

車載カメラ映像とミリ波レーダデータによる霧の濃さの判定

森 健史[†] 高橋 友和[†] 井手 一郎[†] 村瀬 洋[†] 宮原 孝行^{††}
玉津 幸政^{††}

[†] 名古屋大学大学院 情報科学研究科 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

^{††} (株)デンソー 〒448-8661 愛知県刈谷市昭和町 1-1

E-mail: †{kmori,ttakahashi,ide,murase}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本論文では、霧中の運転支援を目的とし、車載カメラとミリ波レーダを用いて運転中の霧の濃さを判定する手法を提案する。この背景には、近年の運転支援技術への関心の高まりがある。交通事故発生状況の分析によると、悪天候時の事故率は晴天時の17倍ということが知られている。特に霧に注目すると、視認性が低下しているということをドライバが自覚していないことが多く、これが危険性の増加を招くと考えられる。これらのことから、霧の濃さに応じたドライバへの注意喚起や、フォグランプの自動化といった運転支援システムが期待されている。そこで、本報告では、車載カメラとミリ波レーダを用いた霧の濃さの判定手法を提案する。提案手法は、Koschmiederのモデルで用いられる散乱係数を求め、霧の濃さを判定する。散乱係数は、撮影画像中の前方車両画像と、光の散乱がないときに撮影した前方車両画像の輝度分散の変化と車間距離情報から算出される。霧の濃さを表す3段階のクラスを設け、算出された散乱係数に基づき、撮影画像をいずれかのクラスに分類することで霧の濃さを判定する。提案手法の判定精度を評価するために、実際の走行中に収集したデータを用い、提案手法による判定と人間の主観による判定との比較実験を行ったところ、84%の高い一致率が得られた。

キーワード 天候認識, 霧, 視認性, ITS

Fog density judgment

by in-vehicle camera images and millimeter-wave radar data

Kenji MORI[†], Tomokazu TAKAHASHI[†], Ichiro IDE[†], Hiroshi MURASE[†], Takayuki

MIYAHARA^{††}, and Yukimasa TAMATSU^{††}

[†] Graduate School of Information Science, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

^{††} DENSO CORPORATION 1-1 Showa-cho, Kariya-shi, Aichi, 448-8661 Japan

E-mail: †{kmori,ttakahashi,ide,murase}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

Abstract We propose a method of judging fog density using in-vehicle camera and millimeter-wave(mm-W) radar for driving support in foggy conditions. Behind this, there is the growing interest in driving support technologies of recent years. It is known that accident rates in bad weather conditions are about 17 times higher than that in fair ones. Especially under foggy conditions, drivers are not aware, though fog negatively influences human perception. It is the cause of making dangerous situations. From this, a driving support system, such as danger alerts or automatic lighting of fog lamps is expected. Considering these problems, a method of judging fog density by using in-vehicle camera and mm-W radar is proposed in this report. To evaluate fog density, the scattered coefficient in Koschmieder's model is used. This can be calculated from the change of the variance of brightness between the captured vehicle image and a vehicle image captured in a fair condition and the distance to the vehicle. The proposed method classifies the image into three classes of fog density from calculated scattered coefficient. To evaluate the performance of the proposed method, we compare the judgments by the human subjects and the proposed method. From this, a concordance rate achieved 84%.

Key words Weather Recognition, Fog, Visibility, ITS

1. はじめに

近年、自動車の高知能化による予防安全技術が注目を集めている。これまで、事故が起こった際の搭乗者への被害を抑えるための事後安全確保に重点が置かれてきたが、近年では事故を起こさないための事前安全確保への関心が高まっている。事故発生状況の分析によると、悪天候時の事故発生確率は、晴天時の17倍というデータも得られている[1]ことから、悪天候時の運転支援への期待は大きいと考えられる。特に霧に注目すると、徐々に変化する運転状況の中で、視認性が低下していることをドライバが自覚していないことが多く、これが危険な状況を作る原因と考えられる。この裏づけとして、霧状況下での前方車両のテールランプまでの距離は、晴天時のそれと比較し60%遠くを感じる、ということがV. Cavalloらにより報告されている[2]。そこで、本報告では霧の濃さに応じたドライバへの注意喚起、フォグランプの自動制御といった支援システムの実現を目的として、霧の濃さの判定システムを提案する。

図1に示すように、同じ濃さの霧の中でも近くにある車は見えやすいが、遠くにある車は見えにくい。霧の濃さを評価するには画像情報と距離情報を同時に考慮する必要がある。提案手法は、前方車両の画像情報と車間距離情報の関係にKoschmiederのモデル[3]を適用し、霧の濃さを評価する。本研究では、画像情報を取得するために車載カメラを、車間距離情報を取得するためにミリ波レーダを用いる。人間は運転をする際に、逐次変化する交通状況の大部分を視覚により認識しており、車載カメラから得られる映像情報は、そのような視覚情報を良く反映していることから、視認性低下の評価に適した情報であると考えられる。また、天候状況、道路状況による影響を受けにくいミリ波レーダを用いて車間距離情報を計測する。運転支援システムで距離センサとして用いられているものに、ステレオカメラ、ミリ波レーダ、レーザレーダ、超音波センサといったものがある。そのなかでも、ミリ波レーダは、霧や雪のような光の散乱が強い状況でも、他のレーダと比較して安定した測定が可能であることが知られている[4]。このことから、本研究ではミリ波レーダを採用した。

2. 関連研究

視認性低下の認識を目的とした関連研究を紹介する。

最も単純な方法として、光の散乱の強さを測定することで霧の濃さを推定する視程計を車載する手法が考えられる。しかし、これらの致命的な問題として、計測値がドライバの感じる視認性とは異なることが多いということがある。この原因として、視程計が光の散乱を計測する領域が、ドライバの前方視界とは大きく異なっていることが考えられる。霧の濃さにはむらがあり、自車の周囲と前方視界領域で異なっているにも関わらず、計測領域が非常に小さな領域であるため、測定値はその限られた部分を反映するのみであり、ドライバの前方視界中の霧の濃さとは一致しないと考えられる。また、計測した散乱の強さは、走行中に車体表面を流れる気流、反射率の高いガラスや雪壁による副次散乱など設置状況による影響が大きいことが挙げられ

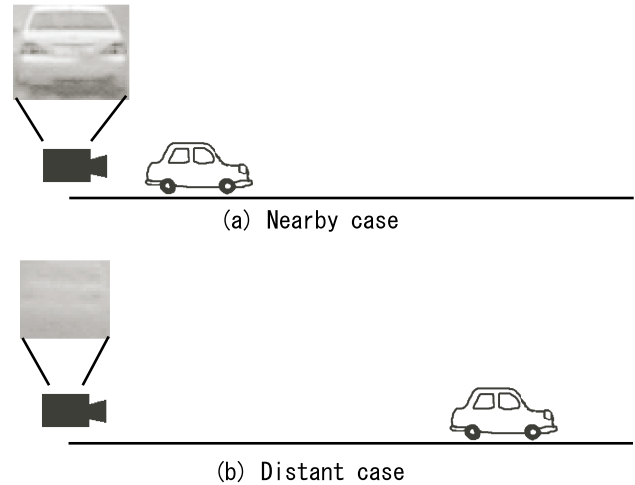


図1 距離による前方車両の見えやすさの変化。

る。これらのことから、視程計を用いて運転中の視認性を推定することは困難であるといえる。

一方、画像特徴を用いて視認性の低下を認識する手法が提案されている。萩原は、人工霧発生施設中で、Landolt環を用いた被験者実験を行い、それから得られたデータをもとに、道路での視認性を評価する手法を提案している[5]。また、Kuwonは認識可能な物体の数、物体の画像中でのコントラスト、画像全体の平均輝度値の関係から計算されるMotorists Relative Visibility (MRV)を提案し、視程距離の推定を試みている[6]。これらの研究は、道路管理を目的とする監視カメラを道路上に設置することを前提としている。本研究では、車載カメラを用いてドライバの視点から霧の濃さを認識することを目的とする。

さらに、車載カメラを用いた視認性の推定に取り組んでいる関連研究もある。Hautiereらは、車載ステレオカメラを用いて視程距離を推定する手法を提案し、晴天時の推定値と霧発生時のそれを比較し、視程距離が短くなることを確認している[7]。また、Leleveらは、フォグランプの自動点灯を目的とし、昼間と夜間に対応した視程推定手法を提案した[8]。しかし、画像情報のみからの推定距離は、カメラ軸と道路表面が平行でないときには誤差を含む。また、複雑な背景中など水平線の検出が困難な場合に正しく動作しないという問題がある。そこで、本研究では、このような周囲の環境や車の姿勢による影響を受けずに距離計測が可能でミリ波レーダで計測した正確な距離情報を用いることで、これらの問題を克服する。

3. Koschmiederの輝度減衰モデル

大気中の光の散乱による、画像中の輝度の減衰をモデル化しているKoschmiederのモデル[3]について説明する。このモデルは

$$L = L_0 e^{-kd} + L_f (1 - e^{-kd}), \quad (1)$$

で表され、 L は観測輝度、 L_0 は散乱がないときの観測対象物体の輝度、 L_f は空の輝度、 k は大気中の散乱係数、 d は観測対象物体までの距離を示す。

このモデルは、散乱係数が大きいときに物体の認識が困難に

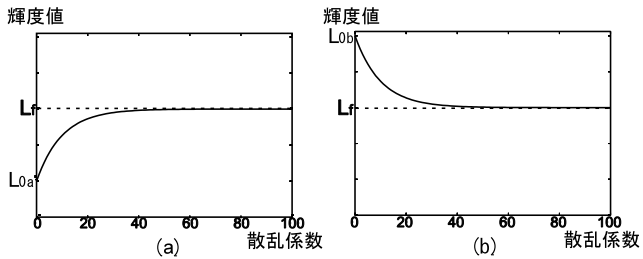


図 2 距離を 0.1 としたときの、散乱係数による輝度の変化。(a) L_0 が L_f より小さい場合 (b) L_0 が L_f より大きい場合。

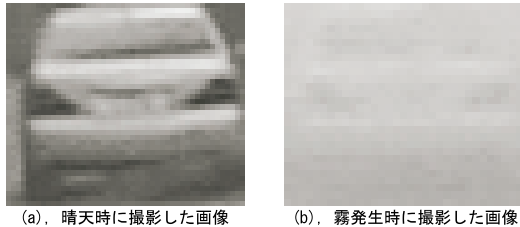


図 3 霧が発生したときの前方車両の見えやすさの変化。

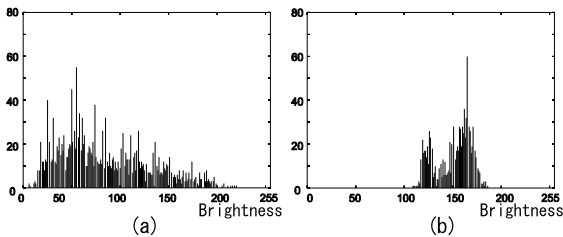


図 4 撮影画像の輝度ヒストグラム ((a), (b) はそれぞれ図 3(a), (b) に対応) 。

なるのは、観測対象物体の輝度値 L が、空の輝度 L_f に近づくことが原因であることを示している。図 2 は、 $d = 0.1$ としたときの散乱係数の大きさによる輝度の変化を示しており、横軸は散乱係数 k 、縦軸は観測輝度 L である。これより、霧が濃くなるにつれ L が L_f に近づいていることが確認できる。

このモデルを用いて、霧が画像に及ぼす以下の 2 つの現象を説明できる。

- 画像のコントラストの低下
- 画像全体が白っぽく見える

実際に撮影した画像を用いて、これを説明する。図 3(a) は晴天時に、図 3(b) は霧発生時に撮影した前方車両画像である。霧が濃くなると、 k の値は大きくなり、 e^{-kd} は 0 に近づくため、式 (1) 中の第 1 項 $L_0 e^{-kd}$ は小さくなる。これにより、画像中の輝度値の分散を小さくし、その結果、画像のコントラストを低下させる。一方、 k が大きくなるにつれて、第 2 項 $L_f(1 - e^{-kd})$ も大きくなる。これは、画像全体の輝度値を大きくするため、画像全体を白っぽくする原因となる。図 4 は図 3(a), (b) についての輝度ヒストグラムを表している。実際にヒストグラムの分散が小さくなり、分布が輝度値の高い方へ移動していることを確認できる。以上のことから、提案手法では、霧の濃さを判定するために画像中の輝度分散の変化に着目した。

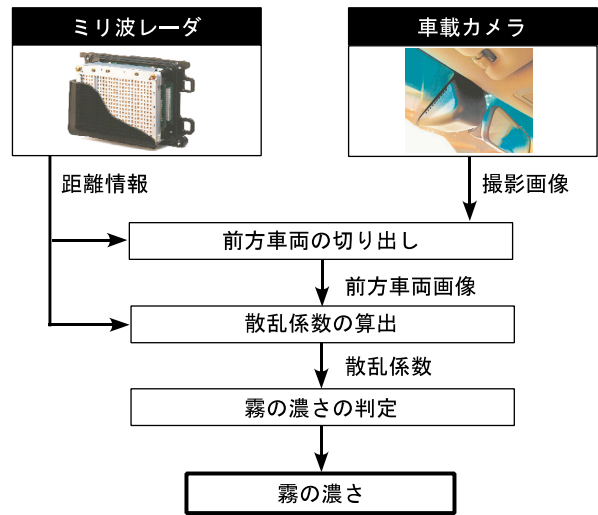


図 5 提案手法のフローチャート。



図 7 実験で被撮影車両として使用した車種。

4. 車載カメラとミリ波レーダを用いた霧の濃さの判定

本章では、提案手法について詳述する。図 5 に手法のフローチャートを示す。提案手法は、前方車両の画像情報と車間距離情報を用いて、光の散乱の強さを計算し、それにより霧の濃さを 3 つの段階に分類する。

前方車両画像の視認性を評価するために、車載カメラの撮影画像から前方車両領域を切り出す。切り出された前方車両画像と、ミリ波レーダから得られる車間距離データから散乱の強さを計算する。ここでは、光の散乱の強さに、3 章で述べた Koshmieder のモデルにおける散乱係数 k を用いた。

散乱係数を計算した後、霧の濃さによって画像を 3 つの段階に分類する。そこで、クラス分類を行うために k に関する閾値を学習する。学習には、被験者実験により作成した評価用データを用いた。

以下では、“前方車両の切り出し”、“散乱係数の算出”、“霧の濃さの判定”の各ステップについて述べる。

4.1 前方車両領域の切り出し

本節では、車載カメラの撮影画像中から、前方車両部分を切り出す方法について述べる。

ミリ波レーダから、障害物の距離と位置の情報が取得可能である。しかし、車の姿勢や道路状況によるずれが発生し、画像中の詳細な位置を特定できるほど精度は高くない。そこで、画像中に探索対象領域を設け、その中で詳細に照合を行うことで前方車両の位置を特定する。

まず、ミリ波レーダから得られる距離情報を用いて探索対象領域の位置、大きさを決定する。ここでは探索対象領域を、最

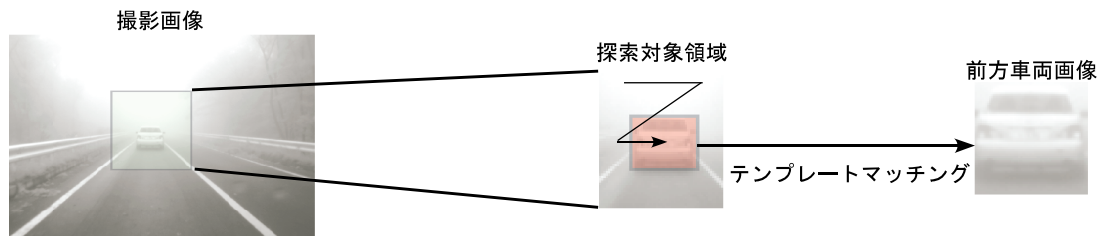


図 6 前方車両画像の切り出し.

も強いミリ波の反射が観測された位置を中心とする、幅 5m、高さ 6m の矩形領域とした。距離情報を用いて、画像中での探索対象領域の大きさを決定する。つぎに、決定した探索対象領域中で部分空間法に基づくテンプレートマッチングを行うことにより前方車両の詳細な切り出しを行う。車両サイズは距離情報から決定する。なお、類似度尺度として内積を用いた。

部分空間の学習には、図 7 に示す異なる車種の 2 台の車両の画像を、それぞれ 221 枚ずつ用いた。ここでは、第 2 固有ベクトルまでをテンプレートとして用いた。切り出し精度調査のため、6,338 枚 (4,082 枚は車種 1、2,256 枚は車種 2 を含む) の撮影画像に対して適用したところ、93.4% の精度が得られた。なお、正誤の判定は目視で行った。

4.2 散乱係数の算出

ここでは、前方車両画像と車間距離データを用いた散乱係数 k の算出方法について述べる。

3 章では、輝度の平均と分散それぞれに霧による変化があることを述べたが、平均値は、カメラの絞りやシャッタ速度などの設定による影響が大きいため、ここでは分散の変化に着目する。散乱係数 k を計算するために、前方車両画像と、前方車両の基準画像の輝度分散の変化を利用する。基準画像は、光の散乱がない時 ($k = 0$) に撮影した、前方車種の画像とする。

まず、撮影した前方車両画像の輝度分散 σ^2 を Koschmieder のモデルを用いて表現すると、

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(L_j - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i \right)^2 \\ &= e^{-2kd} \cdot \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N \left(L_{0j} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_{0i} \right)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで、 N は画像中のピクセル数を示す。一方、基準画像の輝度値 \hat{L} は、散乱係数 $k = 0$ であるので

$$\hat{L} = L_0, \quad (3)$$

となり、基準画像の輝度分散 $\hat{\sigma}^2$ は、

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(L_{0j} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_{0i} \right)^2, \quad (4)$$

となる。すると、式 (2) と式 (4) より、

$$\sigma^2 = e^{-2kd} \hat{\sigma}^2, \quad (5)$$

となる。これより、基準画像が与えられれば、撮影画像の散乱

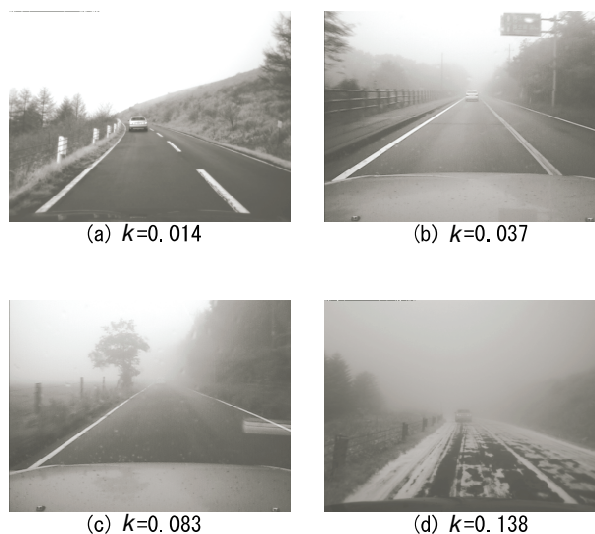


図 8 撮影画像の例と、それから得られる散乱係数。

係数 k を下式により計算することができる。

$$k = -\frac{1}{2d} \log \frac{\sigma^2}{\hat{\sigma}^2}. \quad (6)$$

実際のデータについて、本節で述べた方法で、散乱係数の計算を行った結果を図 8 に示す。 k の値が大きくなるにつれて、霧が濃くなっていることがわかる。

4.3 霧の濃さの判定

本節では、散乱係数 k を用い、霧の濃さを 3 段階に判定する方法を説明する。

霧の濃さを評価するために、しばしば視程が用いられる。そこで、視程と散乱係数の関係を実験から導くことで評価することを考えた。しかし、2 章で述べたとおり、車載視程計による計測値はドライバの視覚と一致しないため正しく評価できない。そこで、本研究では、霧の濃さを表す 3 つの段階を設け、撮影画像をいずれかの段階に判定する。評価に用いる画像の判定に被験者を用いることで、人間の視覚による判定と、どの程度一致しているかを評価する。3 つの段階として、

- Dense : 濃い霧が出ている
- Moderate : 霧が出ている
- Light : 薄い霧が出ている・または出ていない

を定義した。

なお、散乱係数 k の値について、“Dense” と “Moderate”、“Moderate” と “Light” の間に閾値を設けることで、霧の濃さの判定を行う。

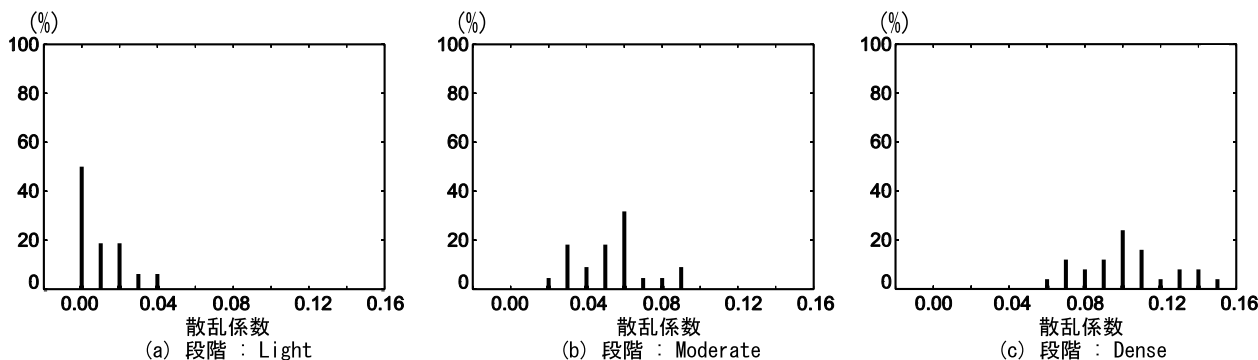


図 9 霧の濃さの段階別にみた評価データセットから計算した散乱係数の分布。

表 1 車載カメラ (デンソー) の仕様。

Parameters	Values
Resolution	640 × 480 pixels
Frame rate	10 frame/second
Scan mode	Interlace
Color	Grayscale
Number of tones	256

表 2 ミリ波レーダ (デンソー) の仕様。

Parameters	Values
Relative velocity	-200 to 100 km/h
Azimuth angle range	-10° to 10°
Processing cycle time	100 ms
Operating frequency	76 to 77 GHz
Modulation principle	FM-CW
Azimuth detection method	Electronic scanning
Range accuracy	3 %
Range resolution	1.5 m
Azimuth accuracy	0.5°
Azimuth resolution	5°

5. 評価実験

提案手法の性能を評価するために、人間の主観による判定との比較実験を行った。本章では、実験のためのデータ収集、学習・評価データの作成、評価実験について述べる。

5.1 データ収集

車載カメラとミリ波レーダを搭載した車両を撮影用車両として準備した。これらの2つのセンサは、既に一般車両に搭載されているものを用いた。この撮影車両と、被撮影車両として、図7に示す異なる種類の2台の車を用意し、晴天時と霧発生時に走行して撮影した。撮影中は撮影車両の前方に被撮影車両が前方車両として走行した。なお、ミリ波レーダからは前方車両までの距離と相対速度の2種類の情報を取得できる。

表1と表2に撮影に使用した車載カメラとミリ波レーダの仕様を記す。ミリ波レーダの詳細については [9] に譲る。

5.2 学習・評価用データの作成

霧の濃さの判定のために、散乱係数に関する閾値を学習する必要がある。閾値は、学習データから得られる散乱係数を探索し、誤分類データを最小にする値を選択する。ただし、これを

表 3 提案手法による判定と人間の主観による判定との比較。

		提案手法による判定		
		Light	Moderate	Dense
被験者による判定	Light	14 (88%)	2 (12%)	0 (0%)
	Moderate	2 (9%)	16 (73%)	4 (18%)
	Dense	0 (0%)	2 (8%)	23 (92%)

満たす値のうち、誤分類データからの距離の和を最小にする値を採用する。

この学習を行うために、各撮影画像を、いずれの霧の濃さのクラスの学習データとするのが適切かを被験者実験により決定した。この被験者実験について述べる。まず、撮影画像群より100枚の画像を重複なく選択した。ここで、画像中に前方車両を含み、かつ、その前方車両を正しく切り出せたものを選んだ。前方車両は、前節で述べた2台の車両のうちいずれかである。これを10枚で1セットとして、10セット用意した。

これらのデータセットを用いて、被験者実験を行った。自動車免許を保持する被験者13名が参加し、各被験者が各セットについて以下の2つの操作を行い、それを10セット繰り返した。

- 10枚の画像を霧が濃い順に並び替える
- 並び替えた10枚の画像を、“Dense”、“Moderate”、“Light”の3クラスに分類する

ここで、1つのクラスに分類した被験者の数が10に満たない画像は、人間の感覚でも分類が難しいものと考え、学習データから除外した。その結果、用意した100枚の画像のうち、63枚が残った。

5.3 評価実験

提案手法の性能を評価するために、提案手法による判定と、被験者による判定について比較実験を行った。検証はleave-one-out法で行った。図9は、各クラスにおける散乱係数の分布を示している。散乱係数の算出に必要な基準画像は、評価用データ中で最も大きい輝度分散を持つ画像を用いて近似した。

表3に比較実験の結果を、コンフュージョンマトリックス形式で示す。括弧内は各行における割合を示す。表中の対角要素は各段階における一致率をあらわす。全体の一致率は84%となった。

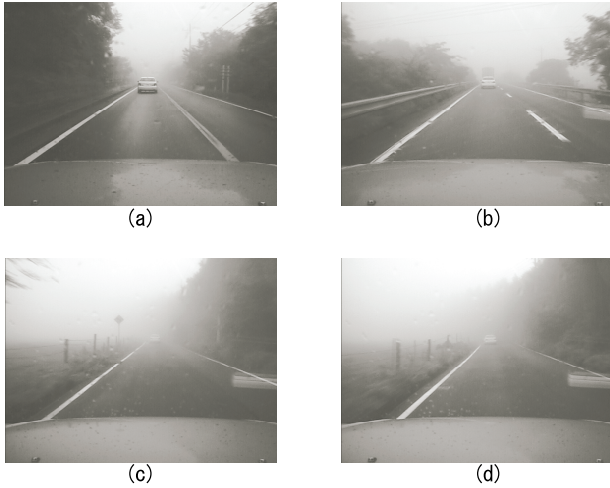


図 10 誤分類例：(a)(b) は Moderate を Light に，(c)(d) は Dense を Moderate と誤分類．

6. 考 察

6.1 評価実験結果について

人間の知覚との比較実験から，車種の違いによる影響を受けず，概ね良好な一致率が得られた．また，“Light”と“Dense”を誤るような，致命的な誤分類は生じなかった．

誤分類されたデータについて考察する．図 10 の (a)，(b) は，人間の判定が“Moderate”であるのに対し，手法が“Light”を，(c)，(d) は，人間の判定が“Dense”であるのに対し，手法が“Moderate”を判定している事例である．いずれの場合も，撮影領域中で霧が局所的に発生しており，自車両から前方車両までの間が薄い霧となっていることが原因と考えられる．例えば，図 10 の (a) に注目すると，画像中の手前では霧が出ていないが，画像中の奥（遠方）の領域では霧が濃くなっている．このような状況は，一時的なものであると考えられるため，時系列情報を利用することで抑制できると考えている．

6.2 基準画像について

散乱係数を計算するためには，4.3 節で述べたとおり，散乱がない ($k = 0$) 条件で撮影した基準画像が必要である．本実験では，評価データセット中で最も大きい輝度分散値を持つ画像を基準画像として用いた．しかし，実環境での利用を想定した場合，他の方法で取得する必要がある．基準画像を取得するために 2 つのアプローチが考えられる．

(1) 走行中に撮影した前方車両画像中で最も輝度分散が高いものを，基準画像として逐次更新する

(2) 車車間通信技術を用いて，基準画像を受信する
アプローチ (1) については，走りをはじめから霧が濃い状態である場合に誤りが起こるが，処理が単純で適用しやすい方法である．アプローチ (2) については，現在，車車間通信技術についての研究がさかに行われており，映像データを後続車両に通信することも研究されている [10]．このことから，今後，この技術を利用して基準画像を受信することも可能になると予想される．

7. む す び

本研究では，車載カメラとミリ波レーダを用いた霧の濃さの判定手法を提案した．提案手法は，前方車両の輝度分散値の変化と車間距離情報から，Koshmieder のモデルで用いられている散乱係数を算出し，それに基づき霧の濃さの判定を行う．

評価実験では，実際に走行中に収集したデータセットを用い，人間の主観による判定と手法による判定を比較したところ 84% の高い一致率を得た．これにより，人間の知覚を反映した判定ができていると考える．ただし，提案手法は，前方車両走行中にのみ有効であり，前方車両が存在しない場合について，今後考慮する必要がある．

今後の課題として，前方車両が存在しない場合についての手法の検討と，切り出し，評価実験について，車種を増やして行うことが考えられる．特に，本論文の実験で用いた車種はホワイトとシルバーの 2 種類であったため，グレースケール画像中では，似通った輝度，形状情報となる．今後は，ブラック・グレー・レッドといった輝度情報の異なる車種や，形状の異なる車種について，評価する必要がある．

謝 辞

日頃より熱心に御討論頂く名古屋大学村瀬・末永両研究室諸氏に心より感謝する．また，本論文では，画像処理に MIST ライブラリ (<http://mist.suenaga.m.is.nagoya-u.ac.jp/>) を使用した．

文 献

- [1] 静岡県土木部 道路事故防止対策研究会，“道路事故防止対策研究会・報告”，<http://doboku.pref.shizuoka.jp/Topics/douro/ziko/report01.html>.
- [2] V. Cavallo, M. Colomb and J. Dore, “Distance Perception of Vehicle Rear Light in Fog,” *Human Factors*, vol. 43, pp. 442-451, Fall 2001.
- [3] W. Middleton, “Vision through the Atmosphere,” University of Toronto Press, 1952.
- [4] 實吉 敬二，“ステレオカメラによる前方監視システム,” 画像ラボ, pp. 21-26, June 2006.
- [5] 萩原 亨，“道路交通環境の視認性—日中の霧発生時におけるデジタル画像を用いた視認性評価手法について—,” 信学技報, PRMU 2004-31, June 2004.
- [6] T. M. Kuwon, “Atmospheric Visibility Measurements using Video Cameras: Relative Visibility,” Tech. Rep., Center for Transportation Studies (CTS) at University of Minnesota, no. CTS 04-03, July 2004.
- [7] N. Hautiere, R. Labayrade and D. Aubert, “Detection of Visibility Conditions through use of Onboard Cameras,” *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2005*, pp. 151-160, June 2005.
- [8] J. Leleve and J. Rebut, “Fog Lamp Automation with Visibility Sensor,” *Proc. International Conference on Gears*, VDI Berichte, no. 1907, pp. 151-160, September 2005.
- [9] 水野 広，富岡 範之，川久保 淳史，川崎 智哉，“前方障害物検出用ミリ波レーダ,” *DENSO テクニカルレビュー*, vol. 9, no. 2, pp. 83-87, May 2004.
- [10] 加藤 晋，津川 定之，浜口 雅春，徳田 清仁，“車車間通信による動画像伝送の応用,” 2005 年信学総大, A-17-19, March 2004.