

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

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^{††}

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

^{††} デンソー 〒448-8661 愛知県刈谷市昭和町 1-1

E-mail: †hkuri@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本稿では、車載カメラ映像からフロントガラス上の雨滴を部分空間法を用いて検出し、走行中の天候を判定する手法を提案する。学習段階にて雨滴画像から抽出した主成分を雨滴テンプレートとし、これを用いて雨滴を検出する。実映像を用いた実験により、本手法が雨滴を良好に検出し、検出結果から雨天の判定が可能であることを示す。キーワード ITS, 車載カメラ, 天候認識, 雨滴検出, 部分空間法

Rainfall Judgment by Detecting Raindrops on the Windshield Using In-Vehicle Camera

Hiroyuki KURIHATA[†], Tomokazu TAKAHASHI[†], Yoshito MEKADA[†], Ichiro IDE[†], Hiroshi MURASE[†], Yukimasa TAMATSU^{††}, and Takayuki MIYAHARA^{††}

[†] Graduate School of Information Science, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

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

E-mail: †hkuri@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

Abstract We propose a weather recognition method from in-vehicle camera images that uses a subspace method to judge rainy weather by detecting raindrops on the windshield. “Eigendrops” represent the principal components extracted from raindrop images in the learning stage. Then the method detects raindrops by template matching. In experiments using actual video sequences, our method showed good detection ability of raindrops and promising results for rainfall judgment the from detected results.

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

1. はじめに

近年、計算機や各種センサ類を用いた様々な運転支援技術の開発が活発に行われている。なかでも車載カメラを用いた運転支援技術が注目されている。なぜなら車載カメラから得られる映像は運転支援に重要な情報の大部分を占める視覚情報を反映しているからである。人間は運転する際、逐次変化する交通状況の大部分を視覚のみにより認識している。映像中に存在する交通に関わる情報を認識し、それらを利用することにより期待される運転支援技術として、白線の認識による自動操舵、先行車の認識による車間距離調整、歩行者の認識による自動ブレーキ制御、標識の存在の通知などが挙げられる。そしてこれらの情報を画像処理技術によって認識する研究が活発に行われてい

る [1][2]。

運転支援技術と天候の認識には密接な関係がある。雨・雪・霧といった悪天候時は、晴天時の走行に比べ運転が難しく、事故率も格段に増加する。天気は時々刻々と変化し、また走行している場所によっても異なる。そのため、車内に搭載された各種センサ類でリアルタイムにその場所の天候を認識し、運転支援に役立てる技術は非常に重要であると考えられる。天候を認識することにより期待できる運転支援技術としては、ワイパの自動化やブレーキの補助、フォグランプの自動点灯が挙げられる。

天候の中でも特に雨天の認識に着目すると、レインセンサと呼ばれる専用のセンサにより雨天を認識し、ワイパー自動化する技術が実用化されている。しかし、このように認識対象ごとに専用のセンサを用いることは車載されるセンサ数の増加につ

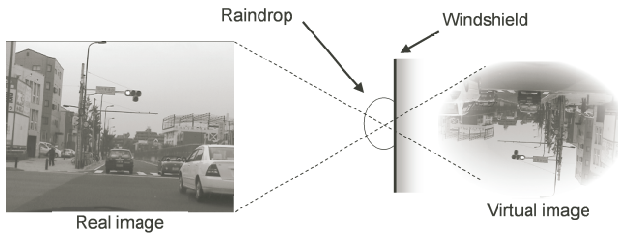


図 1 フロントガラス上の雨滴の表面に映る背景

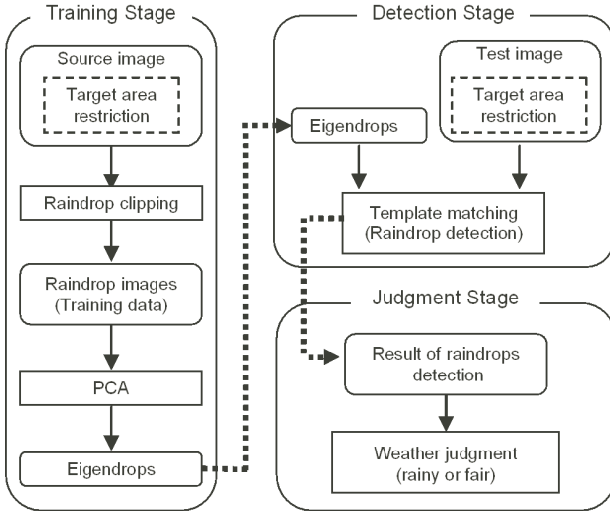


図 2 提案手法の流れ

ながら、外観やスペース、コスト、メンテナンスの観点で好ましくない。レインセンサは発光ダイオードから放射される赤外線が雨滴を通過する際に散乱することで、受光器の受光量が変化する特性を用いて雨量を検出する機構である。ところが検出対象となるのはセンサ上の小領域に存在する雨滴のみであり、そこから得られる情報は運転者の視界状況の変化を反映したものとは言えない。一方、車載カメラは自動車の前方を広範囲にわたって撮影するため、検出範囲が運転者の視界状況に一致する利点がある。

そこで本稿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、それをを用いた雨天認識手法を提案する。提案手法は以下に挙げる 2 つの処理を行うものである。

- 車載カメラ映像からフロントガラス上の雨滴を検出
- 上記の結果を用いた降雨判定

本稿では画像特徴としてフロントガラス上の雨滴に着目した。これを検出することで雨天時の視界の状態の変化を検知する。本稿ではこの画像特徴の抽出に部分空間法を用いた。以降、2 節で画像処理を用いた天候の認識に関連した研究と部分空間法を用いたパターンマッチングに関する研究を紹介する。3 節にて本稿で提案する手法を説明し、4 節で実際に行った実験の方法と結果を記す。そして 5 節にて実験結果について考察し、6 節にてまとめる構成となっている。

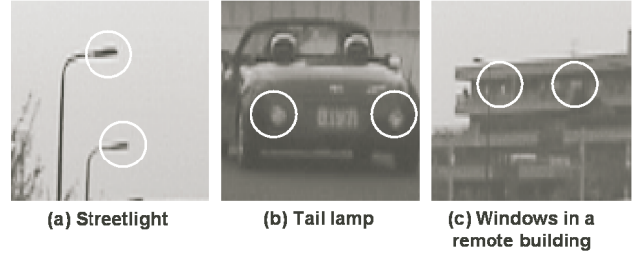
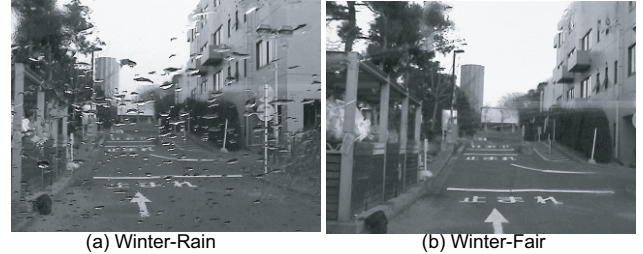


図 3 雨滴に類似する画像特徴を持つ物体



(a) Winter-Rain

(b) Winter-Fair



(c) Summer-Rain

(d) Summer-Fair

図 4 様々な条件下の車載カメラ映像

2. 従来研究

2.1 画像処理を用いた天候認識

画像処理を用いた天候に関する研究として [3] [4] がある。[3] は悪天候時の画像、特に霧画像の物理学に基づくコントラスト改善を目的とした手法である。[4] もまた霧に関する研究で、霧映像における視認性の評価を目的としたものであり、デジタルスチルカメラで記録した画像を用いた視対象物の視認性評価と、人間による主観的な視認性評価との比較から、霧発生時における道路の視認性を評価するデジタル画像の利用手法を提案している。この研究では道路に沿って設置してある道路管理を目的とした監視カメラの映像を用いているが、我々は走行する車の前方を撮影する車載カメラを用いているため、本研究とは目的が異なる。

従来、画像を用いた雨天の認識はあまり行われていない。これは、雨が他のセンサにて検出しやすいためと考えられる。しかし本研究では、運転支援において視界状況を反映した車載カメラ映像からの雨天認識が重要であると考えて取り組んでいる。

2.2 部分空間法とパターン認識

本稿で用いた部分空間法は、パターン認識の分野にて広く用いられているクラスタリング手法である。部分空間法とは共通の画像特徴を持つ画像群から主成分分析を用いてその特徴を抽出し、それをを用いて未知の入力画像とパターンマッチングする

手法である。

例えば [5] では、3次元物体の向きや光源の変化に対応して連続的に変動する撮影画像の変化を、画像の固有ベクトルが形成する部分空間(固有空間)上の多様体として表現するパラメトリック固有空間法を提案している。また [6] や [7] では人間の顔を認識する際に部分空間法を用いている。

このように、部分空間法は様々な物体の認識がに用いられているため、フロントガラス上に付着した雨滴の検出にも有効であると考えられる。

3. 部分空間法を用いたフロントガラス上の雨滴検出手法

3.1 概要

提案手法では、雨滴が持つ画像特徴を主成分分析により抽出し、それをを用いてフロントガラス上の雨滴を検出する。雨滴が持つ画像特徴として以下のものを利用する。

- 雨滴の輪郭
- 雨滴による背景のエッジのぼけ
- 雨滴による光の屈折

フロントガラス上の雨滴は概ね一様な円形状をしている。雨滴自体は透明であるが、図 1 のように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、雨滴には上記のような共通の特徴があると考えられる。

本手法の一連の処理の流れは図 2 のようになる。本研究では 2 種類の手法を提案する。

[手法 1] 学習段階 (Training Stage), 検出段階 (Detection Stage), 判定段階 (Judgment Stage) の 3 段階で構成される。あらかじめ学習段階において矩形で切り出された画像群を主成分分析し、雨滴テンプレートを作成する。これは雨滴の固有画像であり、Eigendrop と名付ける。この雨滴テンプレートを検出段階では入力画像から矩形領域を切り出し、これをずらしながら雨滴テンプレートと照合する。最後に判定段階にて、雨滴検出の結果を受け晴天か雨天を判定する。具体的な処理は次節以降で詳しく説明する。

[手法 2] 手法 1 の学習及び検出段階において、対象領域の絞り込み処理を付加したものである。この処理に関しては 3.3 節にて述べる。

3.2 アルゴリズム

A. 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長方形領域を切り出す。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 $\mathbf{x}_i = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ とする。ここで $N = W \times H$ である。 K 枚の学習画像から行列 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_K]$ を作成し、 \mathbf{X} の自

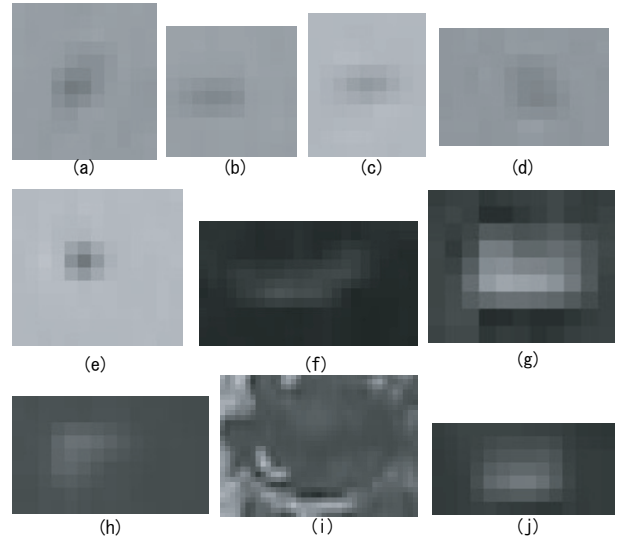


図 5 切り出した雨滴画像例。(a)~(e):空領域からの切り出し,(f)~(j):その他の領域からの切り出し

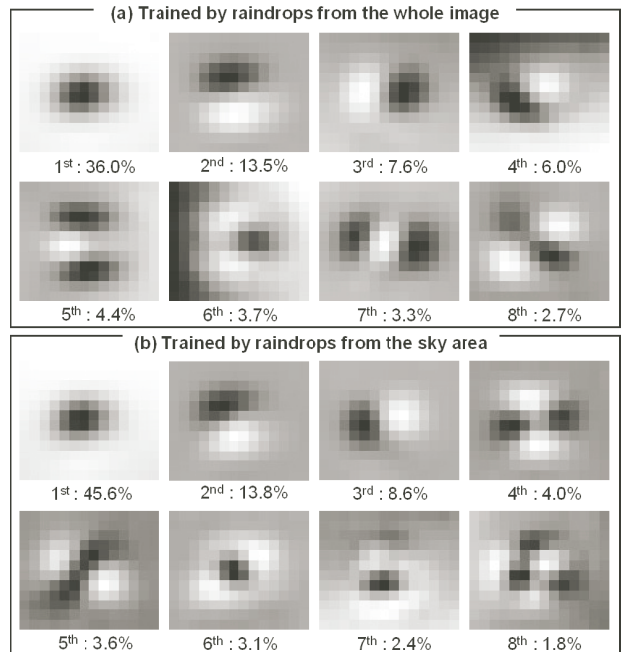


図 6 雨滴テンプレート画像と各々の寄与率

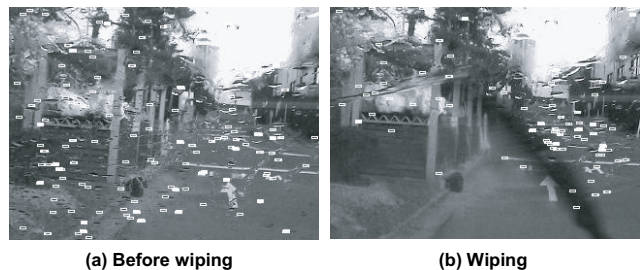


図 7 ワイパーによる雨滴検出数の変化

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 $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_R\}$ 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

レートとする。

B. 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。入力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 次元ベクトルと見做し、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、入力画像から雨滴を検出する。

C. 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。検出数があるしきい値以上ならば雨、以下ならば晴と判定する。

3.3 雨滴検出対象領域の絞込み

手法 2 では雨滴領域の検出精度の向上を目的として、検出対象領域を絞込む。この利点として以下の 3 つが挙げられる。

- 背景の変化に依存して発生する誤検出の抑制
- 安定した画像特徴を抽出することによる検出精度の向上
- テンプレートマッチングの計算時間の短縮

具体的には、背景のテクスチャ変動が比較的小さいと考えられる空領域に注目し、この領域を検出対象領域とする。これと同時に学習段階において雨滴テンプレートを作成する際に用いる雨滴画像も同じ領域からのみ切り出す。

空領域以外に、図 3 のような雨滴と良く似た画像特徴を示す物体が存在すると、検出段階において誤検出する可能性が高い。また学習段階において、背景のテクスチャ変動が大きい部分ではそこから切り出される雨滴画像中に雨滴以外の画像特徴が多く含まれ、主成分分析によって抽出される特徴が不安定になると考えられる。さらに検出の際に探索する領域を絞ることにより処理の高速化が図られる。

4. 実 験

実際に車載カメラにより撮影した映像に対して本手法を適用し、雨滴検出及び降雨判定の実験を行った。異なる日に撮影した 2 つ雨天の映像を用いて、雨滴の検出精度と降雨判定の正解率を調べた。

4.1 実験方法

実験に使用した 2 種類の映像の撮影条件を以下に示す (図 4)。2 つの映像は共に、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 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。

[データ 1] 冬季に撮影した、大きな雨滴がフロントガラス上に付着した映像

[データ 2] 夏季に、小雨時に撮影した映像

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と雨の画像を各 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。そして晴画像を晴と、雨画像を雨と正しく判定した画像枚数を数え、正解率を求めた。

4.2 実験結果

データ 2 を用いた実験における雨滴検出結果の一例を図 5 に示す。そしてこの際に作成した雨滴テンプレートを図 6 に示す。このときの部分空間の次元数は 6 とした。

データ 1 において、図 7 で示すように良好に雨滴を検出できた。図 7(a) のとき、再現率 0.24、適合率 0.87 であった。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。

データ 2 を用いた場合、手法 1 では誤検出が多く見られたが、手法 2 では良好な結果を得ることができた。データ 2 に対して雨滴検出を行った結果の一例を図 8 と図 9 に示す。手法 1 では物体の境界線付近で数多く誤検出が起きた (図 8(a))。しかしながら空領域のみを検出範囲とした場合、良好な結果を得ることができた。一般的に再現率と適合率はトレードオフの関係にある。手法 1 では再現率が約 0.3 付近から適合率が減少し始めた。手法 2 では、再現率が 0.9 に近づいても高い適合率が保たれた。図 10 に示すように、手法 2 は常に手法 1 より良い結果となった。

手法 2 をデータ 2 に適用した雨滴検出結果に対し、降雨判定のために検出数のしきい値を変化させ、入力画像の降雨判定の正解率を求めたところ図 11 のような結果となった。例として、類似度のしきい値が 0.80、検出数しきい値 5 のとき、晴雨判定の正解率は 90%を示した。

5. 考 察

5.1 実験についての考察

データ 2 に対し手法 1 を適用して雨滴を検出した際の検出精度が低かった理由として、以下のことが考えられる。図 6(a)(雨滴テンプレート)の第 4 主成分には横方向のエッジ特徴、第 6 主成分には縦方向のエッジ特徴が強く現れている。結果として雨滴テンプレートと画像のエッジ成分との類似度が高くなり、誤検出を引き起こす (図 8 の検出結果)。データ 1 に比べデータ

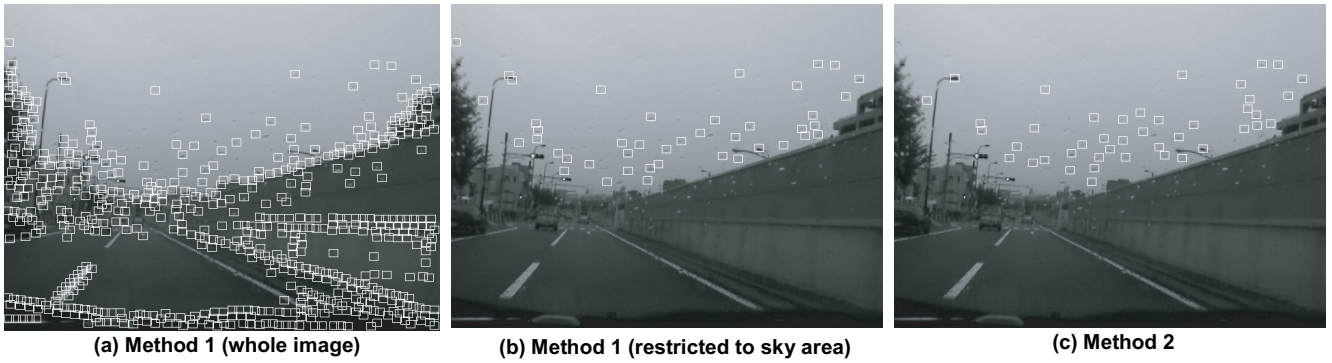


図 8 各手法をデータ 2 に適用した雨滴検出結果の一例 ($S(a) \geq 0.78$) . (b) は (a) から空領域上の雨滴のみを抽出 .



図 9 手法 2 をデータ 2 に適用した雨滴検出結果の一例 ($S(a) \geq 0.78$)

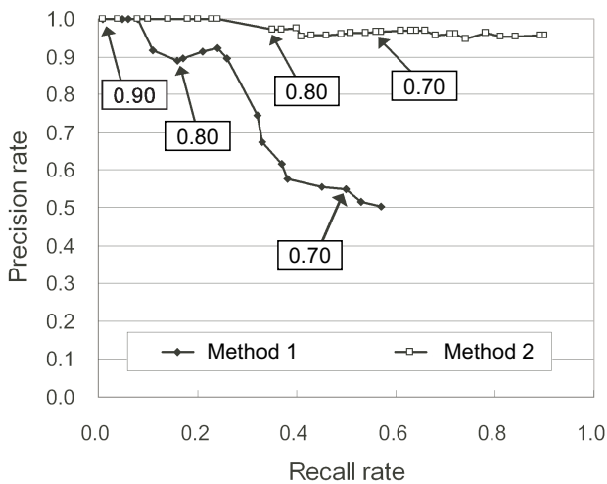


図 10 雨滴検出精度 . 正解雨滴領域数を A , 検出雨滴領域数を B とすると , 再現率 $= (A \cap B) / B$, 適合率 $= (A \cap B) / A$ となる . 図中の枠付きの数字は類似度のしきい値を表す .

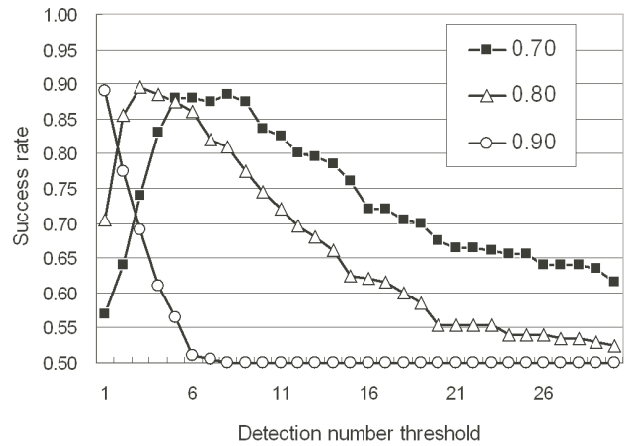


図 11 雨滴検出数のしきい値を変化させたときの降雨判定成功率 (データ 2 , 手法 2) . 各 100 枚の晴・雨入力画像から検出雨滴数を用いて雨天を判定した . 3 本の折れ線は類似度のしきい値の違いを表す .

2 は全体的に雨滴が小さく輪郭が薄いため , 背景テクスチャが混み合っている領域では視認さえ難しい (図 4) . これらの理由により , 主成分分析の際に雨滴特有の画像特徴を安定して抽出することができなかつたと考えられる .

それに対し領域を絞り込む手法 2 の場合 , 図 6(b)(固有ベクトル) のように安定した主成分が抽出できているため , 検出精

度が向上したと考えられる . しかし , 手法 2 は画像中に空領域の占める割合が低い場合に雨滴を検出することが困難になると考えられるため , 空領域以外から切り出した雨滴画像から雨滴の画像特徴を安定して抽出する手法が必要である .

車載カメラ映像は連続した画像系列である . 車載カメラが固定されていれば , 走行中の背景の変動に対し雨滴の位置の変動

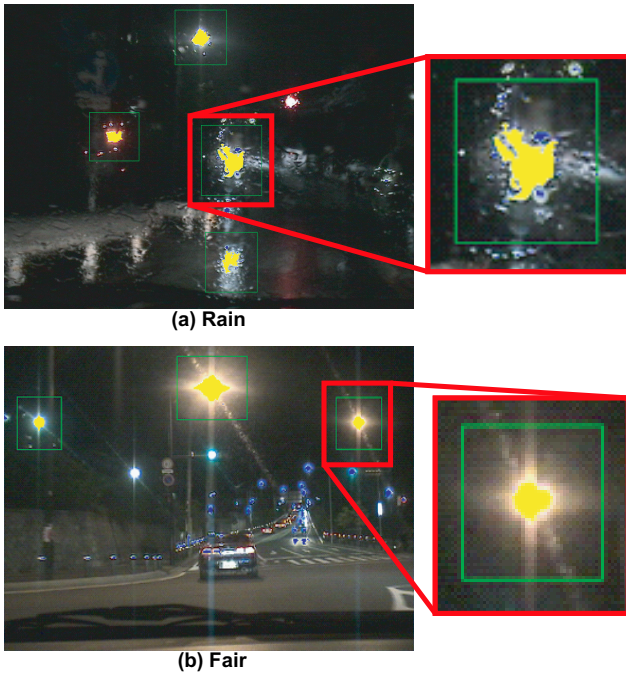


図 12 夜間の雨天映像．大きい光源領域周辺に小さい屈折光領域が数多く点在する．

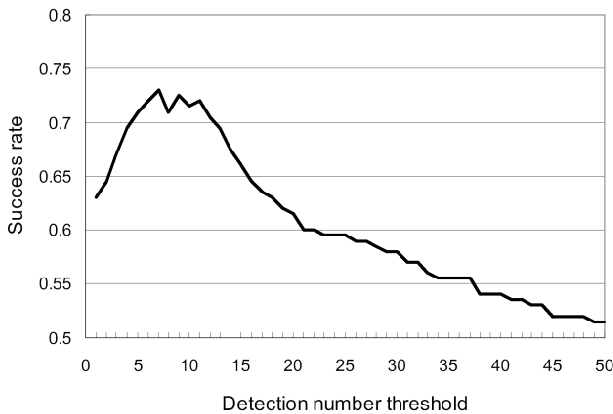


図 13 夜間映像を用いた雨滴検出数のしきい値を変化させたときの晴雨判定成功率．晴・雨各 100 枚の入力画像に対する検出雨滴数を用いて降雨を判定した．

はすごく小さい．このような性質から，フレーム間処理を用いることで安定した雨滴の特徴が得られるのではないかと考える．

降雨判定は，実験において類似度しきい値が 0.8 のときのように，雨滴の検出数が少ないときでも十分な成果をあげた．このしきい値を用いたときの雨滴検出の再現率が約 0.3 であったことから (図 10)，降雨判定には高い再現率ではなく高い適合率が必要であると言える．つまり，検出漏れよりも誤検出を最小限に抑えることが重要であることを意味する．そのため本研究で提案した雨滴検出手法により，晴天か雨天かを効果的に判定可能であると言える．

5.2 夜間の降雨判定

現時点において，本手法は昼の映像からの雨天認識を対象としたものである．しかし雨天時に得られる画像特徴は時間帯によって様々である．ここでは夜の雨天認識に関して，有効と考えられる画像特徴を検討した．

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 (図 12)．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．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．街灯や車のライトといった光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，大きい光の周りに小さい光が数多く分布するように見える (図 12(a))．この性質を画像特徴として認識することができれば，夜間の雨天認識に役立てられると考える．

そこで，上述の特徴量を用いた簡単な雨天認識手法を試みた．夜間に撮影した天候が未知の入力画像から，輝度値の高い領域，つまり光領域を抽出する．そして，光領域を面積の大きい光領域 (光源領域) と小さい光領域 (屈折光領域) とに分ける．光源領域周辺の屈折光領域数を調べ，入力画像が晴天か雨天かを判定する．入力画像から屈折光領域が多数検出されれば，多くの雨滴により光が屈折したと考え，雨天とみなすことができる．屈折光領域の検出数のしきい値を変化させ，降雨判定の成功率を調べたところ，図 13 のような結果となった．

6. まとめ

本稿では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，走行時の天候 (雨天) を認識する手法を提案した．実映像を用いた実験の結果，雨滴の画像特徴の抽出が容易である場合は良好な結果が得られた．特徴の抽出が困難な場合でも，特徴抽出が容易となるように領域を絞り込むことによって良好な結果が得られ，本手法の有効性を確認することができた．また，夜間の雨天映像の特徴抽出に関する予備的検討を行った．

今後はフレーム間処理を用いて複雑な背景領域中に存在する雨滴をロバストに検出する手法の実現を検討している．加えて，本稿では雨滴検出の対象領域の絞込みを画像的な特徴を用いて行ったが，アイカメラ等を用いて運転者の視線方向を検知することにより，運転に必要な視界領域を検出対象領域とすることも検討している．また，時間・場所・雨量等，様々な雨天状況を想定した映像に対する手法の検討が課題である．

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深く感謝する．本研究の一部は 21 世紀 COE プログラム，科研補助金による．

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, pp.848-853, June, 2004.
- [3] S. G. Narasimhan and S. K. Nayar, ”Contrast Restoration of Weather Degraded Images,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, No. 6, pp.713-723, June, 2003.
- [4] 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.
- [5] 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, pp.2179-2187, November, 1994.
- [6] 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, pp.711-720, July, 1997.
- [7] P. Watta, Y. Hou, S. Lakshmanan, and N. Natarajan, ”Improving Driver Pose Estimation,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2002, pp.310-315, June, 2002.