

特集 運転支援のための車載カメラ映像による状況別 降雨認識*

Rainfall Recognition for Various Conditions Using an In-vehicle Camera Image for Driver Assistance

宮原孝行 Takayuki MIYAHARA	玉津幸政 Yukimasa TAMATSU	栗畑博幸 Hiroyuki KURIHATA	高橋友和 Tomokazu TAKAHASHI
目加田慶人 Yoshito MEKADA	井手一郎 Ichiro IDE	村瀬 洋 Hiroshi MURASE	

In this paper, we propose a rainfall recognition method for various conditions based on in-vehicle camera images from which characteristics specific to rain are extracted. This driver assistance system uses an in-vehicle camera to try and recognize different weather conditions, in particular rainfall in various conditions. Rainfall is recognized by detecting changes in image features caused by raindrops on the windshield, and uses different methods for daytime and nighttime recognition.

Key words: ITS, In-vehicle camera, Rainfall recognition, Raindrop detection, Subspace method

1. 背景

近年、車載カメラを用いた運転支援技術の開発が活発に行われている。¹⁾²⁾ その理由として前方を撮影する車載カメラから得られる画像（空間の輝度分布を数値化したもの）は運転者の視覚映像に最も近いものであることが挙げられる。運転者が車両を操作する場合、車外環境を認知するための情報として視覚情報に8~9割頼っているとされている。つまり車載カメラによって得られた映像から画像認識技術により車外環境を正確に把握することは運転者の負荷を軽減し、交通安全に寄与しようとする運転支援分野への有効なアプローチと考えられる。

既に世の中には前方監視カメラを用いた運転支援装置として、白線等の走行区画線を認識し車線維持操舵制御を行うレーンキープアシスト、走行路からの逸脱を警告する車線逸脱警報、先行車を認識し自車両との車間制御を行い追従走行するACC（Adaptive Cruise Control）、夜間の視界拡大を狙ったナイトビジョン等が存在している。

運転支援を念頭におき、車外環境認識を考えると自車両と周辺障害物との相対位置、相対速度、周辺の交通状況、信号機、道路標識等様々な認識対象物が考えられるがその一つとして、天候も上げることができる。車両走行時の天候の良し悪しが車両運行に与える影響は大きく、特に悪天候下での運転操作は運転者に過度の負荷を強いるものであり、車両側の運転支援装置でその負荷を軽減することができれば運転者にとっては

非常にありがたい装備となることが容易に想像できる。すなわち今回取り上げた天候認識技術は運転支援の観点から見ると極めて重要な技術分野と考えられる。

今回は画像認識技術の応用として降雨状態を検出することを目標とした。降雨状態を認識することによる運転支援方法としては、直接的にはワイパの自動化が考えられる。現在、市場に投入されているオートワイパ用のレインセンサはフロントガラスの一部の領域に対して、ガラス面に雨滴が付着したこと検出する装置で有り、運転者の視界に対応する領域のフロントガラスに付着した雨滴を検出できていない。そのため、先行車、対向車等による水の巻き上げにより運転者の視界が不良となった場合などでレインセンサの検出対象領域に水滴が付着していないとき、オートワイパがうまく機能しない場合が存在する。今回のアプローチでは車載カメラで広範囲にフロントガラスを撮影した映像から降雨状態を検出することで、ドライバの視界に対応する領域の雨滴検出可能となる。

また、将来的には天候が分かることにより路面 μ 等の推定が可能となれば、車両足回り制御などの車両運動制御への応用も期待できる。

2. 車載カメラによる雨天認識

昼間、人間が運転中に降雨を認識する理由としてフロントガラスに付着した雨滴の影響による視界状況の悪化が挙げられる。昼間の映像は明るくフロントガラス上の雨滴を視認することができる（Fig. 1）。形状と

*2007年2月23日 原稿受理

しては概ね円形状をしており、雨滴自体は透明であるが、光の屈折等により背景が映りこむため、視認することができる。映りこむ背景は多種多様であるため、雨滴の見え方も様々であるが、概して雨滴の上部が黒っぽく下部が白っぽいという特徴を有する。

我々はこれまで部分空間法を用いて画像中から雨滴をテンプレートマッチングにより検出し、検出結果から降雨を判定する手法を提案してきた。³⁾ この手法は雨滴の検出対象領域を平坦領域、特に空領域に絞り込むことで、Fig. 2のような複雑なパターンを持つ背景に起因する誤検出を未然に抑制することで検出精度を高めた。しかしながら高層建築物が密集した市街地等、画像内に占める空領域の割合が小さい場合には効果を発揮しないという欠点がある。そこで本報告では時系列情報を用いた入力画像全体からの雨滴検出を目指す。

昼間とは対照的に夜間の映像は暗く、光源及び光源が照らし出す物体以外はほとんど何も見えない (Fig. 3)。フロントガラス上の雨滴も光源領域付近以外では視認することも難しい。夜間の雨天映像はフロントガラス上の雨滴による光の屈折が特徴的であることか

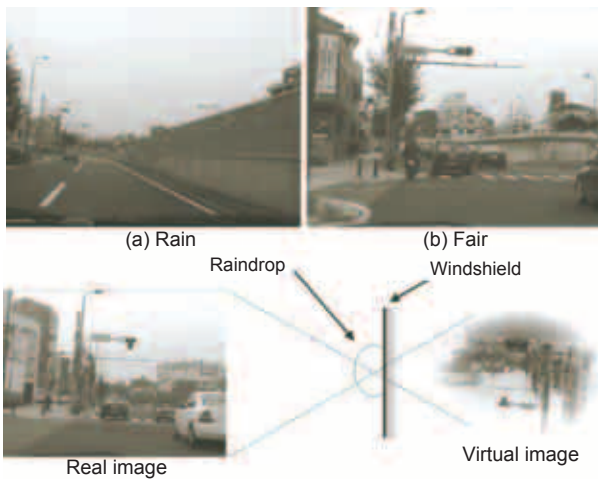


Fig. 1 昼間の車載カメラ映像と画像特徴

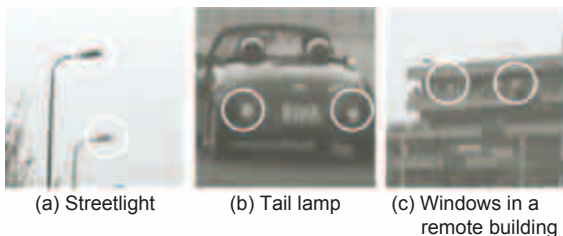


Fig. 2 雨滴に類似する画像特徴を持つ物体

ら、光の領域に着目する。晴天時は光源がほぼそのままの形状で視認できる。しかし雨天時は、これらの光源がフロントガラス上の雨滴により屈折することによって、光源の直接光が結像した大きい光の周りに光源の屈折光が結像した小さい光が数多く分布するように見える。言い換えれば、光源自体の光の周辺に屈折光が結像した光が多数分布することになる。この性質を画像特徴として認識することができれば、夜間の降雨認識に可能であると考えられる。

そこで本報告では車載カメラの映像から雨天時に現れる画像特徴を抽出し、それを用いた降雨認識手法を提案する。降雨認識の対象として昼間と夜間の二つの状況を想定した。以下、3章にて昼間の雨天認識を、4章で夜間の雨天認識を記す。そして5章にてまとめる構成となっている。

3. 昼間: 部分空間法による雨滴検出からの降雨認識

3.1 アルゴリズム

本手法の一連の処理の流れはFig. 4のようになる。まず始めに本手法の基本となる固有雨滴 (Eigendrop) を用いた雨滴検出手法について述べる。次に雨滴検出の精度向上を目的とした入力画像のフレーム平均化、及び雨滴候補領域のフレーム間照合について詳しく述べる。



Fig. 3 夜間の車載カメラ映像と画像特徴:
(上) 晴天 (下) 雨天

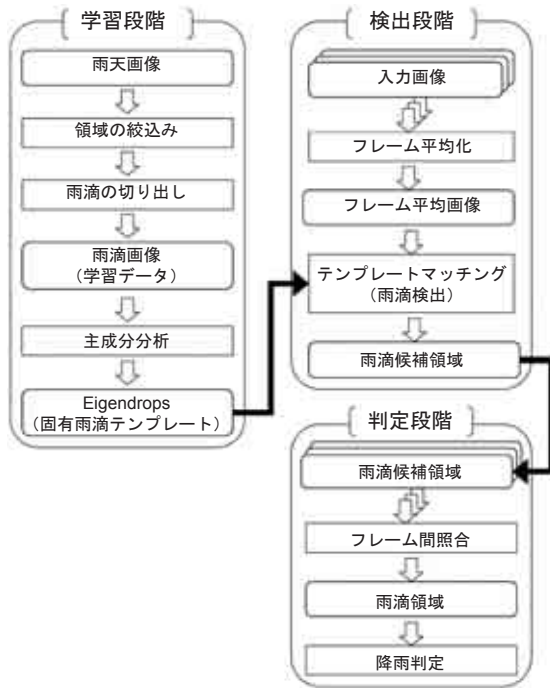


Fig. 4 昼間の降雨認識手法

3.1.1 Eigendropを用いた雨滴検出

(1) 学習段階

まず学習画像として、雨天画像から人手にて雨滴に外接する矩形領域を切り出す。このとき安定した画像特徴を得るために空領域から雨滴を切り出す。これを雨滴画像とし、 K 枚用意する。次に雨滴画像を幅 W 、高さ H の大きさに正規化し、各画素の輝度値を要素とする1次元のベクトルとみなす。このベクトルを平均値0、分散1の単位ベクトルに正規化したものを $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})^T$ とする。ここで $N = W \times H$ である。 K 枚の学習画像から行列 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_K]$ を作成し、 \mathbf{X} の自己相関行列 $\mathbf{Q} = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$ を求める。この \mathbf{Q} の固有値を大きい順に R 個求め、それらに対応する固有ベクトル $\{e_1, e_2, \dots, e_R\}$ を求める。これらを基底として張られる部分空間を雨滴テンプレートとする。

(2) 検出段階

次に入力画像から雨滴をどのように検出するかを説明する。まず連続複数フレームの入力画像からフレーム平均画像を作成する。そしてフレーム平均画像中のあるサイズ $W \times H$ の矩形領域に着目する。これを1次元ベクトルと見なし、正規化処理を施すことで画像ベクトル \mathbf{a} を作成する。そして雨滴テンプレートとの類似度 $S(\mathbf{a})$ を以下の式で計算する。

$$S(\mathbf{a}) = \sum_{r=1}^R (\mathbf{a}, \mathbf{e}_r) \quad ((\mathbf{x}, \mathbf{y}) \text{ はベクトルの内積})$$

$S(\mathbf{a})$ があるしきい値以上ならば、その領域を雨滴候補領域と検出する。着目する矩形領域をずらしながら雨滴テンプレートとの類似度を求めることで雨滴候補領域を検出する。

(3) 判定段階

上記の処理によって検出された雨滴の数を用いて降雨判定処理を行う。まず検出雨滴候補領域をフレーム間照合することで雨滴領域を得る。検出雨滴領域数があるしきい値以上ならば降雨あり、未滿ならばなしと判定する。

3.1.2 入力画像のフレーム平均化

前項で述べられた雨滴検出手法では複雑な背景パターンの影響により雨滴以外の領域を雨滴として誤検出する危険性がある。そこで入力画像を連続フレームで平均化することで複雑な背景パターンをぼかし、雨滴を強調することで雨滴検出の精度向上を目指す。フロントガラスに付着した雨滴の位置は、車載カメラから見て相対的に不動であるのに対し、走行中は車外の景色は相対的に変動する。そのため目視が困難な雨滴でも、走行中は背景の変動により視認することができる。

このことから背景の影響により単一フレームから検出が困難な雨滴に対し、画像の時系列変化に着目することで検出精度の向上を図る。これにより画像全体から精度良い雨滴検出が期待される。

3.1.3 雨滴候補領域のフレーム間照合

上記のとおり、カメラから見たフロントガラスに付着した雨滴の位置は変化しない。雨滴の位置が不動ならば、正しく検出された雨滴は次のフレームにおいても同じ位置に検出され、逆に複雑な背景パターンの影響による誤検出の位置は変動するはずである。そこで判定段階にて、フレームごとの雨滴検出結果を連続フレーム間で照合することで誤検出を減らし、雨滴検出精度を高められると考えられる。連続複数フレーム間で同じ位置の検出雨滴候補領域を調べ、それらの論理積を雨滴領域の有無とする。

3.2 実験方法

実験に使用した映像は、市販のデジタルビデオカメラを車内に固定して撮影した。フレームレート 30fps、画像サイズ 640 × 480 pixel の映像をグレースケールのビットマップ画像としてキャプチャし、これ

を実験に用いた。

学習用画像から雨滴テンプレートを作成し、入力映像の各フレームから雨滴を検出する実験を行った。雨滴検出の再現率及び適合率を求め、検出精度の指標とした。学習段階では、500枚の雨滴画像から雨滴テンプレートを作成した。検出段階でのずらし照合では、1画素ずつずらしながら照合した。

雨滴の検出結果を用いた入力画像の降雨判定に関する実験では、まずランダムに選んだ晴天と雨天の画像を各100枚用意し、次に雨滴の検出数に対して降雨判定に関するしきい値を定めた。そして晴天画像を晴天と、雨天画像を雨天と正しく判定した画像枚数を数え、正解率を求めた。

3.3 実験結果

切り出した雨滴画像、及びそれらを用いて作成した雨滴テンプレートをFig. 5に示す。このときの部分空間の次元数は6とした。

実験条件別の雨滴検出結果をFig. 6に、それらの再現率・適合率をFig. 7に示す。再現率と適合率はそれぞれ検出漏れと誤検出の程度を表す指標であり、どちらも検出が良好であるほど1.0に近づく。雨滴検出結果をフレーム照合する際にフレーム数を増やすほど検出精度が高まるのが分かった。一方、フレーム平均を求めるのに用いるフレーム数と検出精度との間に比例関係は見られなかった。

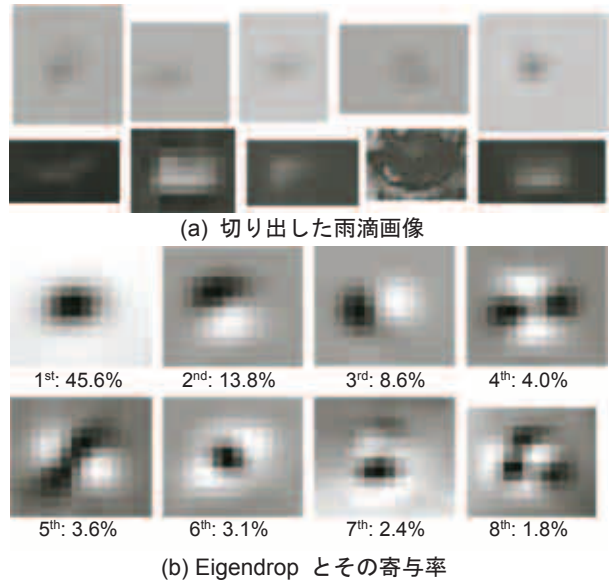


Fig. 5 雨滴画像と固有雨滴 (Eigendrops)

3.4 考察

フレーム平均の際に用いるフレーム数を見ると1フレームと5フレーム平均、10フレーム平均とを比較した場合、5フレーム平均、10フレーム平均ともに適合率、再現率は上昇している。但し5フレーム平均と10フレーム平均の検出結果を比較して見ると適合率に関しては10フレーム平均処理の方が良く、逆に再現率に関しては5フレーム平均処理の方が良いという結果を示している (Fig. 7a)。ROC曲線として検出結果のグラフを見る限りは5フレーム平均処理より10フレーム

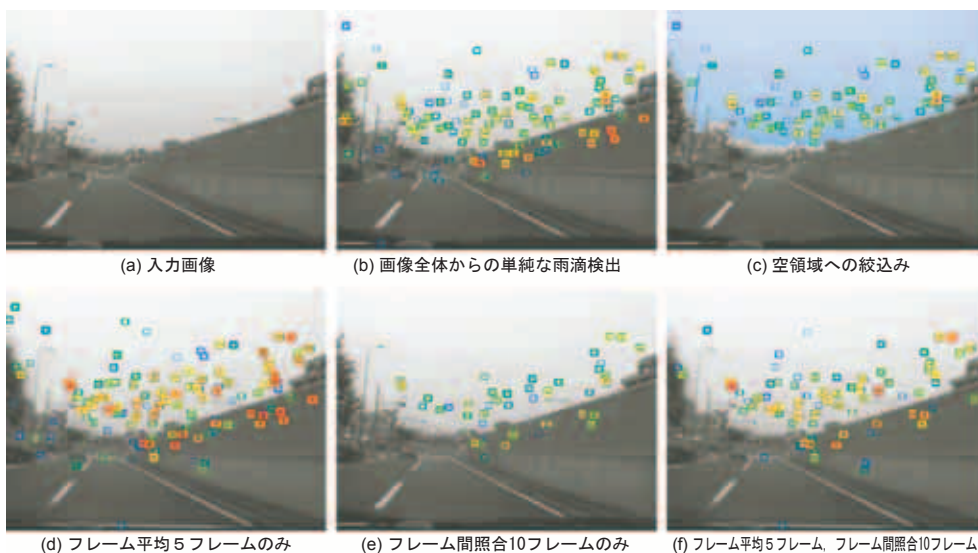
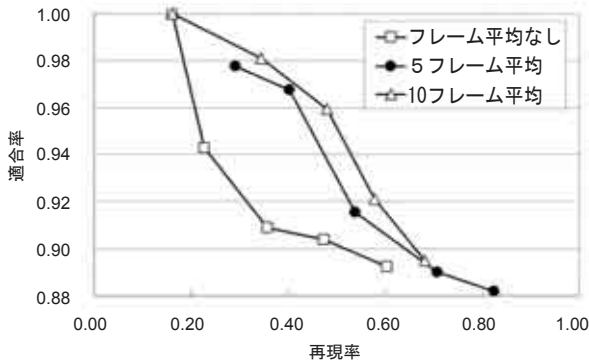
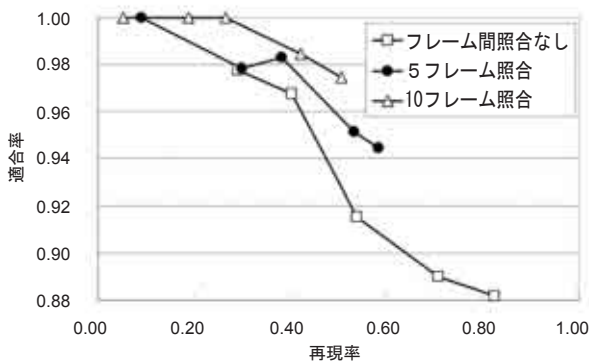


Fig. 6 昼間の雨滴検出結果



(a) 入力画像のフレーム平均化



(b) 雨滴検出結果のフレーム間照合 (フレーム平均5フレーム時)

Fig. 7 雨滴検出結果の精度: 正解雨滴領域数を A, 検出雨滴領域数を B とすると, 再現率 = (A ∩ B) / B, 適合率 = (A ∩ B) / A となる.

平均処理の方が若干ではあるが検出器としての能力は高いように見えるものの顕著な差は見られない.

原因として考えられることは雨滴自体の画像が変化する雨の降り始めなどでは雨滴画像自体も平均化されるため, 平均するフレーム数が多い場合には検出能力を低下させる方向へ働いたためと考えられる. ただ今回の結果から見て, 単フレーム処理よりも数フレームの平均化処理を導入することは検出能力の向上を導くことは言える.

一方, フレーム間照合フレーム数の違いによる検出能力の差を見ると照合フレーム数を 1 から 5, 10 へ変化させると適合率は順次上昇し, 再現率は下降するという傾向が見られる (Fig. 7b). 特に照合フレーム数 10 フレームの場合, 適合率に関しては顕著な検出能力の向上が見える. 適合率が 1.0 に限り無く近いということは検出対象領域に存在する雨滴をほぼ見落とし無く検出していることを示しており, 雨の降り始めの検出に関して有効な検出器となっているということである. アプリケーションとしてワイパの自動化を考えた

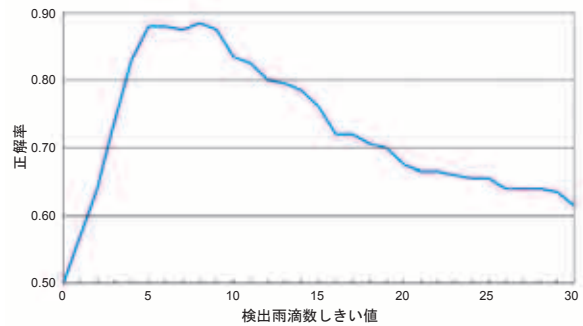


Fig. 8 雨滴検出数のしきい値を変化させたときの降雨判定成功率(空領域からの検出結果, 類似度しきい値0.70): 各100枚の晴・雨入力画像から検出雨滴数を用いて降雨を判定した.

場合, フレーム間照合による雨滴検出は検出能力の向上に有効な手法であることが確認できた. 照合フレーム数を増やすことで雨滴検出能力が向上するとはいえ, フレーム数の増大は, フレーム平均の場合と同様に検出時間の増加につながるため, 5~10フレーム 0.2~0.3秒が適当と考えられる.

本実験ではフレーム平均数 5 フレーム, フレーム間照合数 10 フレームの時に最も良い結果であった. 類似度しきい値が 0.70 のとき適合率 0.97, 再現率 0.51 となり, 検出対象領域を空領域に絞り込んだ場合(適合率 0.97, 再現率 0.59)と比較して遜色ない結果となった. 空領域からの雨滴検出結果による降雨判定が 89% を示すことから (Fig. 8), 本手法も降雨の判定が可能だと言える.

4. 夜間: 光の屈折の定量化による降雨認識

夜間画像中に現れる光領域では輝度値が高くなると考え, 画素数が多い領域を光源領域, 少ない領域を屈折光領域として検出することができる. しかし, この場合は遠方に存在する光源や元々小さな光源等を屈折光領域として誤検出する恐れがある. 降雨の際, 光源領域の周辺に屈折光領域が多数分布することから, 光源領域周辺の屈折光領域に注目することによりこの問題を解決する.

本報告では, 画像全体から小さな光領域数 A と光源領域周辺の小さな光領域数 = 屈折光領域数 B を数え, B/A を分布特徴量とする. この値は画像中の小さな光領域がどの程度光源領域周辺に分布しているかを示す. 値が 1.0 に近づくほど光源領域周辺に密集する屈折光領域が多いことを表し, 分布特徴量があるし

きい値以上ならば降雨と判定する。

以下の処理により光の屈折の定量化を行う。まず夜間の画像に対し、適当な輝度しきい値を用いて二値化処理を施し、光領域を抽出する。次にラベリング処理を行い、各ラベル領域の面積を計算する。適当な面積しきい値を設け、そのしきい値より面積が大きい領域を光源領域、小さい領域を屈折光領域とする。そして全屈折光領域数及び光源領域周辺に存在する屈折光領域を数え、分布特徴量を求める。最後に、分布特徴量により降雨を判定する。

4.1 実験方法

光の屈折の定量化に関する実験では光源領域の面積しきい値を200、屈折光領域の面積しきい値を80とした。光源領域周辺の定義として、抽出した光源領域の上下左右の端点を求め、その周囲を30画素拡張した矩形領域内とした。無作為に選んだ晴天と雨天の画像を各50枚用意し、分布特徴量に対して降雨判定に関するしきい値を定め、晴を晴と、雨を雨と正しく判定できた画像枚数を数え、降雨の判定性能を評価した (Fig. 9)。

4.2 実験結果

降雨時は光源領域周辺に多数の屈折光領域が分布していることを確認できた。降雨判定結果をFig. 10に示す。このうち分布特徴量のしきい値が0.50のとき、降雨判定成功率は最高値の83%という結果となった。

4.3 考察

降雨の有無で屈折光領域の分布特徴に顕著な違いが現れることを確認できた。本手法の特徴量はフロントガラスに雨滴が付着していても、光源の少ない場所ではその特徴が顕著に現れにくい。また適当な光源が存在する場所であっても、フロントガラスに付着する雨滴の量が少ない場合は同じように特徴が現れにくい。つまり本特徴量はフロントガラスに付着した雨滴数と映像内の光源数に強く依存する性質を持っているが、結果から見えるように、多少の交通量、電飾、街灯などの光源が存在する場所では良好な降雨判定が期待される。

また、今回の実験では分布特徴量のしきい値が0.50で最も降雨判定成功率が高い結果となっている。このしきい値0.50が、評価シーンのバラツキに依存するのか、あるいは映像内の光源数に依存するのか、あるいはフロントガラスの雨滴数に依存しているのかを今後

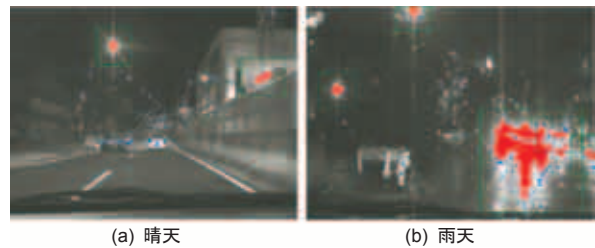


Fig. 9 夜間の光領域検出結果

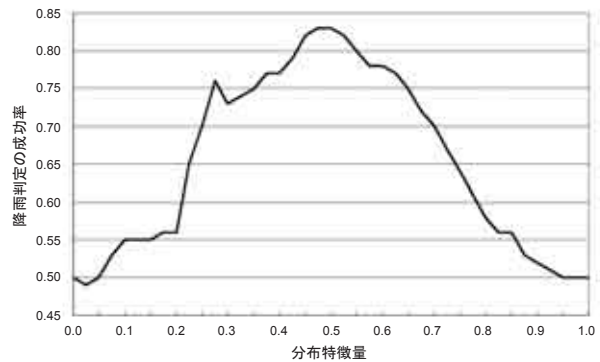


Fig. 10 夜間映像を用いた雨滴検出数のしきい値を変化させたときの降雨判定成功率: 晴天・雨天各50枚の入力画像に対する分布類似度を用いて降雨を判定した。

探求する必要があると思われる。例えば上記因果関係が明確になり映像から判断できれば、シーンに応じて動的に分布特徴量を変化させることで判定成功率の更なる向上が期待できるからである。

降雨判定成功率が最高で83%と良好な結果となり、降雨の判定可能性を示すことができた。本報告では分布特徴量を画像全体及び光源周辺の小さな光領域の比率という単純な方法で求めたが、光源の形状特徴等を用いた、効果的な特徴量を考案すること、また上記で述べた判定方法の改良が今後の課題である。

5. まとめ

本稿では昼間と夜間という走行状況の違いによる降雨認識手法を提案した。昼間の場合、部分空間法を用いて車載カメラ映像からフロントガラス上の雨滴を検出することにより、走行時の降雨を認識する手法を提案した。入力画像をフレーム平均化することで画像全体からの雨滴検出を可能とし、雨滴検出結果のフレーム間照合と組み合わせることで高精度に雨滴を検出できた。夜間の場合、屈折光領域の分布特徴を定量化し、走行時の降雨を認識する手法を提案した。実験の結果、

降雨の有無で屈折光分布の違いを確認でき、降雨判定の可能性を示せた。昼夜共に本手法の有効性を確認できた。

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深く感謝する。

<参考文献>

- 1) 望月 大介, 矢野 良和, 橋山 智訓, 大熊 繁, “車載カメラによる歩行者検出のための背景除去及びアクティブ探索を用いたテンプレートマッチングの高速化”, 信学論(D-II), Vol. J87-D-II, No. 5, pp. 1094-1103 (March 2004).
- 2) M. Koyamaishi, H. Sakai, T. Fujii and M. Tanimoto, “Acquisition of position and direction of in-vehicle camera for HIR System”, Proc.IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2004 (June 2004), pp. 848-853.
- 3) 栗畑 博幸, 高橋 友和, 目加田 慶人, 井手 一郎, 村瀬 洋, 玉津 幸政, 宮原 孝行, “車載カメラを用いたフロントガラス上の雨滴検出による晴雨判定”, 画像の認識・理解シンポジウム 2005 (July 2005).
- 4) S. G. Narasimhan and S. K. Nayar, “Contrast Restoration of Weather Degraded Images”, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, No.6 (June 2003), pp. 713-723.
- 5) 萩原 亨, “道路交通環境の視認性 一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) 村瀬 洋, シュリー ナイヤー, “2次元照合による3次元物体認識 -パラメトリック固有空間法-”, 信学論(D-II), Vol. J77-D-II, No. 11 (November 1994), pp. 2179-2187.
- 7) P. N. Belhumeur, J. P. Hespanha, and D. J. Kriegman, “Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition using Class Specific Linear Projection”, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 19, No. 7 (July 1997), pp. 711-720.
- 8) P. Watta, Y. Hou, S. Lakshmanan, and N. Natarajan, “Improving Driver Pose Estimation,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2002 (June 2002), pp. 310-315.
- 9) 田村秀行, “コンピュータ画像処理”, オーム社 (2003).
- 10) 谷口慶治, “画像処理工学 基礎編”, 共立出版株式会社 (2000).
- 11) 南敏, 中村納, “画像工学(増補) -画像のエレクトロニクス-”, コロナ社 (2001).
- 12) 石井健一郎, 上田修功, 前田英作, 村瀬洋, “わかりやすいパターン認識”, オーム社 (2002).
- 13) 布施孝志, 清水英範, 堤盛人 “オプティカルフロー推定における光学勾配法の比較分析”, 測量, Vol. 50, No.11 (2000), pp. 21-22.
- 14) 大槻智洋, 田野倉保雄, “クルマで瞬き始める電子の「眼」” NIKKEI ELECTRONICS (2003.8.4), pp. 57-68.
- 15) Richard O. Duda, Peter E. Hart, David G. Stock, “Pattern Classification”

<著 者>



宮原 孝行
(みやはら たかゆき)
システム開発部
画像処理・認識技術の研究・開発
に従事



玉津 幸政
(たまつ ゆきまさ)
システム開発部
画像処理・認識技術の研究・開発
に従事



栗畑 博幸
(くりはた ひろゆき)
名古屋大学大学院情報科学研究科
修士
現日本アイ・ピー・エム株式会社
車載カメラ映像を用いた天候認識
の研究に従事



高橋 友和
(たかはし ともかず)
名古屋大学大学院情報科学研究科
日本学術振興会特別研究員
工学博士
3次元物体認識，3次元画像処理
の研究に従事



目加田 慶人
(めかだ よしと)
中京大学生命システム工学部教授
博士 (工学)
パターン認識，医用画像処理の
研究に従事



井手 一郎
(いで いちろう)
名古屋大学大学院情報科学研究科
准教授
博士 (工学)
統合メディア処理，映像検索の
研究に従事



村瀬 洋
(むらせ ひろし)
名古屋大学大学院情報科学研究科
教授
工学博士
画像認識，映像処理の研究に従事