In the future, this algorithm will need to be combined with the optical mechanism in visual systems and compared with other algorithms with different parameters settings to further validate this method.

KEYWORDS : edge detection, neurophysiology-based model, visibility, tunnel lighting

1. 研究背景・目的

近年のセンシング技術のめざましい発展に伴い、建築照明分野においてもそれら技術を用いた環境把握手法が今後様々な場で活用されるようになっていくであろう。人の視覚は初期視覚系におけるエッジ検出を通して高次の処理へと進む中で物体の認識がなされる¹⁾ので、ある対象物の明視性を検討するためには、センシングによって得られた輝度画像からまずはエッジ検出を行うことで、その対象物の見え方をある程度予測することが可能となる。輝度画像を基にした明視性評価が可能となれば、照明シミュレーションによる照明設計段階による検討と、輝度測定システムの活用による施工後の評価に新たな研究成果を生かすことができるようになり、より精緻な照明設計プロセスの発展に寄与することになる。ただし人間の視覚特性が完全に解明されていない中で、様々なエッジ検出手法の信頼性がどこまで確保されているか明らかな場合や、またセンシング技術の中にはそのアルゴリズムが完全に公開されていない場合もある。視環境評価手法として照明設計の中で活用し、さらには照明環境に関する基準等に落とし込んでいくためには、その時点においてどのような視覚情報処理の流れに沿ってアルゴリズムを構築したのかを明らかにしながら、その有効性と限界を提示していくことが求められよう。

建築設計や照明設計にエッジ検出に基づく視認性・明視性評価手法を応用する研究としては、W.B. Thompsonら（2017）²⁾

によって開発された、コントラスト感度の低下を組み込むことにより弱視者の視認性をシミュレートする技術を用いた建築設計プロセスにおいて活用する研究（R. Shakespeare and G. Legge（2019）³⁾）や、中村芳樹ら（2010）⁴⁾のコントラスト・プロファイル法に基づく視認性の研究などがある。このような視認性評価手法は、照明シミュレーションによって事前に輝度が容易に算出可能になってきた現在、建築設計や照明設計の場でも実際に活用可能な段階にきていると言えよう。ただし後者の手法は独自の実験に基づいて構築されたコントラスト・プロファイルをベースにしており、Normalizationなどの既存の計算論的神経科学の知見を織り込んだアルゴリズムとは若干方向性が異なると言えよう。汎用性が求められる照明基準や学会のガイドラインなどで用いるためには、今後様々なアルゴリズムの視認性・明視性評価への適合性を比較・検証していく必要があろう。

以上から、本研究は今後の照明設計・建築設計における明視性評価手法を活用していくことを最終的な目標に沿えて、計算論的神経科学に関する既往文献の知見を参照しながら、神経生理学モデルに基づいたエッジ検出アルゴリズムを構築し、さらにそのアルゴリズムによる検出結果の妥当性を、一例として安全性確保のため先行車・白線・路上障害物などがはっきりと見えることが要求されるトンネル空間を対象とした被験者評価実験を基に検証することを目的とする。

トンネル空間内部の基本照明については、道路照明施設設置基準・同解説⁵⁾で規定されており、路上障害物を知覚

できることを主たる検討項目とした数多くの実験を通して導き出された平均路面輝度・輝度均斉度等に基づく推奨値が示されている。近年では池田ら (2019)⁶⁾ によるトンネル内路上落下物の視認性はほぼ背景路面に対する落下物の輝度比で決定されるとする報告もあるが、岡田ら (2006)⁷⁾ は、従来の C. Dunbar (1938)⁸⁾ による輝度対比弁別閾や J.M. Waldram (1938)⁹⁾ の視認率の議論がシルエット視のみに基づいていたことに対して、逆シルエット視における限界輝度対比（運転者が視認できる限界の反射率の対象と路面輝度との対比）を実験から求めることにより、A.J. Harris and A.W. Christie (1951)¹⁰⁾ が提案したシルエット視、逆シルエット視による視認率の合計である総視認率（以下、TRP）による路上障害物の視認性を検討した。その結果、鉛直面照度が増加するとシルエット視による視認率は減少するが、逆シルエット視による視認性は増加するため、TRPは一定に維持されること、TRPにより路上障害物と先行車の視認性を総合的に検討できることなどを示している。実際のトンネル照明環境下では路面輝度は均一ではなく、その時々路面条件・照明条件等によって変化していくと同時に、視認対象となる路上障害物の反射特性・反射率にも実際には幅があるため、平均路面輝度と輝度均斉度のみでは本来路上障害物の見えを完全に予測することは難しい。視覚生理学モデルに基づいたアルゴリズムを用いれば、逆シルエット視の条件も含めて様々な環境下での路上障害物や先行車の見えを予測することができるようになり、既存の照明基準の適用可能条件の細かな検証に加えて、より精緻な照明設計も可能となっていくであろう。ただし、人の視覚システムがまだ完全には解明されていないため、エッジ検出アルゴリズムを構築する上では、ある限られた研究報告をもとに、幾つかの設定値については暫定的に選択していかなければならない場合もある。そこで本研究では、エッジ検出アルゴリズムを構築するにあたって採用した細かな設定値も明示しながら、そのアルゴリズムを用いることでどこまで実際の空間における明視性評価を予測することが可能になるかどうかを検証していくことを狙いとする。なお本研究においては、閾上レベルも含む対象物の見えやすさを明視性と呼ぶ。

2. エッジ検出アルゴリズム

2.1 既往研究

R.W. Rodieck and J. Stone (1965)¹¹⁾ は、猫の網膜神経節細胞の光刺激に対する反応を調べることで、明るい光に反応する ON 領域と暗い光に反応する OFF 領域が存在することを示した。このような視覚システムの生理学的特性を反映させた計算論的アプローチはその後飛躍的な発展を遂げてきており、Marr ら (1980)¹²⁾ は単純型細胞の神経生理学的モデルをガウス関数やラプラシアンフィルタで表現したエッジ検出手法を提唱した。J.P. Jones ら (1987)^{13, 14)} は、第一次視覚野に複数存在する単純型細胞それぞれの空間周波数応答性、方位応答性、コントラスト応答性などを調べ、哺乳類の単純型細胞がガボールフィルタによってモデル化できることを示した。これら第一次視覚野の特性について、単純型細胞の受容野形状や認識する空間周波数帯域、方位選択性、位相毎の応答特性に関するより詳細な報告が J.P. Jones ら (1987)¹⁵⁾、R.L. De Valois ら (1982)¹⁶⁾、F. W. Campbell and L. Maffei (1971)¹⁷⁾、J. Marik and P. Perona (1990)¹⁸⁾ によってなされてきた。

G.E. Legge and J.M. Foley (1980)¹⁹⁾、G. Sclar ら (1990)²⁰⁾ は、視覚情報処理では高コントラストで応答が飽和することを報告している。D.J. Heeger (1992)²¹⁾ は第一次視覚野に

おいて、V. Mante ら (2005)²²⁾、V. Bonin ら (2005)²³⁾ は外側膝状体において、このような高コントラストでの応答を細胞応答の正規化処理によりモデル化できることを示した。さらに、これらの応答の飽和はいずれも Normalization（正規化）の理論によって統一的に説明できることが M. Carandini and D.J. Heeger (2012)²⁴⁾ の論文の中で包括的に議論されている。

2.2 視覚情報処理の流れ

本研究におけるエッジ検出アルゴリズムは、入力データは眼前で取得された輝度画像とするが、網膜に届くまでに本来眼球内で受ける光学的な変化は考慮しない。人の視覚情報処理の中で考慮する部分は、網膜→外側膝状体→第一次視覚野までとし、閾上知覚を評価可能な正規化（Normalization）のメカニズムを組み込む。また、本研究におけるエッジの見えは、明所視レベルの照明環境下における中心視に限定した。

人間の視覚情報処理の模式図を図1に示す。人間の視覚では外界から入ってきた情報は、最初に網膜にある視細胞層・神経節細胞層を通ることによって、ぼかし処理（平滑化）が行われる。その後外側膝状体（以下、LGN）にかけて特徴抽出が行われ、大脳皮質第一次視覚野（以下、V1）へと送られエッジの検出が行われる。



図1 視覚情報処理の流れ

Fig. 1 Flow of visual information processing.

受容野には明るい光で興奮応答がみられる ON 領域と暗い光で興奮応答がみられる OFF 領域が存在し、網膜および LGN においてはそれらが中心周辺拮抗型の細胞構造（古典的受容野 Classical receptive field）を成している。輝度に対するゲインコントロール、つまり local light adaptation は網膜の段階で生じる。LGN においては非古典的受容野（Extraclassical receptive field）あるいは抑制野（Suppressive field）と呼ばれる領域で、コントラストに対するゲインコントロールが働き、高コントラストでの応答が飽和される。V1 の受容野には単純型細胞と複雑型細胞が存在し、単純型細胞における ON 領域と OFF 領域は隣り合って同じ向きに並列に存在している。この V1 の単純型細胞がエッジを検出するが、単純型細胞の向きや形状は細胞により様々であり、これにより興奮応答を示す方向や空間周波数などが細胞ごとに異なることが知られている。さらに V1 の複雑型細胞は位相の異なる単純型細胞の出力をエネルギーモデル²¹⁾に基づいて統合することで再現でき、得られた複雑型細胞の応答で単純型細胞の応答を正規化することで、閾上知覚における応答を抑制するメカニズムが働く。

2.3 視覚の数値モデル：エッジ検出

2.3.1 エッジ検出アルゴリズムの流れ

人間の視覚情報処理の流れを考慮して構築した本研究におけるエッジ検出アルゴリズムの流れを図2に示す。

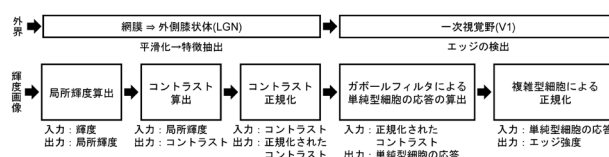


図2 エッジ検出アルゴリズム概要

Fig. 2 Outlines of the edge detection algorithm.

網膜における輝度画像の平滑化は、受容野サイズに合わせた平滑化処理によって局所輝度²²⁾を求めることにより行う。このプロセスが輝度のゲインコントロール、つまり局所的な順応メカニズムに対応する。続いて中心周辺拮抗型受容野を、標準偏差の異なるガウシアンフィルタの差分であるDoG (Difference of Gaussian) によって模することによりコントラストを算出する²²⁾。その後算出された受容野のコントラスト応答を、抑制野 (非古典的受容野) の応答で正規化することで、網膜からLGNにかけて働く高コントラストに対する応答の飽和メカニズムを組み込んだ。

上述したように、J.P. Jonesら (1987)^{13, 14)} によるとV1の単純型細胞が持つ方位や空間周波数の選択性などの特性はガボルフイルタにより近似することができる。さらに単純型細胞の出力をエネルギーモデルに基づいて処理し、複雑型細胞の出力を算出したのち、単純型細胞の応答を複雑型細胞の応答をもとに正規化することにより、閾上知覚に対応した出力を算出し、最終的なエッジ画像を得た。

2.3.2 輝度情報取得

入力データとなる輝度画像は、今回はCANON EOS 5D mark III+TAMRON SP 45 mm F/1.8によって取得した。解像度5760*3840 pixel, 水平画角43.6°, 垂直画角29.9°であるため、1 pixel当たりの画角が網膜における受容野サイズ²²⁾以下の0.0078°となっている。

2.3.3 各処理における数理モデルとパラメータ設定

1) 局所輝度の算出

局所輝度は、V. Manteら (2005)²²⁾ を参考し、以下の式(1), (2), (3)から算出する。受容野のサイズに対応した対象領域 (以下、パッチ) の輝度の重み付け平均を求めるため、本研究ではL.J. Croner (1994)²⁵⁾ の示した網膜の受容野サイズ0.03°の値を参照に、本研究の画像処理上ではパッチのサイズを3×3 pixelとした。具体的には、式(1), (2)より注目画素の周囲視野角約0.03° (3×3 pixel) における重み係数 w_i を算出し、式(3)で各画素の輝度に重み係数 w_i を乗じて積算することで、注目画素の局所輝度 Lum を算出する。

$$a_i = \cos\left(\frac{2\pi}{d}\sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}\right) + 1 \quad (1)$$

$$w_i = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^N a_i} \quad (2)$$

$$Lum = \sum_{i=1}^N w_i L_i \quad (3)$$

d : パッチ (視野角約0.03°) の直径
 x_i, y_i : パッチ内 i 番目のピクセルの位置
 x_c, y_c : パッチ内中心の位置
 w_i : パッチ内 i 番目のピクセルの重み係数
 L_i : パッチ内 i 番目のピクセルの輝度
 Lum : 注目画素の局所輝度

2) コントラストの算出

局所輝度の算出後、DoGを用いた式(4), (5)によって受容野領域のコントラストを算出する。各式における標準偏差や重み係数の値はL.J. Croner (1994)²⁵⁾ を参照した。

$$DoG_{RF} = k_{ctr} G_{ctr} - k_{srd} G_{srd} \quad (4)$$

$$RF_{out} = Lum * DoG_{RF} \quad (5)$$

DoG_{RF} : 受容野のDoG
 G_{ctr} : 標準偏差 σ_{ctr} のガウシアンフィルタ ($\sigma_{ctr}=0.03^\circ$)
 G_{srd} : 標準偏差 σ_{srd} のガウシアンフィルタ ($\sigma_{srd}=0.18^\circ$)
 k_{ctr} : 中心領域の重み係数 ($k_{ctr}=325.2$)
 k_{srd} : 周辺領域の重み係数 ($k_{srd}=4.4$)
 RF_{out} : 受容野の出力

3) コントラスト正規化

続いて式(6), (7)からLGNにおける抑制野 (非古典的受容野) の応答を算出する。各式における標準偏差や重み係数の値は同様にV. Boninら (2005)²³⁾ を参照した。

$$DoG_{SF} = G_u - k_d G_d \quad (6)$$

$$SF_{out} = Lum * DoG_{SF} * G_{SF} \quad (7)$$

DoG_{SF} : 抑制野のDoG
 G_u : 標準偏差 σ_u のガウシアンフィルタ ($\sigma_u=0.4^\circ$)
 G_d : 標準偏差 σ_d のガウシアンフィルタ ($\sigma_d=1.8^\circ$)
 k_d : 重み係数 ($k_d=0.4$)
 SF_{out} : 抑制野の出力
 G_{SF} : 標準偏差 σ_{SF} のガウシアンフィルタ ($\sigma_{SF}=2.5$)

次に受容野の出力を抑制野の出力を用いて正規化処理を行う。LGNにおける正規化処理の概念図²³⁾を図3に示す。

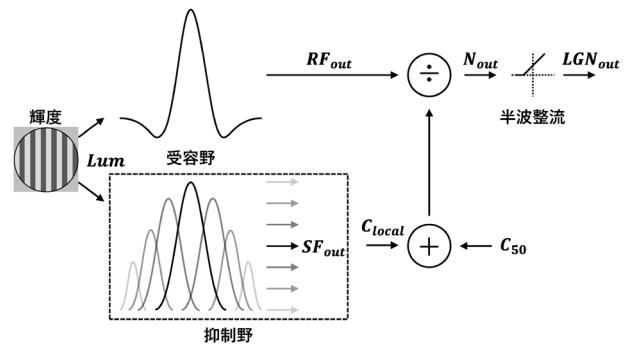


図3 LGNにおける正規化処理の概念図

Fig. 3 Conceptual diagram of normalization processing in LGN.

抑制野における局所コントラスト C_{local} の算出についてはV. Manteら (2005)²²⁾ を参考にし、式(8), (9)より求めた。

$$SF_{local} = \sum_{i=1}^N w_i SF_{out_i} \quad (8)$$

$$C_{local} = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i \frac{(SF_{out_i} - SF_{local})^2}{SF_{local}^2}} \quad (9)$$

SF_{local} : 抑制野の出力
 w_i : 重み係数
 SF_{out_i} : パッチ内 i 番目の抑制野の出力
 C_{local} : 局所コントラスト

次に式(10)²³⁾ に示すように、受容野の出力を抑制野の出力である局所コントラストで除算することで正規化処理を行う。 $V_{\max}(LGN)$ はLGNにおける細胞の最大発火率を示す。細

胞が発火（スパイク）することによって脳内で情報を伝えており、発火率とは単位時間あたりの発火頻度となる。 $c_{50(LGN)}$ の半飽和定数とは、細胞の最大応答の半分を得るのに必要なコントラストの値であり、この値を設定することにより、 C_{local} が微量である場合に、 N_{out} の値が無限大に発散することを防ぐ。発火率と半飽和定数の値はV. Boninら（2005）²³⁾を参照し、それぞれ各細胞の平均値である212と0.3に設定した。

$$N_{out} = V_{\max(LGN)} \frac{RF_{out}}{c_{50(LGN)} + C_{local}} \quad (10)$$

N_{out} ：正規化処理後の出力

$V_{\max(LGN)}$ ：LGNの細胞の最大発火率(212)²³⁾

$c_{50(LGN)}$ ：LGNの半飽和定数 (0.3)²³⁾

さらに、正規化処理後の出力 N_{out} を式(11)²³⁾により半波整流して最終的なLGNの出力とした。なお閾値 V_0 の値はV. Boninら（2005）²³⁾を参照し-7.8とした。

$$LGN_{out} = [N_{out} - V_0]_+ \quad (11)$$

LGN_{out} ：LGNの出力

V_0 ：閾値 (-7.8)

4) ガボールフィルタによる単純型細胞の応答の算出

ガボールフィルタは楕円ガウス関数を正弦平面波で変調することによって作られ、パラメータを変更することで、様々な大きさ、方向、周波数、位相の空間構造を表すことができる。本研究で構築したアルゴリズムは中心視野の視覚情報処理を対象としているため、ガボールフィルタのサイズはV1における中心視野の受容野サイズの範囲内（視野角 $0.1^\circ \sim 1^\circ$ ）から、視野角 0.1° （本研究の画像処理上では 13×13 pixelに該当）を選択した。ガボールフィルタの式を式(12)、(13)、(14)に示し、続いて各パラメータ設定を示す。

$$g(x, y) = \exp\left[-\frac{(x_g^2 + y_g^2)}{2\sigma^2}\right] \times \cos\left[2\pi \frac{x_g}{\lambda} + \varphi\right] \quad (12)$$

$$x_g = (x - x_0) \cos(\theta) - (y - y_0) \sin(\theta) \quad (13)$$

$$y_g = (x - x_0) \sin(\theta) + (y - y_0) \cos(\theta) \quad (14)$$

x_0, y_0 ：楕円の中心座標

γ ：楕円の標準偏差（形状）

θ ：楕円ガウス関数の方向

λ ：波長

$1/\lambda$ ： $\cos$ 項の空間周波数

σ ：分散値

φ ：位相オフセット

i) γ ：楕円の標準偏差（形状）

受容野の楕円形状を表す。通常は $0.23 < \gamma < 0.92$ であり、0.5に集まる傾向があるという報告²⁶⁾に基づき、本アルゴリズムでは0.5に設定した。

ii) bw ：空間周波数帯域幅

単純型細胞の空間周波数帯域は、マカクザルでは0.4～2.6オクターブ（中央値1.4オクターブ）であり、大部分が1.0～1.7オクターブである²⁶⁾。視覚処理の段階が進むにつれ方向と空間周波数帯域処理の精度が次第に上がり、より高次の処理は約1オクターブの時の空間周波数帯域を持った単純型細胞によってなされることを示している²⁶⁾。本研究のアルゴリズム

における処理は、V1に限定しているので1～1.7オクターブの範囲に設定し、さらにR.L. De Valoisら¹⁶⁾によると、空間周波数により帯域幅が異なるので、図から読み取った式(15)より空間周波数（波長）毎に空間周波数帯域幅を変更した。

$$bw = -0.091\lambda + 1.97 \quad (15)$$

iii) $1/\lambda$ ： $\cos$ 項の空間周波数

コントラスト画像を離散ウェーブレット変換（二進分割）し、輝度画像のサンプリング周波数（アナログ信号をデジタルデータに変換する際に、信号の変位を測定するサンプリング（標準化）を行う頻度）とマザーウェーブレット $gaus6$ によって、各分解レベルの擬似周波数を取得した。

iv) σ ：分散

受容野の大きさに相当する楕円ガウス関数の大きさを表す。上記の空間周波数帯域幅と空間周波数（波長）から式(16)より求められる。

$$\frac{\sigma}{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\ln 2}{2}} \frac{2^{bw} + 1}{2^{bw} - 1} \quad (16)$$

v) θ ：ガウス関数の方向

θ の値は検出する応答を示す刺激の方向と等しくなる。F. W. Campbell and L. Maffei¹⁷⁾によれば、人間の知覚する方向には垂直水平方向に優位性があり、垂直水平方向では約 12° 間隔、斜め方向では約 15° 間隔（アルゴリズム内では調整のため 15.6° ）である。そこで本研究のアルゴリズムでは、 0° （水平）から始めて 180° （水平）までを上記の角度に従い図4のように分割し、合計で12方向とした。

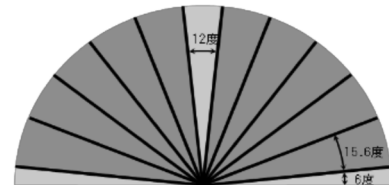


図4 ガウス関数の方向

Fig. 4 Gaussian function direction.

vi) φ ：位相オフセット

位相オフセットは $-\pi$ から π の範囲で定義され、ガボールフィルタの受容野の中心に関する対称性を決定する。位相オフセットの値が $0, \pi$ の場合、ガボールフィルタは中心に対して線対称となり、 $\pi/2, -\pi/2$ の場合は点対称となる。ガボールフィルタはフィルタの凹凸部に重なる部分の値が増幅される。そのためフィルタ内全体の値に大きな変化がなければ最終的に打ち消し合うためフィルタを通した結果は0に近くなり、凹凸部に値の変化（エッジ）が重なるとフィルタを通した後の値は大きくなることによって、エッジ検出を行うことができる。位相オフセットによつての凸部分の移動、振幅の反転を行うことができる。単純型細胞には振幅が対称となる 0 と π 、非対称となる $\pi/2$ と $-\pi/2$ 、さらにこれらを合成したものが存在する。 0 と π ではバー検出、 $\pi/2$ と $-\pi/2$ ではエッジ検出を行う¹⁸⁾。

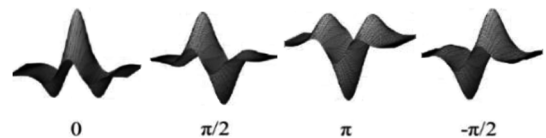


図5 位相ごとのガボールフィルタ

Fig. 5 Gabor filter for each phase.

上記のパラメータを基にガボールフィルタを作成し、LGNの出力に畳み込むことで、単純型細胞の出力を算出した。

$$A_{\theta,\lambda,\varphi} = [LGN_{out} * g_{\theta,\lambda,\varphi}]_+^2 \dots\dots\dots (17)$$

$A_{\theta,\lambda,\varphi}$: 単純型細胞の出力

5) 複雑型細胞による正規化

V1における正規化は、複雑型細胞の応答が単純型細胞の応答を抑制することで行われると報告されている。エッジ検出の際はodd filterに依存しているとの報告¹⁸⁾に基づき、エッジ検出に直接関係する単純型細胞の位相はodd filterである $\pi/2$ のみとした。一方、複雑型細胞に関しては、D.J. Heeger²¹⁾を参照し、4位相によるエネルギーモデルにより以下の式(18)から出力を計算する。

$$C_{\theta,\lambda} = (A_{\theta,\lambda,0} + A_{\theta,\lambda,\pi/2} + A_{\theta,\lambda,\pi} + A_{\theta,\lambda,-\pi/2})/4 \dots\dots\dots (18)$$

$$S_{\theta,\lambda,\varphi} = V_{\max(V1)} \frac{A_{\theta,\lambda,\pi/2}}{c_{50(V1)}^n + \sum_{\theta} \sum_{\lambda} C_{\theta,\lambda}} \dots\dots\dots (19)$$

$C_{\theta,\lambda}$: 複雑型細胞の出力

$S_{\theta,\lambda,\varphi}$: 正規化された単純型細胞の応答

$V_{\max(V1)}$: V1の細胞の最大発火率

$c_{50(V1)}$: V1の半飽和定数

n : コントラストと応答の関係の急峻度

ここで $V_{\max(V1)} \cdot c_{50(V1)}$ はG. Sclarら(1990)²⁰⁾を参照しそれぞれ27.4と0.33とし、 n はD.J. Heeger²¹⁾を参照し2とした。

上記の処理によって得られた各周波数レベル・各方向の単純型細胞の応答を足し合わせることで最終的なV1の出力を算出し、これをエッジ画像とする。エッジ画像の各pixelの値の対数を取り、その値をエッジ値とした。

3. 被験者評価実験によるアルゴリズムの検証

3.1 トンネル模型実験によるアルゴリズムの検証

前章までに構築したエッジ検出アルゴリズムの妥当性を検証するため、本研究では始めに照明条件等を統制しやすい縮尺1/24の模型空間を用いて、明視性評価実験を行った。

3.1.1 トンネル模型実験の方法

1) トンネル模型実験空間の概要

トンネル模型実験空間の図面を図6に示す。トンネル模型の縮尺は1/24で、寸法は長さ4000 mm、道路幅500 mm、路面から天上面までの高さ370 mmとなっている。トンネルが続いているように見せるため、両端に合わせ鏡を設置し、片端には評価のための覗き穴を設けた。覗き穴の位置は左車線側とし、路面からの高さは一般的な乗用車の目線高さである1200 mmの1/24である50 mmとした。照明方式は天井設置型の対称照明方式とし、図6に示すように400 mm間隔で設置した。照明器具は調光可能な小型LED照明(相関色温度4000 K)を用いた。路面の視感反射率はアスファルト塗装の範囲内である17%で、無彩色とした。壁面・天井面は視感反射率の異なるマグネットシート(無彩色)を用意し呈示条件ごとに張り替えた。覗き穴から3800 mmの位置に、縮尺1/24のトラック模型(視感反射率54%)と、路上障害物を想定したブロック(視感反射率20%)を設置した。なお、覗き穴からの外部の光の影響がないように、被験者は常に暗幕を被った状態で実験を行った。

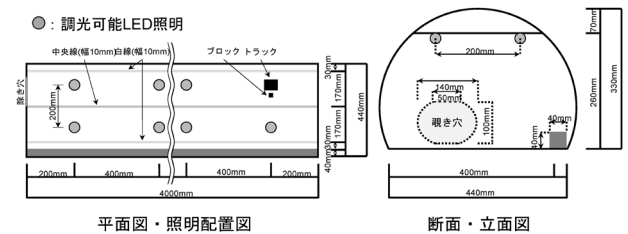


図6 模型空間概要図

Fig. 6 Overview of the model space.

2) 評価対象領域

本実験における評価対象領域は、図7に示すように「白線と路面の境」および「ブロックと路面の境」とした。白線は艶消しホワイトの油性スプレー(視感反射率53%)によって作成し、トラック手前部分の左側にある長さ約500 mmの範囲の白線を評価対象とした。路上障害物を想定したブロックに関しては、一辺が8 mmの木製の立方体に塗料を塗布したものを使用し、ブロック全体を評価対象領域としてエッジの見えるを評価させた。被験者には事前に図7に示す画像を提示することにより評価対象領域を明示した。

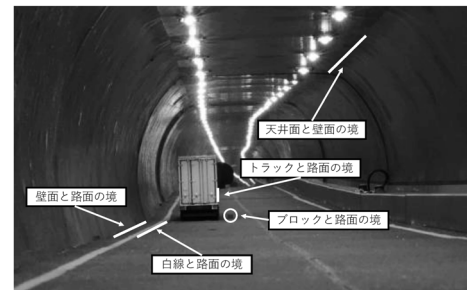


図7 評価対象領域

Fig. 7 Evaluation target.

なお実験実施時は、上記に加え「天井面と壁面の境」「壁面と路面の境」「トラックと路面の境」に関しても評価対象領域としていたが、このうち「天井面と壁面の境」「壁面と路面の境」については、マグネットシートの歪みのために細かな光沢のムラが発生し、被験者が実際に評価した領域とエッジ検出を行う領域との対応を正確につけることができなかったため、解析対象から外した。また「トラックと路面の境」については、トラック脇の背景の一部が合わせ鏡となり覗き穴が映り込んだため、被験者の視点位置の差によって実際に評価した領域の背景が大きく異なり、やはりエッジ検出を行う領域との対応を明確につけることができなかったため、解析対象から省いた。

3) 天井面・壁面反射率と路面輝度

表1に実験因子と各水準を示す。道路照明施設設置基準・同解説⁵⁾に記載されているトンネル内の壁面・天井面の反射係数一覧表を参考に、天井面の視感反射率を10%・25%・40%、壁面を25%・40%・60%とした。平均路面輝度は、トンネル照明の基本照明基準値から設計速度100 km/hに対応する9.0 cd/m²、設計速度80 km/hに対応する4.5 cd/m²、設計速度60 km/hに対応する2.3 cd/m²、さらにその半分の輝度である1.15 cd/m²の4水準とした。ただし、2.3 cd/m²と1.15 cd/m²の条件は、薄明視レベルとなり低照度におけるコントラストに対する感度の低下や桿体による影響を考慮する必要があると考えられ、今回のエッジ検出アルゴリズムの対象から外れるため、以下に示す主たる解析においては対象から除外した。なお平均路面輝度は、CCDカメラを用いた面

輝度測定システムを用いて事前に測定した上で、目標とする平均路面輝度に設定された際の床面数点の輝度値を予め求めておき、内装材反射率を含めた実験条件を変えるたびに、スポット輝度計（KONICA MINOLTA LS-100）でその数点を再測定することで、毎回確認した。

以上より、実際に実験時に実施した条件数は全36条件で、そのうち18条件の結果を以下の分析に用いた。

表1 実験因子と各水準
Table 1 Experimental factors and levels.

天井面反射率(%)	10	25	40	
壁面反射率(%)	25	40	60	
平均路面輝度(cd/m ²)	1.15	2.3	4.5	9

4) 評価尺度と実験手順

被験者には評価対象領域を「0：見えない」「1：かろうじて見える」「2：多少見えづらいが見える」「3：苦勞せずに見える」「4：よく見える」「5：非常によく見える」の6段階で評価させた。

実験手順は以下に示す通りとした。i) 被験者は評価位置に設置された椅子に座り、暗幕を被りアイマスクを着用して15分間順応する。その間に実験者が実験説明を行う。ii) 被験者はアイマスクを外してトンネル内を覗き、20秒間順応した後に、評価対象の見えを評価する。iii) 評価終了後、被験者はアイマスクを着用し、その間に実験者が提示条件を変更する。iv) 以降はii), iii) を繰り返す。条件の提示順は平均路面輝度も含めて完全にランダムにした。P. Irawanら(2005)²⁷⁾によると、明所視レベルでは錐体の局所輝度に対する順応に要する時間は数ミリ秒程度と短いため、錐体の局所的な順応のみを組み込んだ今回のアルゴリズムにおいて対象範囲とした明所視レベル4.5 cd/m²以上の条件では、20秒間の順応時間で問題ないと考えた。

被験者は石原テストの結果正常色覚と判定された両眼視力0.7以上の20代の学生20名であった。

5) 輝度画像測定

各条件の輝度画像は、視点位置に三脚を用いて輝度測定システム（機材：CANON EOS 5D mark III+TAMRON SP 45 mm F/1.8, プログラム：独立行政法人建築研究所L-CEPT）を固定して測定した。

3.1.2 トンネル模型実験：実験結果

視点位置から測定した輝度画像と本研究のエッジ検出アルゴリズムによって算出したエッジ画像の例を図8に示す。

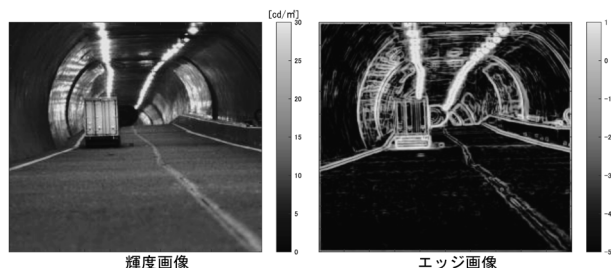


図8 トンネル模型の輝度画像とエッジ画像例

Fig. 8 Luminance image and edge image of the tunnel model.

エッジ検出アルゴリズムによって算出した評価対象領域のエッジ値（最大値）と被験者が評価した評価対象領域の見えやすさ評価値（被験者間平均）との関係を図9に示す。今回の実験では被験者の視力を厳密に統一してはならず、エッジ検出アルゴリズムにおいても視力等の個人差の影響を考慮す

るプログラムを組み込んでいないため、本稿では被験者間の見えやすさ評価値の平均を取ることで、20代両眼視力0.7以上の被験者群の見えやすさ評価値とエッジ値との関係性を検証した。単回帰分析の決定係数 R^2 は0.86となり、本エッジ検出アルゴリズムは模型を使用した単純なトンネル道路空間の明視性評価において、ほぼ適応可能であることを示すことができた。ここで、評価対象の見えやすさは評価対象と背景の輝度の差から生じるエッジで決まり、評価対象の大きさなどには依存しないので、「白線と路面の境」と「ブロックと路面の境」を合わせて解析をした。なお、個人毎に見えやすさ評価値とエッジ値の間で単回帰分析を行った場合の決定係数 R^2 の平均は0.45と、被験者間平均とエッジ値の単回帰分析の場合よりも低くなった。これは個人内での評価の幅が3~4段階程度と狭い被験者が多くいたことが一因になっていると考えられる。

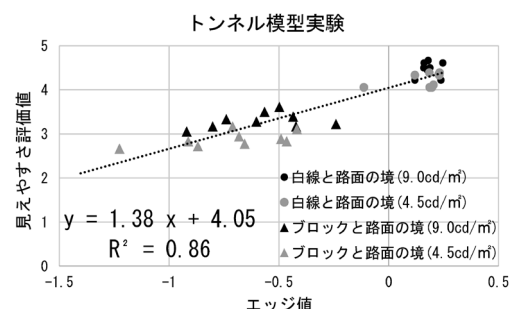


図9 トンネル模型実験：エッジ値と見えやすさ

Fig. 9 Edge value and visibility in tunnel model experiment.

また参考までに、明所視レベルと薄明視レベルの結果を比較したものを図10に示す。薄明視レベルの結果は単回帰分析の決定係数 R^2 が0.74と明所視レベルの結果と比べて説明力が低下していることがわかる。また、同程度の見えやすさ評価値（被験者間平均）におけるエッジ値が明所視レベルの条件と比較すると高くなっていることがわかる。これは低照度においてはコントラストに対する感度が低下し、細胞の最大発火率 V_{max} の値の低下や半飽和定数 $c50$ の値の増加、また薄明視レベルでは本稿では考慮していない桿体の影響が増加するなどの要因が考えられるが、今後更なる検討が必要である。

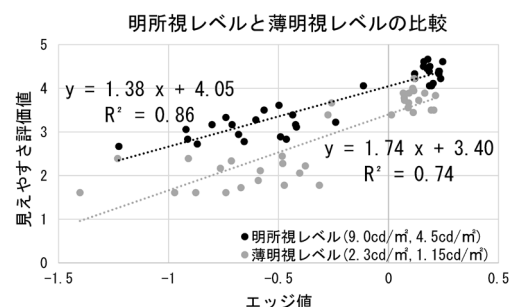


図10 明所視レベルと薄明視レベルの回帰式の比較

Fig. 10 Comparison of the regression equation under mesopic level with the one under photopic level

3.2 実大トンネル実験によるアルゴリズムの検証

本エッジ検出アルゴリズムの実空間における妥当性を検証するため、実大トンネル空間における明視性評価実験を行った。

3.2.1 実大トンネル実験の方法

1) 実大トンネル実験空間の概要

本実験は国土技術政策総合研究所（茨城県つくば市旭1）

の実大トンネル実験施設にて実施した。トンネルの幅は10.5 m、天井の頂点部までの高さは7 mである。鉄筋コンクリート構造の区間400 mと鉄骨構造の区間300 mがあり全長は700 mであるが、鉄骨構造の区間には一部ルーバー構造が含まれる。本実験では外部からの光を遮断するため、鉄筋コンクリート構造の区間400 mのみを使用し、トンネル両端はシャッターを下ろした。舗装はコンクリート舗装である。照明方式は隅角部設置型の対称照明方式で、蛍光灯とナトリウムランプの混合となっており、評価対象付近の照明色温度は2450 K、平均路面輝度は45 cd/m²であった。実験空間の概要図を図11に示す。

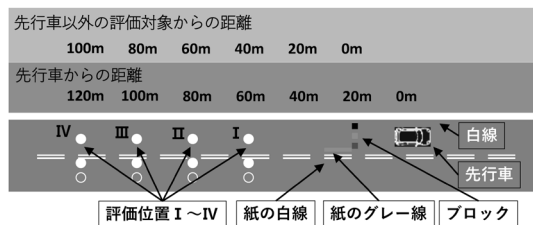


図 11 実験空間概要図
Fig. 11 Overview of the experimental space.

2) 評価対象領域
本実験における評価対象領域を表2・図12に示す。評価対象領域は、背景となる路面輝度との対比が正対比となる「白線と路面の境」、「紙のグレー線と路面の境」、「紙の白線と路面の境」、「先行車と路面の境」と、逆対比となる「ブロック3種類と路面の境」の計7対象とした。視対象となる先行車（HONDA FIT）は、外装色がプラチナホワイト・パールであった。路上障害物を想定した1辺が20 cmの立方体のブロックに関しては、木材に視感反射率の異なる塗料を塗布したものを使用し、視感反射率は低いものから、6.6%（マンセルN3.0）、20%（マンセルN5.0）、40%（マンセルN7.0）とした。元々ある路面上の白線の視感反射率は41%で、様々なエッジ強度を呈示するために準備した紙の白線の視感反射率は74%、紙のグレー線の視感反射率は18%とした。

表2 評価対象領域と反射率
Table 2 Visual targets and their reflectance.

対比	視対象	反射率
正対比	白線	41%
	グレーの紙の線	18%
	紙の白線	74%
	先行車	白色
逆対比	ブロック左	6.6%
	ブロック中	40%
	ブロック右	20%

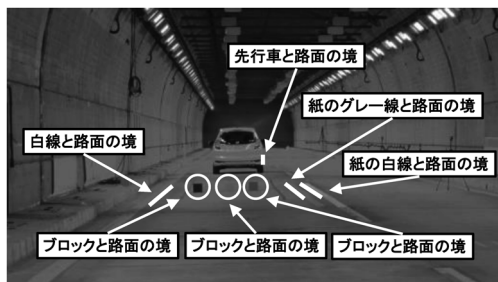


図 12 評価対象領域
Fig. 12 Evaluation target.

3) 照明条件と評価位置
上記の人工照明の調光が不可能だったため、NDフィルタを用いたゴーグルを着用することで減光し疑似的な調光を

行った。NDフィルタは透過率23.5%（FUJIFILM FUJIFILTER ND0.6）と13.7%（FUJIFILM FUJIFILTER ND0.9）を用意することにより、ゴーグルを着用しない場合と合わせて、照明条件は3水準とした。
評価位置は図11に示すように4箇所とした。評価位置から先行車までの距離は、評価位置I: 60 m, II: 80 m, III: 100 m, IV: 120 mとなっており、一方、先行車以外の評価対象（白線・ブロック・紙のグレー線・紙の白線を含む）は重なりを防ぐため、先行車より20 m手前に設置・指定したため、評価位置との距離はそれぞれ、I: 40 m, II: 60 m, III: 80 m, IV: 100 mとなっている。視点高さは、一般的な乗用車の運転席の目線高さである1200 mmとした。椅子を用意し、全被験者で目線高さが一致するよう高さを調整した。

4) 評価尺度と実験手順
被験者には、各評価対象領域の見え方について、トンネル模型実験と同様に、「0：見えない」「1：かろうじて見える」「2：多少見えづらいが見える」「3：苦勞せずに見える」「4：よく見える」「5：非常によく見える」の6段階で評価させた。
実験手順は以下に示す通りとした。i) トンネル空間内の人工照明を全て点灯した中で、10分間順応させ、その間に実験説明を行う、ii) 順応後、最初的评价位置へ行き椅子に座る、iii) NDゴーグル着用の指示があれば着用する、iv) その場で10秒順応し、各評価対象領域の見えを評価する、v) 次の評価位置へ移動する、vi) 以上ii)～v)を繰り返す。なお、本実験における背景輝度となる路面輝度はいずれの条件も明所視レベルであり、前述したようにP. Irawanら（2005）²⁷⁾による明所視レベルでは錐体の局所輝度に対する順応に要する時間は数ミリ秒程度であるという報告から、錐体の局所的な順応のみを組み込んだ今回のアルゴリズムの検証においては、10秒間の順応時間で十分であると考えた。被験者は2人1組として、評価位置に輝度測定システムを挟んで横に並んで座らせて評価させた。照明条件と評価位置は被験者の各組ごとにランダムに呈示した。被験者は石原テストの結果正常色覚と判定された両眼視力0.7以上の20代の学生16名とした。

5) 輝度画像測定
各条件の輝度画像は、被験者の間の床上1200 mmの位置に三脚を用いて輝度測定システム（機材：CANON EOS 5D mark III+TAMRON SP 45 mm F/1.8、プログラム：独立行政法人建築研究所L-CEPT）を固定して測定した。

3.2.2 実大トンネル実験：実験結果
1) 全評価位置からの見えやすさ評価
視点位置から測定した輝度画像と本研究のエッジ検出アルゴリズムによって算出したエッジ画像の例を図13に示す。

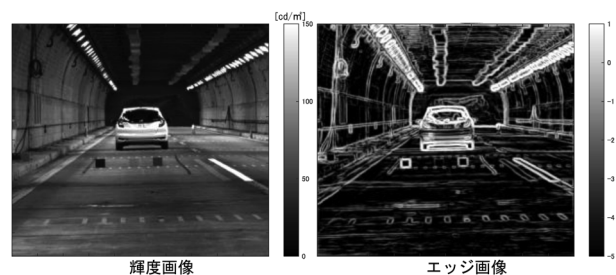


図 13 実大トンネルの輝度画像とエッジ画像例
Fig. 13 Luminance image and edge image of the tunnel.

全照明条件・評価位置における、エッジ検出アルゴリズムによって算出した評価対象領域のエッジ値（最大値）と被験者が評価した評価対象領域の見えやすさ評価値（被験者間平

均) との関係を図14に示す。

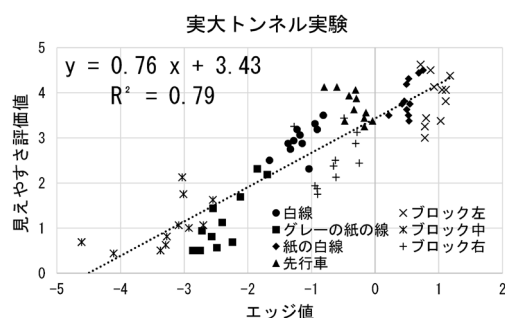


図14 実大トンネル実験：エッジ値と見えやすさ

Fig. 14 Edge value and visibility in actual tunnel experiment.

単回帰分析の決定係数 R^2 は0.79となっており、本研究で構築したエッジ検出アルゴリズムは実空間において工学的に明視性を評価する上では、ある程度十分な精度で見えを予測できていると言えるだろう。なお、個人毎に見えやすさ評価値とエッジ値との間で単回帰分析を行った場合の決定係数 R^2 の平均は0.60であり、トンネル模型実験と比較すると個人毎においても一定の説明力が得られた。これは実大トンネル実験では多くの被験者の評価が6段階に亘ってなされていたことが一因になっていると考えられる。

2) 距離の影響の考慮

図15に、評価位置から評価対象領域までの距離ごとに、エッジ値と評価対象領域の見えやすさ評価値の関係を示したグラフを示す。距離ごとの近似直線の傾きは近く、距離が40 mから100 mへ離れていくにつれて、切片が順に下がっている傾向が伺える。そこで、評価対象領域の見えやすさ評価値を目的変数、評価対象領域のエッジ値EVと距離Dを説明変数として重回帰分析を行って予測式(20)を求めた。評価対象領域の見えやすさ評価の予測値と実験の評価値との散布図を図16に示す。決定係数は0.83となり、距離を変数に加えることにより、見えやすさの予測精度がさらに上がることが示された。これは距離が50 m以上の距離になると見かけのコントラストが低減するという既往文献²⁸⁾の報告とも一致するが、本アルゴリズムで考慮した神経生理学モデル以外の視覚特性、つまり眼前で取得された輝度情報が、網膜に届くまでに眼球内で受ける光学的な変化等が影響している可能性もある。特に評価対象領域まで100 m離れた場合の説明力が低い点は、エッジ知覚の閾値近傍（見えやすさ評価値0~1）の検出力に関して、入力輝度情報の平滑化レベルや観察者の視力等の影響なども含め今後更なる検討が必要なる課題であるといえよう。

$$\text{見えやすさ評価予測値} = 0.76\text{EV} - 0.011\text{D} + 4.24 \dots\dots\dots(20)$$

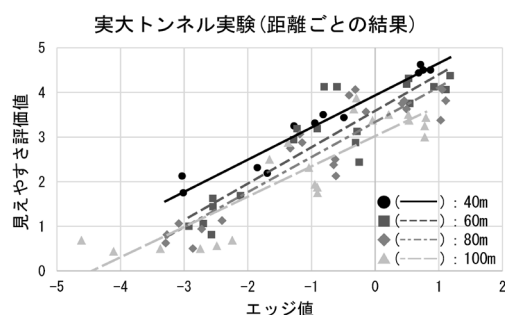


図15 距離ごとのエッジ値と見えやすさ

Fig. 15 Edge value and visibility for each distance.

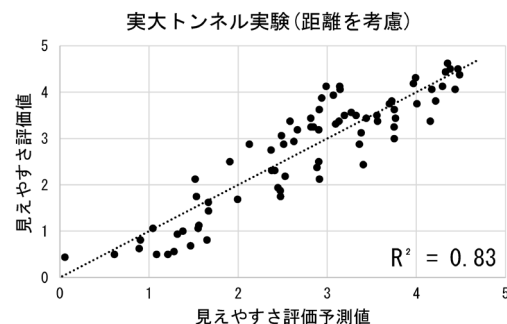


図16 エッジ値と距離を変数とした見えやすさ評価予測値と見えやすさ評価値の関係

Fig. 16 Relation between Visibility prediction value with edge value and distance as variables and Visibility evaluation value.

3.3 模型実験・実大空間実験を合わせた分析

本研究で行ったトンネル模型実験・実大トンネル実験の結果を合わせて、評価対象領域のエッジ値（最大値）と被験者が評価した評価対象領域の見えやすさ評価値（被験者間平均）との関係を求めた結果を図17に示す。全実験をまとめた結果は、決定係数が0.78となったため、本研究で開発したアルゴリズムは、空間の大きさに関わらず見えやすさ（明視性）をある精度で予測可能なことが示されたといえよう。

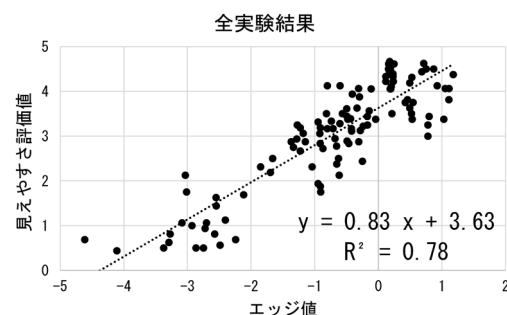


図17 全実験のエッジ値と見えやすさ

Fig. 17 Edge value and visibility in whole experiments.

4. 総括

本研究では、現在明らかになっている人間の視覚情報処理の流れに沿って、閾上知覚の過程を組み込んだ神経生理学モデルに基づくエッジ検出アルゴリズムを作成した。人の視覚は初期視覚系におけるエッジ検出を通して高次の処理へと進む中で物体の認識がなされるため、エッジの検出は物体の見えやすさに繋がることになる。トンネル模型・実大トンネルを対象とした実験により、本エッジ検出手法が実空間における見えやすさ（明視性）の予測にある程度の精度で適応可能であることが示せたといえよう。また、本アルゴリズムは、視対象が路面に対して正対比（逆シルエット視）の場合でも逆対比（シルエット視）の場合でも適用可能であり、路上障害物・先行車の明視性を同じ手法で予測可能となる。現状のトンネル照明の設計指針で先行車背面の鉛直面照度が規定されている場合もあるが、明視性を十分に捉えるためには本来鉛直面照度ではなく輝度から検討する必要がある。輝度情報に基づく視覚情報処理の流れに沿ったアルゴリズムを用いることでより汎用的な設計要領を構築していくことも可能となる。

ただし今回のアルゴリズムは、網膜→外側膝状体→第一次視覚野までの単純化された神経生理学モデルに既往研究で報告されているパラメータを選択して組み込んだものであり、

複雑な視覚情報処理を完全に模擬したものではない。また網膜に届くまでに本来眼球内で受ける光学的な変化は考慮しておらず、視力の影響、輝度計測システムの影響の詳細な検証も今後必要となる。基本的なアルゴリズムとしては、照明設計を行う上で一定の精度に達していると考えられ、今後より予測精度を高めていくためには、複数のアルゴリズム・モデルとの比較、様々なパラメータ設定・より単純な視対象も含めた多様な空間や評価対象における検証等を通して、議論を積み重ねていく必要がある。また神経生理学モデルは明視性のみならず明るさ知覚・グレア知覚等に対しても本来は共通して適用できる部分があるはずであり、アルゴリズムの汎用性を高めるためにはより幅広い視知覚全般との関係を検証していく必要もあろう。

参考文献

- 1) 日本視覚学会編：視覚情報処理ハンドブック，朝倉書店（2000）。
- 2) Thompson, W. B., Legge, G. E., Kersten, D. J., Shakespeare, R. A. and Lei, Q.: Simulating visibility under reduced acuity and contrast sensitivity, *J. Opt. Soc. Am. A Opt. Image Sci. Vis.*, 34-4, p. 583-593 (2017) .
- 3) Shakespeare, R. and Legge, G.: Designing Visually Accessible Spaces (DeVAS): Visibility prediction tools and introducing the Hazard Visibility Score, 18th International Radiance Workshop, NY (2019).
- 4) 中村芳樹，島崎航，岩本朋子：輝度画像を用いた視認性評価手法—LED表示や3次元物体にも適用可能な汎用的視認性評価法—，*照明学会誌*，94巻2号，pp. 100-107 (2010)。
- 5) (社)日本道路協会：道路照明施設設置基準・同解説，平成19年改訂版。
- 6) 池田善久，大草光司，三宅賢二，神野雅文：重回帰分析によるトンネル内路上落下物の視認性を決定する光学的要因の検討，第52回照明学会全国大会（2019）。
- 7) 岡田晃夫，加賀啓記，伊東勇人，坂本正悦：トンネル照明における総視認率の検討，*照明学会誌*，第90巻，第8A号，pp. 495-503 (2006)。
- 8) Dunbar, C.: Necessary values of brightness contrast in artificially lighted streets, *Trans. Illum. Engng. Soc. (London)*, pp. 187-195 (1938).
- 9) J. M. Waldram: The revealing power of street lighting installations, *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, pp. 173-186 (1938).
- 10) Harris, A. J. and Christie, A. W.: The revealing power of street lightning installations and its calculation, *Trans. Illumi. Eng. Soc.*, pp. 120-128 (1951).
- 11) Rodieck, R. W. and Stone, J.: Analysis of receptive fields of cat retinal ganglion cells, *J. Neurophysiol.*, 28-5, pp. 833-849 (1965) .
- 12) Marr, D. and Hildreth, E.: Theory of edge detection, *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 207-1167, pp. 187-217 (1980) .
- 13) Jones, J. P., Stepnoski, A. and Palmer, L. A.: Two-dimensional spectral analysis of cortical receptive field profiles, *J. Neurophysiol.*, 58-6, pp. 1212-1232 (1987) .
- 14) Jones, J. P. and Palmer, L. A.: An Evaluation of the Two-Dimensional Gabor Filter Model of Simple Receptive Fields in the Cat Striate Cortex, *J. Neurophysiol.*, 58-6, pp. 1233-1258 (1987) .
- 15) Jones, J. P. and Palmer, L. A.: The two-dimensional spatial structure of simple receptive fields in cat striate cortex, *J. Neurophysiol.*, 58-6, pp. 1187-1211 (1987) .
- 16) De Valois, R. L., Albrecht, D. G. and Thorell, L. G.: Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex, *Vision Res.*, 22-5, pp. 545-559 (1982) .
- 17) Campbell, F. W. and Maffei, L.: The tilt after-effect a fresh look, *Vision Res.*, 11-8, pp. 833-840 (1971) .
- 18) Marik, J. and Perona, P.: Preattentive texture discrimination with early vision mechanisms, *J. Opt. Soc. Am. A*, 7-5, pp. 923-932 (1990) .
- 19) Legge, G. E. and Foley, J. M.: Contrast masking in human vision, *J. Opt. Soc. Am.*, 70-12, pp. 1458-1471 (1980).
- 20) Sclar, G., Maunsell, J. H. R. and Lennie, P.: Coding of image contrast in central visual pathways of the macaque monkey, *Vision Res.*, 30-1, pp. 1-10 (1990) .
- 21) Heeger, D. J.: Normalization of cell responses in cat striate cortex, *Vis. Neurosci.*, 9-2, pp. 181-197 (1992) .
- 22) Mante, V., Frazor, R. A., Bonin, V., Geisler, W. S. and Carandini, M.: Independence of luminance and contrast in natural scenes and in the early visual system, *Nat. Neurosci.*, 8-12, pp. 1690-1697 (2005) .
- 23) Bonin, V., Mante, V. and Carandini, M.: The suppressive field of neurons in lateral geniculate nucleus, *J. Neurosci.*, 25-47, pp. 10844-10856 (2005) .
- 24) Carandini, M. and Heeger, D. J.: Normalization as a canonical neural computation, *NATURE REVIEWS.*, 13-1, pp. 51-62 (2012) .
- 25) Croner, L. J. and Kaplan, E.: Receptive Fields of P and M Ganglion cells across the primate retina, *Vision Res.*, 35-1, pp. 7-24 (1995) .
- 26) Petkov, N. and Kruizinga, P.: Computational models of visual neurons specialised in the detection of periodic and aperiodic oriented visual stimuli: bar and grating cells, *Biol. Cybern.*, 76-2, pp. 83-96 (1997) .
- 27) Irawan, P., Ferwerda, J. A. and Marschner, R.: Perceptually based tone mapping of high dynamic range image streams, *Eurographics Symposium on Rendering* (2005).
- 28) 塩見弘幸：屋外における人の視覚に関する空間周波数特性，土木学会第57回年次学術講演会，pp. 151-152 (2002)。
(受付日2021年4月19日／採録日2022年2月7日)



志田 輝（正会員）
 Sky株式会社
 〒108-0075 東京都港区港南二丁目16番
 1号品川イーストワンタワー 15階
 1996年8月5日生
 2022年3月東京理科大学大学院修了・修士
 (工学)，同年4月Sky株式会社入社

建築学会会員



橋本 晃一（正会員）
 戸田建設株式会社建築設計統轄部環境設備
 設計部
 〒108-0023 東京都港区芝浦3-9-1
 1996年11月26日生まれ
 2021年3月東京理科大学大学院修了・修士
 (工学)

同年4月戸田建設株式会社入社



吉澤 望（専門会員）
 東京理科大学理工学部建築学科
 〒278-8510 千葉県野田市山崎2641
 1969年8月30日生，1998年3月東京大学大
 学院工学系研究科建築学専攻博士課程終了
 博士（工学）
 建築照明環境の研究に従事

2019年4月～2021年3月 照明学会東京支部長



小平 恭宏（専門会員）
 コイト電工株式会社
 横浜市戸塚区前田町100
 1969年3月22日生，1994年3月日本大学理
 工学研究科修士課程修了 修士（1994年）
 コイト電工(株)にてLED照明器具の開発，
 視環境評価等に従事

2016年4月～2019年3月 『視環境評価のための画像測光に
 関する学会指針』作成に向けた研究調査委員会委員

Email: yasuhiko_kodaira@koito-ind.co.jp