

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

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 大学院情報科学研究科 〒464-8603 愛知県名古屋市中種区不老町

^{††} (株)デンソー 〒448-8661 愛知県刈谷市昭和町1-1

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

あらまし 本報告では車載カメラ映像から雨天時に現れる画像特徴を抽出し、それを用いた状況別降雨認識手法を提案する。車載カメラを用いた運転支援技術の一環として、撮影時刻や降雨量の異なる様々な状況において天候、特に降雨の認識を試みる。具体的にはフロントガラスに付着した雨滴により変化する画像特徴を、昼夜の状況に適した方法を用いて検出することによって降雨の認識を行う。昼間の映像の場合には、様々な形状の雨滴画像から主成分分析を用いてテンプレートを作成し、テンプレートマッチングにより雨滴を検出する。我々はこれまで画像中の空領域からの雨滴検出手法を提案してきたが、本報告では入力画像を複数フレームにわたって平均化することで、画像全体からの安定した雨滴検出を行う手法を提案する。また雨滴検出結果をフレーム間で照合することで、より精度の高い雨滴検出が期待される。夜間の映像の場合には、雨滴による散乱光を定量化する。撮影時刻や降雨量の異なる実映像を用いて実験を行った結果、昼間の場合、画像全体から適合率0.97、再現率0.51と、従来と同程度の検出精度が得られた。また夜間の場合、83%の降雨判定成功率が得られた。これらのことから提案手法の有効性を確認した。

キーワード ITS, 車載カメラ, 降雨認識, 雨滴検出, 部分空間法

Rainfall Recognition in Various Conditions by In-Vehicle Camera Image for Driver Assistance

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 1-1 Showa-cho, Kariya-shi, Aichi, 448-8661 Japan

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

Abstract In this paper, we propose a rainfall recognition method in various conditions from in-vehicle camera images using extracted image feature characteristic to rain. As a driver assistance system using an in-vehicle camera, we have been trying to recognize weather, especially rainfall in various conditions. We recognize the rainfall by detecting the changes of image features caused by raindrops on the windshield, making use of different methods for day and night. In daytime, we make raindrop templates by principal component analysis from various raindrop images, and detect raindrops by template matching. We have previously proposed a raindrop detection method from the sky region in the image. In this paper, we propose a method that detects raindrops from the whole image by averaging multiple input images. In addition, higher accuracy of raindrop detection is expected by matching the detected raindrops between frames. In nighttime, we propose a method that quantifies lights reflected by raindrops. As a result, the same detection accuracy with number of the previous method was obtained (precision rate 0.97, recall rate 0.51) for daytime without restricting the target region. In nighttime, we obtained a the success rate of 83% rainfall judgment. Effectiveness of this technique was shown from these results.

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

1. はじめに

1.1 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 [2] [3]。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様々な視覚情報を含むため、運転者の視界状況を広範囲に取得可能だからである。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。映像情報の認識による運転支援技術例としては、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。そしてそ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。

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、ワイパを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ながり、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。

1.2 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変化が挙げられる。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 (図 1)。概ね一様な円形状をしていることを含め、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、上記のような共通の特徴があると考えられる。

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 [1]。この手法は雨滴の検出対象領域を平坦領域、特に空領域に絞ることで、図 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、

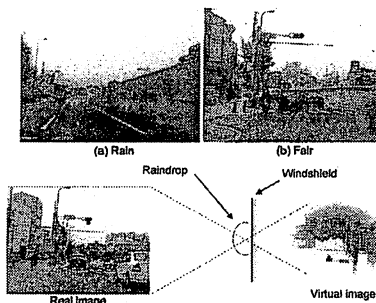


図 1 昼間の車載カメラ映像と画像特徴

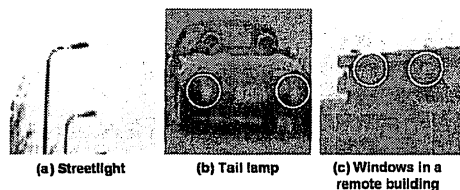


図 2 雨滴に類似する画像特徴を持つ物体

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 (図 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ら、光の領域に着目する。晴天時は光源が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、大きい光の周りに小さい光が数多く分布するようになる。言い換えれば、光源周辺に屈折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、夜間の降雨認識に役立てられると考える。

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、2 節にて昼間の雨天認識を、3 節で夜間の雨天認識を記す。そして 4 節にてまとめる構成となっている。

2. 昼間：部分空間法による雨滴検出からの降雨認識

2.1 アルゴリズム

本手法の一連の処理の流れは図 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を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

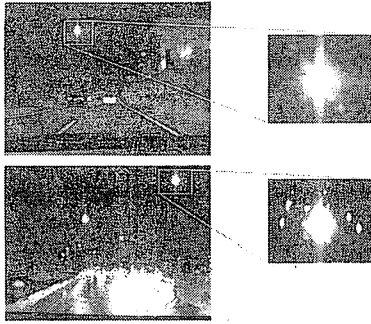


図3 夜間の車載カメラ映像と画像特徴: (上) 晴天, (下) 雨天

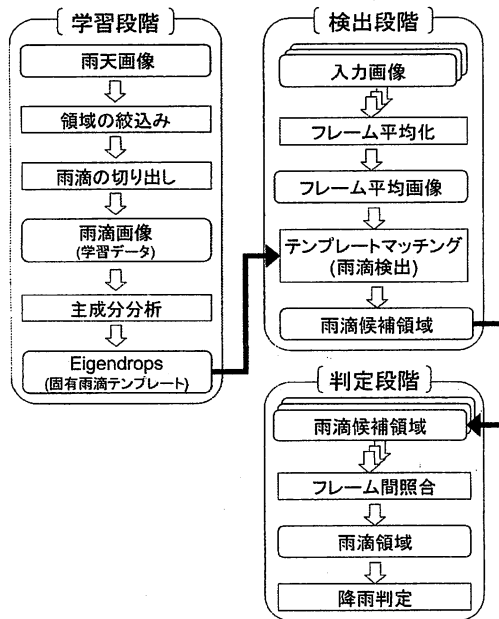


図4 昼間の降雨認識手法

について詳しく述べる。

2.1.1 Eigendrop を用いた雨滴検出

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 $\mathbf{x}_i = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ 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 $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_R\}$

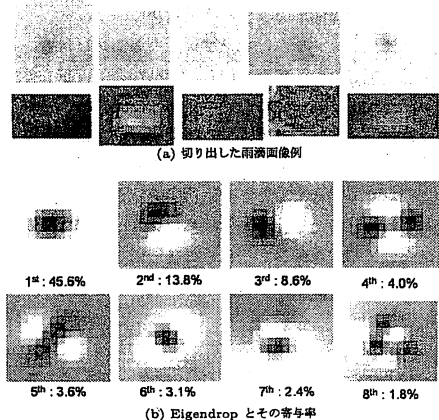


図5 雨天画像と固有雨滴 (Eigendrops)

を求める。これらを基底として振られる部分空間を雨滴テンプレートとする。

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。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。

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。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、未達ならばなしと判定する。

2.1.2 入力画像のフレーム平均化

前節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ばかし、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。

2.1.3 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、フレーム毎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。

2.2 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 × 480pixel 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。

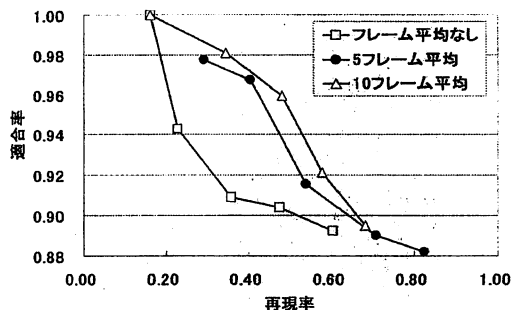
2.3 実験結果

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図 5 に示す。このときの部分空間の次元数は 6 とした。

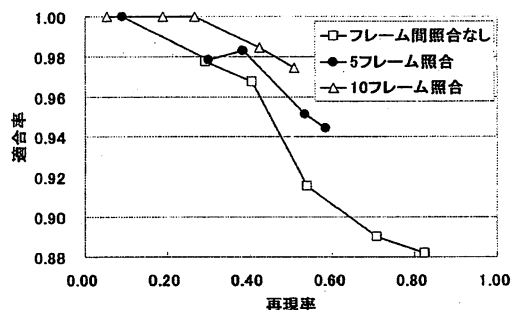
実験条件別の雨滴検出結果を図 6 に、それらの再現率・適合率を図 7 に示す。再現率と適合率はそれぞれ検出漏れと誤検出の程度を表す指標であり、どちらも検出が良好であるほど 1.0 に近づく。雨滴検出結果をフレーム照合する際にフレーム数を増やすほど検出精度が高まることが分かった。一方、フレーム平均を求めるのに用いるフレーム数と検出精度との間に比例関係は見られなかった。

2.4 考 察

フレーム平均の際に用いるフレーム数を 1 から 5 フレームへ変化させたときには再現率が上昇したが、5 から 10 フレームへ変化させたときは逆に減少した。適合率に関しては大きな変化はなかった。この理由として次のことが考えられる。10 フレーム平均画像の場合、10 フレーム前から雨滴が存在しなければ検出されないの、検出対象フレームより 9 フレーム以内に付着した雨滴は全て検出漏れとなってしまふ。また、実用化されている車載カメラは軽量であるが、本実験で用いた車載カメラは市販のデジタルカメラを車内に固定したものなので、その重



(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)

図 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 = $(A \cap B)/B$, 適合率 = $(A \cap B)/A$ となる。

量の原因で無視できない程度のぶれが生じてしまう。これらのため想定していたようなフレーム平均画像がうまく作成できなかったと思われる。

一方、フレーム間照合のフレーム数を 1, 5, 10 と変化させると適合率は上昇し、再現率は減少するのが確認できた。しかしながら実用化上、特にワイパの自動化を考えたときに重要となるのは適合率である。それは降雨のない状態において誤検出によりワイパを誤動作させることが最も望ましくないからである。よって、このような目的のためにはフレーム数を増やしたときにフレーム間照合の効果はあったと言える。ただし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。これに関しては、雨滴が付着してから運転者が不快に思うまでの程度の時間を要するか調べる必要がある。フレーム平均・フレーム間照合を総じて、本実験ではフレーム平均 5 フレーム、フレーム間照合 10 フレーム時が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 (図 8)、本手法も降雨の判定が可能だと言える。

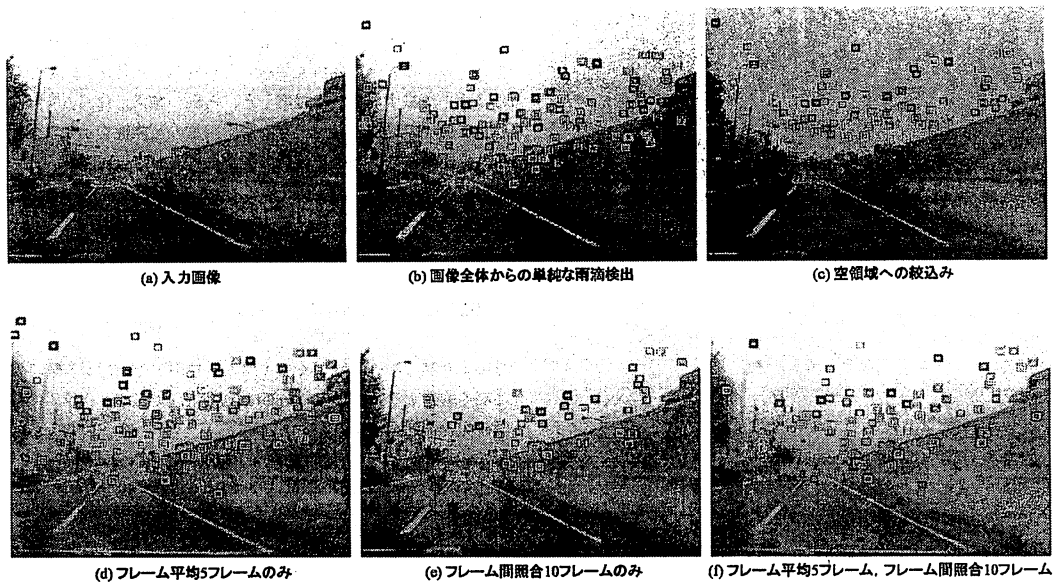


図 6 昼間の雨滴検出結果

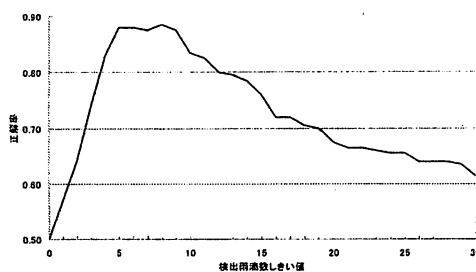


図 8 雨滴検出数のしきい値を変化させたときの降雨判定成功率 (空領域からの検出結果, 類似度しきい値 0.70): 各 100 枚の晴・雨入力画像から検出雨滴数を用いて降雨を判定した。

3. 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。本論文では、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 に近づくと

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。

3.1 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。

3.2 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。降雨判定結果を図 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。

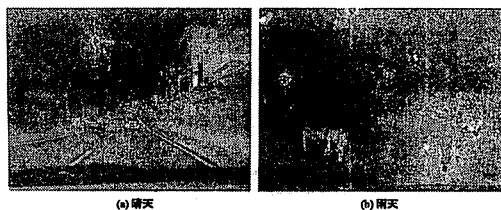


図9 夜間の光領域検出結果

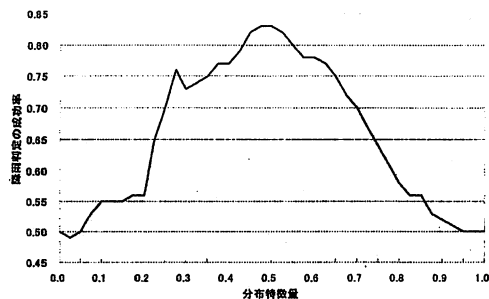


図10 夜間映像を用いた雨滴検出数のしきい値を変化させたときの降雨判定成功率。晴天・雨天各50枚の入力画像に対する分布類似度を用いて降雨を判定した。

3.3 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。ライトの反射により白線の輝度値が高い領域を誤検出することがあったが、降雨判定には影響しなかった。これは雨滴による屈折光の屈折現象が多発していたからである。しかし雨の降り始めといった比較的前ガラスに雨滴が付着していない状態では、このような領域の影響は無視できない。また、街灯や交通量が少ない道路では光源数がもともと少ないので、たとえ雨滴が多数付着していても本手法の効果が現れにくいと思われる。つまり、本手法は付着した雨滴数と映像中の光源数に強く依存してしまうが、夜間でも多少の交通量や、電飾・街灯といった光源がある道路に限定すれば良好な判定が期待される。

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が今後の課題である。

4. 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。本研究の一部は21世紀COEプログラム、科学研究費補助金による。

文献

- [1] 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 幸之, “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降雨判定”, 画像の認識・理解シンポジウム 2005, July 2005
- [2] 望月 大介, 矢野 良和, 橋本 智剛, 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.
- [3] 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.
- [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, pp.713-723, June 2003.
- [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] 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.
- [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, pp.711-720, July 1997.
- [8] P. Watta, Y. Hou, S. Lakshmanan, and N. Natarajan, “Improving Driver Pose Estimation,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2002, pp.310-315, June 2002.
- [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, pp.21-22, 2000.
- [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,”