

# 時空間画像処理による雨天時画像からの水滴除去

福地 功 山下 淳 金子 透 三浦 憲二郎  
静岡大学工学部機械工学科

本論文では、ビデオカメラによる風景撮影時にレンズ保護ガラス面上に水滴が付着することで視野が妨害された画像に対し、時空間画像処理を施すことにより水滴を除去する手法を提案する。画像から水滴を除去するために、本手法ではレンズ保護ガラスと一体となった1台のカメラを回転させ画像を取得する。次に、取得した画像を時空間画像として扱い、時空間断面画像上で水滴と被写体との間における軌跡の違いに着目することで水滴領域を検出する。最後に、検出した水滴領域に対し、欠損画素復元手法を用いることで水滴を除去する。実験結果より、本手法の有効性が確認された。

## 1. はじめに

屋外に設置されたカメラは、交通状況の確認や犯罪の予防といった用途等で広く用いられている。しかし、屋外環境下に設置されたカメラの場合、得られる画像の質は環境条件により大きく左右される。特に雨天時における撮影では、カメラを保護するレンズ保護ガラス面上に水滴が付着することにより視野が妨害され、明瞭な画像を得ることができないという問題が生じる(図1)。



図1 水滴による視野妨害

一般的に、ガラス面に付着した水滴を除去するためにはワイパーが用いられる。しかし、屋外監視カメラの場合、ワイパーを取り付けるための場所を確保することが難しく、現状ではワイパーが取り付けられているケースはほとんどない。更に、ワイパーを動作させた瞬間は、ワイパー自体が視野を妨害するという問題もある。そこで本手法では、このような物理的なアプローチではなく、ソフト的に画像処理の技術を用いて画像から水滴を除去する。

画像処理により画像からノイズを除去する手法として、プロの絵画修復技師の技能をまねた画像復元手法[1]がある。この手法は周囲と相関性の高い部分の再現性は良いが、不規則なテクスチャパターンに対しての再現性が悪いという性質がある。同様の問題は画像のフラクタル性を利用した画像復元手法[2]にも当てはまり、これらの手法は大きなノイズへの適応性が悪いという特徴もある。また、ノイズの位置を人間が逐次指定する必要があるため、自動作業には適していない。

これとは逆に、人間が逐次指定する必要のない手法としては、降雪ノイズ除去における時間メディアンフィルタを用いる手法[3]や、雨の物理モデルを作成し用いることによる降雨ノイズ除去手法[4]が提案されている。しかし、これらの手法は共に視野内を移動する雪や雨を対象としたものであり、これらがレンズ保護ガラス面上に付着することで発生するノイズを除去することができない。

上記の手法に対して、レンズ保護ガラス面上に付着した水滴を検出・除去することが可能なものとしては、2台のカメラを使用する手法[5]が提案されている。この手法は2台のカメラにより取得した2枚の画像に対し、正規化相互相関によるテンプレートマッチングを行うことで水滴を検出する。しかし、2枚の画像で水滴の見え方に差が生まれたとき正しく対応点を得ることが難しく、結果として水滴を検出・除去することができない場合がある。また、1台のカメラを回転させ取得した2枚の画像から水滴を検出・除去する手法[6]もあるが、同様に2枚の画像だけでは同じ場所が水滴で隠れた際、水滴を除去することができない。

この問題を解決するため、本手法では複数の静止

画像を時系列順に並べた時空間画像を用いる。同じく時空間画像を用いて画像から遮蔽物を取り除く手法[7]が提案されているが、カメラを並進させて画像を取得するため、視差の影響を受けにくい遠景画像が対象の場合、レンズ保護ガラス面上の水滴と被写体とを区別することが困難である。

以上の点を踏まえ、本手法では、レンズ保護ガラス面上に水滴が付着した状態でカメラを回転させ、その際に得られた画像を対象とする。取得した画像に対して時空間画像処理を施し、画像から水滴を除去する。

## 2. 水滴除去の原理

本手法の具体的な処理手順を図2に示す。まず画像を取得し、歪曲収差補正、投影変換による撮影シーンの位置合わせを行う。次に時空間断面画像を作成する。時空間断面画像上では水滴と被写体の間における軌跡に違いが生じるため、この点に着目することで水滴領域を検出する。最後に検出した水滴領域に対して欠損画素復元手法を用いることで水滴を除去する。

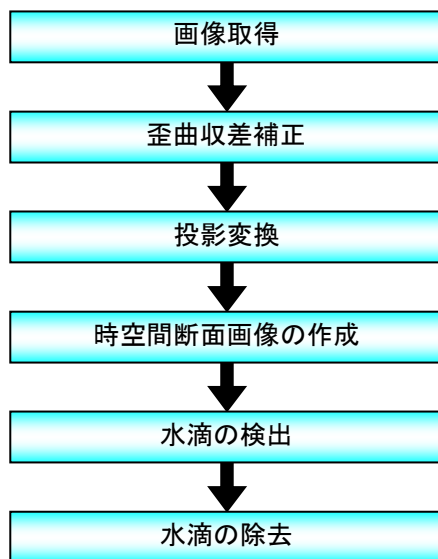


図2 処理手順

## 2.1 画像取得

レンズ保護ガラス面上に水滴が付着したカメラを、撮影中等速に回転させ画像を取得する(図3)。カメラの回転により、撮影シーンはそれに伴って移動するが、レンズ保護ガラス面上に付着した水滴は画像中で常に同じ位置に撮影され、カメラの回転に伴い水滴で隠れていた被写体が姿を現す。

なお、撮影は市販の首振りカメラ(Sony EVI-D100)を用いて行った。

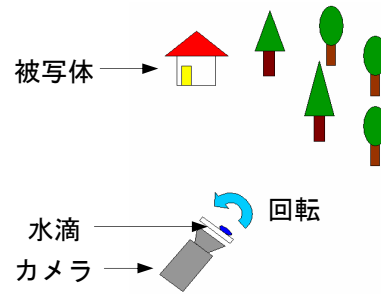


図3 画像取得

## 2.2 歪曲収差補正

レンズへの入射角が大きくなると、結像条件が変化することにより結像位置がずれる歪曲収差が生じる。ここでは、Wengらのレンズの歪みモデル[8]のうち、radial歪みを考える。歪曲収差補正後の画像面上の座標を $(\tilde{u}, \tilde{v})$ 、補正前の画像面上の座標を $(u_0, v_0)$ 、歪みパラメータを $\kappa_1$ とすると、(1)式、(2)式が成り立つ。

$$u_0 = \tilde{u} + \kappa_1 \tilde{u}(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) \quad (1)$$

$$v_0 = \tilde{v} + \kappa_1 \tilde{v}(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) \quad (2)$$

## 2.3 投影変換

取得した画像の撮影シーンは、カメラの回転に伴い刻々と変化する。そこで、あるフレームに撮影された画像を基準画像とし、レンズ中心を回転中心とした投影変換を行う。投影変換により、得られた全ての画像を基準画像と同じシーンの画像に位置合わせをすることができる。カメラの回転角を $\theta$ 、像距離(レンズ中心から結像面までの距離)を $f$ 、投影変換前の画像中の座標を $(\tilde{u}, \tilde{v})$ とすると、投影変換後の座標 $(u, v)$ は(3)式、(4)式で表される(図4)。

$$u = f \frac{f \tan \theta + \tilde{u}}{f - \tilde{u} \tan \theta} \quad (3)$$

$$v = f \frac{\sqrt{1 + \tan^2 \theta} \tilde{v}}{f - \tilde{u} \tan \theta} \quad (4)$$

なお、投影変換を行うことにより画像端に画像情報のない領域が生じるが、この領域に対しては 2.5 節、2.6 節で述べる処理を行わない。

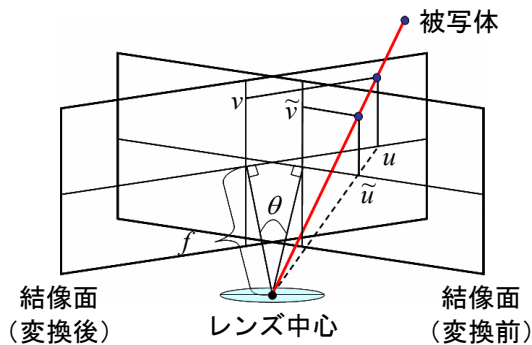


図 4 投影変換

## 2.4 時空間断面画像の作成

取得した画像に対して投影変換を行った後、それらを時系列順に並べると、図 5 に示すような時空間画像  $I(u,v,t)$  として表すことができる。ここで  $t$  はフレームである。

時空間画像は、走査線に沿ったある面で断面を切り出すことができる。図 6 は、図 5 に示した時空間画像を  $v=v_1$  に沿って切り出したときの時空間断面画像である。ここで時空間断面画像を  $S(u,t)$  と表すと、 $S(u,t)=I(u,v_1,t)$  となる。 $S(u,t)$  において、被写体の軌跡は投影変換による位置合わせにより時間軸に対して平行な直線となる。一方、カメラと共に移動する水滴の軌跡は投影変換により(3)式、(4)式で表される曲線となる。

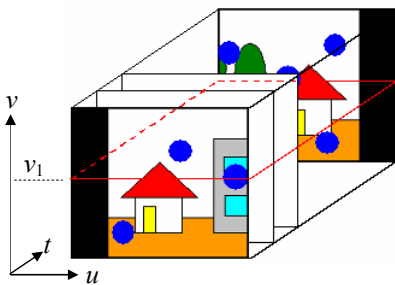


図 5 時空間画像  $I(u,v,t)$

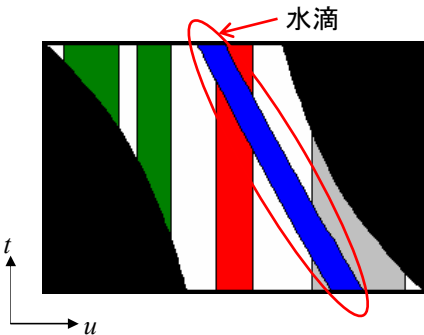


図 6 時空間断面画像  $S(u,t)$

## 2.5 水滴の検出

### 2.5.1 中央値画像の作成

断面画像  $S(u,t)$  上での被写体の軌跡上の画素値から時間軸方向についての中央値を求める。その後、軌跡上の画素値を求めた中央値に置き換えることで中央値画像  $M(u,t)$  を作成する (図 7)。水滴の面積は被写体の面積に比べ小さいため、 $M(u,t)$  は水滴が消えた画像となる。

### 2.5.2 差分画像の作成

断面画像  $S(u,t)$  と中央値画像  $M(u,t)$  の差分を取る。これにより得られた差分画像  $D(u,t)$  は(5)式で表される。 $M(u,t)$  は水滴が消えた画像であるため、水滴領域では両者の差が大きくなるのに対し、被写体領域では差が小さくなる (図 8)。

$$D(u,t) = |S(u,t) - M(u,t)| \quad (5)$$

### 2.5.3 水滴の検出

差分画像  $D(u,t)$  に対し、(6)式に示すように閾値  $T$  より大きい画素を  $H(u,t)=1$ 、小さい画素を  $H(u,t)=0$  として 2 値画像  $H(u,t)$  を作成する (図 9)。この際、水滴は(4)式で示される投影変換により発生する  $v$  軸方向の変位のため、時間の経過により同一の断面画像上に存在しなくなる。このため  $H(u,t)$  を作成する際には、水滴が常に同一の断面画像上に存在するよう、(4)式による変位を考慮している。

$$H(u,t) = \begin{cases} 0, & D(u,t) < T \\ 1, & D(u,t) \geq T \end{cases} \quad (6)$$

次に、作成した  $H(u,t)$  を用いて水滴を検出する。水滴の軌跡は(3)式で示される曲線となるため、この曲線上で  $H(u,t)=1$  となる画素数を加算する。加算した黒画素の個数が閾値  $N$  を超える場所を水滴領域として検出する。

全ての断面画像  $S(u,t)$  で水滴領域を検出した後、元の画像の形態に戻した水滴検出画像  $R(\tilde{u}, \tilde{v})$  を作成する (図 10)。

このとき、水滴領域の誤検出により発生したノイズに対し、収縮処理を複数回行うことでこれを除く。また、収縮処理により小さくなった水滴領域を拡げるため膨張処理を複数回行う。

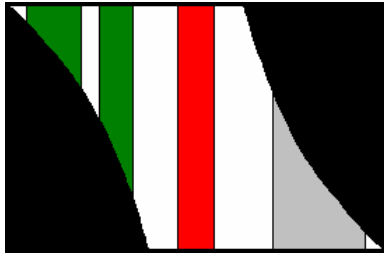


図7 中央値画像  $M(u,t)$

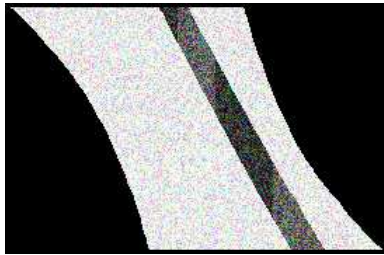


図8 差分画像  $D(u,t)$



図9 2値画像  $H(u,t)$

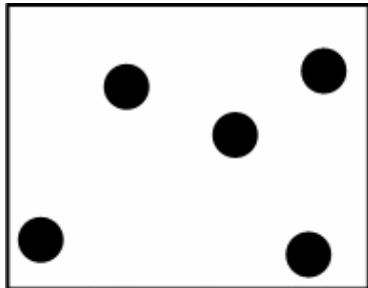


図10 水滴検出画像  $R(\tilde{u}, \tilde{v})$

## 2.6 水滴の除去

検出した水滴領域に対し、欠損画素復元手法を用いることにより、断面画像  $S(u,t)$  から水滴を除去する。本手法で用いる欠損画素復元手法は[9]の文献で提案されているものである。この手法は画像を Structure 画像と Texture 画像に分解し、それぞれの画像に対して、"Image Inpainting" アルゴリズム、"Texture Synthesis" アルゴリズムを適用して画像を復元するものであり、"Image Inpainting" アルゴリズムが不得意とするテクスチャパターンの再現性が高い。また、本手法では 2.5 節で述べた方法で水滴領域を検出済みであるため、人間がその領域を逐次

指定する必要はない。

全ての  $S(u,t)$  から水滴を除去した後、元の画像の形態に戻すことで、水滴が除去された明瞭な画像を得ることができる。

## 3. 実験

撮影時間は 60 フレームであり、撮影した画像サイズは  $360 \times 240$  画素である。また、フレーム毎のカメラの回転角は  $1.774 \times 10^{-2} \text{rad}$ 、像距離は 261 画素相当である。水滴除去に必要なパラメータについては  $T=10$ 、 $N=30$ 、収縮・膨張処理回数を 1 と設定した。

雨天時に撮影した画像 (38 フレーム目) に対して歪曲収差補正を施した画像を図 11 に示す。この画像に対し、レンズ中心を回転中心とした投影変換を行った結果を図 12 に示す。投影変換の際の基準画像は 30 フレーム目の画像である。

例として、図 12 の中央付近に水平に引いたライン ( $v=165$ ) での断面画像  $S(u,t)$  を図 13 に示す。図中で丸く囲った領域は動物体である。水滴検出までの処理段階として、このラインにおける  $S(u,t)$  をグレースケール化した画像を図 14、中央値画像  $M(u,t)$  を図 15、差分画像  $D(u,t)$  を図 16、投影変換を考慮した 2 値画像  $H(u,t)$  を図 17、水滴検出画像  $R(\tilde{u}, \tilde{v})$  を図 18 にそれぞれ示す。次に、水滴除去までの処理段階として、Structure 画像に対して "Image Inpainting" アルゴリズムを適用した結果を図 19、Texture 画像に対して "Texture Synthesis" アルゴリズムを適用した結果を図 20、水滴除去後の断面画像を図 21 にそれぞれ示す。ここで、Texture 画像に対しては見やすさのため、輝度値に 150 を加算している。最後に、本手法を用いて水滴の除去を行った結果を図 22 に示す。

今回の実験では、一部の雨が画像中に写り込んだが、水滴の検出・除去に与える影響は少なく、良好な結果を得ることができた。また、水滴の中心付近では、背後にある被写体の色が透けて写ることにより、差分画像において被写体領域と水滴領域の間に大きな差が生まれず検出が困難となるが、実際には、この領域は目視ではほとんど水滴と認識することができない程度であり、明瞭な画像を得ることができている。さらに、断面画像上で欠損画素復元手法を用いることにより、撮影シーンに動物体が存在する条件下でも本手法を用いて画像から水滴を除去することが可能となり、図 22 から、水滴で隠れていた動物体が実際には傘を持って歩いている様子を確認することができた。

別の条件で撮影された画像に対し、本手法を用い



て水滴除去を行った結果を図 23, 図 24 に示す. い  
 ずれも良好な結果を得ることができている.



図 11 取得画像

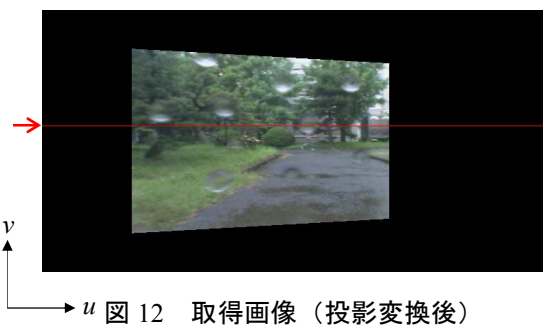


図 12 取得画像 (投影変換後)

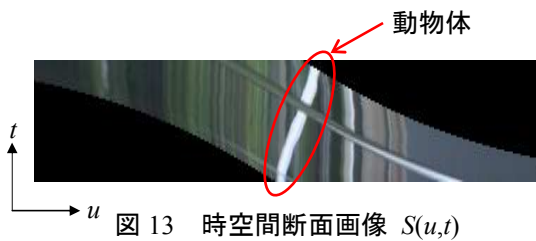


図 13 時空間断面画像  $S(u,t)$

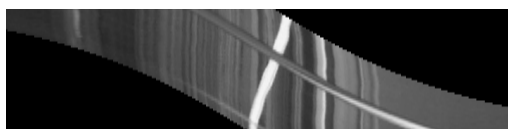


図 14 時空間断面画像 (グレイスケール)



図 15 中央値画像  $M(u,t)$

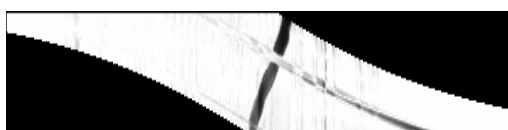


図 16 差分画像  $D(u,t)$



図 17 投影変換を考慮した 2 値画像  $H(u,t)$

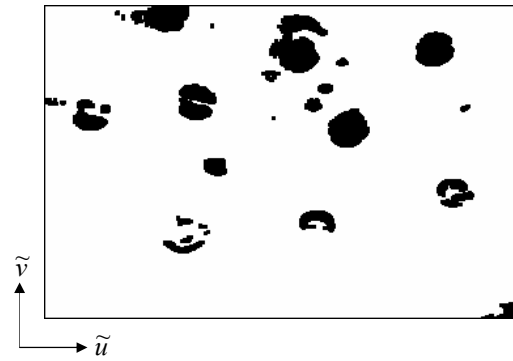


図 18 水滴検出画像  $R(\tilde{u}, \tilde{v})$



図 19 Structure 画像



図 20 Texture 画像



図 21 水滴除去後の時空間断面画像



図 22 除去画像

#### 4. おわりに

時空間画像処理を用いることにより、画像から水滴を除去する手法について検討した。具体的には、時空間断面画像上で水滴と被写体との間における軌跡の違いに着目することにより水滴を検出し、その領域に対して欠損画素復元手法を用いることで画像からの水滴除去を行った。

今後の課題としては、撮影中にレンズ保護ガラス面上の水滴が動く際の対応が挙げられる。

#### 謝辞

本研究の一部は、文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトの補助を受けた。

#### [文 献]

- [1] M.Bertalmio, G.Sapiro, V.Caselles and C.Ballester: “Image Inpainting”, Proceedings of SIGGRAPH2000, pp.417-424, 2000.
- [2] 木幡恭久, 剣持雪子, 小谷一孔: “画像のフラクタル性を活用した局所的な画像推定法による画像復元手法”, 電子情報通信学会技術報告 (PRMU2002-126), Vol.102, No.471, pp.37-42, 2002.
- [3] 三宅一永, 米田政明, 長谷博行, 酒井充, 丸山博: “時間メディアンフィルタによる降雪ノイズ除去”, 画像電子学会誌, Vol30, No.3, pp.251-259, 2001.
- [4] K.Garg and S.K.Nayar: “Detection and Removal of Rain from Videos”, Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol.1, pp.528-535, 2004.



(a) 取得画像



(b) 除去画像

図 23 実験結果 1

- [5] Y.Tanaka, A.Yamashita, T.Kaneko and K.T.Miura: “Removal of Adherent Waterdrops from Images Acquired with a Stereo Camera System”, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.89-D, No.7, pp.2021-2027, 2006.
- [6] A.Yamashita, T.Harada, T.Kaneko and K.T.Miura: “Virtual Wiper -Removal of Adherent Noises from Images of Dynamic Scenes by Using a Pan-Tilt Camera-”, Advanced Robotics, Vol.19, No.3, pp.295-310, 2005.
- [7] 羽下哲司, 鷺見和彦, 橋本学, 関明伸, 黒田伸一: “時空間画像処理による注目距離対象の強調に基づいた遠隔監視システム”, 電子情報通信学会技術報告 (PRMU97-126), pp.41-46, 1997.
- [8] J.Weng, P.Cohen and M.Herniou: “Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.10, pp.965-980, 1992.
- [9] M.Bertalmio, L.Vesa, G.Sapiro and S.Osher: “Simultaneous Structure and Texture Image Inpainting”, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol.2, pp.707-712, 2003.



(a) 取得画像



(b) 除去画像

図 24 実験結果 2