

移動カメラによる時空間画像を用いた車両からのスペキュラ除去

阪野 貴彦 池内 克史

東京大学 生産技術研究所

E-mail: {vanno, ki}@cvi.iis.u-tokyo.ac.jp

本稿では、太陽光源の下で駐車車両列を撮影した画像列のみを用いて、車両表面に発生するスペキュラを取り除く方法について述べる。本手法では、動画像列を時系列順に積み重ねた時空間ボリューム解析をフレームワークとしており、時空間画像中での特徴点軌跡からスペキュラの挙動を捉え直した。2つの時空間ボリュームの断面であるEPIとPVIを解析することで、車両表面上にある実際のテクスチャと太陽光によるスペキュラとの違いを検出し、スペキュラのための除去をおこなった。静止している駐車車両を移動するビデオカメラから撮影したCG動画像、実動画像に本手法を適用し、スペキュラが除去できることを確認した。

Removing Specularities of Vehicles from Image Sequences by using Spacio-Temporal Images taken by a Moving Camera

Atsuhiko Banno Katsushi Ikeuchi

Institute of Industrial Science, University of Tokyo

E-mail: {vanno, ki}@cvi.iis.u-tokyo.ac.jp

This paper describes methods to remove specularities of vehicles from image sequences taken under sunlight. Specularity raises problems in vehicle recognition systems. Based on spatio-temporal image analysis, we are able to detect specularities. The motions of specularities in spatio-temporal images are so unique that specularities can be distinguished from ordinary texture. Intersecting spatio-temporal images derives two significant images: EPI and PVI. We analyzed these images to construct specular-free images. We have conducted experiments using our methods, and the results show the effectiveness the method to remove specularities from image sequences taken by a video camera in uniform straightly-line motion.

1. はじめに

高度交通システムにおいては、道路状況の把握は極めて重要な課題である。交通量の把握について、我々は固定カメラを道路に向けて設置し、画像を取得、解析することでおこなっている[1]。また、道路沿いの駐車車両の実態把握では、計測車両にカメラを取り付け、実際に計測車両が道路を走行しながら画像を取得する方法をとっている[2]。

このように、道路状況や走行・駐車車両についての情報収集には、一般に画像、特に動画像

が用いられることが多い。したがって、道路状況に関する具体的な情報の抽出は、取得した画像に処理を施すことから始まる。ところが、これらの画像は屋外で撮影されるため、天候、昼夜の照明差などの影響を大きく受けていて、画像処理を困難なものにしている。

その要因のひとつに、車体に太陽光が反射することで形成されるスペキュラが挙げられる。図12に示すように、車体に強いハイライト部分が発生することで、画像処理を困難にし、車両認識においては誤認識をもたらすことがある。

そこで本稿では、我々は車両を撮影した動画像のみを用いて、車両表面上に出現するスペキュラの除去をおこなった。動画像は等速直線運動するカメラから撮影し、時空間での解析をおこなうことでスペキュラを除去した。

2. 時空間画像について

2-1 時空間画像解析

動画像は、ある一定の時間間隔で撮影された時系列画像である。このような画像1枚1枚を時系列順に積み重ねた直方体を時空間ボリュームと呼ぶ。図1の3つの座標軸 (u, v, t) はそれぞれ、画像の横、縦、時間を示している。

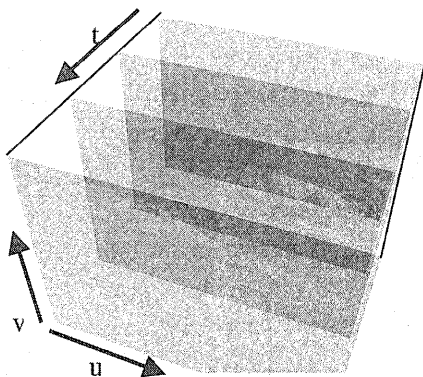


図1 時空間ボリューム

動画像取得の際の時間間隔が密、または画像中の物体の時間変化が緩やかである場合、時空間ボリュームの断面は、時間方向 t 軸に対し強い相関を持ち、時間方向に関して連続な画像が形成される。このとき、時空間ボリュームの断面画像を解析することによって、カメラの動きや画像中の物体を解析することができる。以下、本稿では、カメラが光軸に対して垂直な方向に等速直線運動をし、静止している対象物体を撮影する場合を考える。具体的には、図2のように静止している車両側面を撮影しながら、車両前方方向へ等速直線運動をするカメラを考える。これは、カメラ固定、対象物体が等速直線運動の場合でも、同様の考察が成り立つ。

まず、時空間ボリュームを水平な面、つまり v —一定の面で切断することを考える。この断

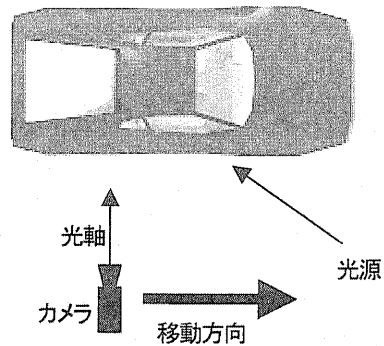


図2 光源、移動カメラ、物体の配置

面はEPI(Epipola Plane Image)と呼ばれる[3]。EPI中では、各時刻の画像面に現れる特徴点が、連続した軌跡となって現れる。今回の場合、カメラは等速直線運動をしているので、空間中に静止している特徴点は直線を描く。また、移動するカメラは、ステレオと同等とみなすことができるので、カメラから特徴点までの奥行きと、EPI上の直線の傾きには次の関係が成り立つ。

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = -\frac{fV}{Z}$$

ここで、 Z は特徴点までの奥行き、 f はカメラの焦点距離、 V はカメラの移動速度である(図3

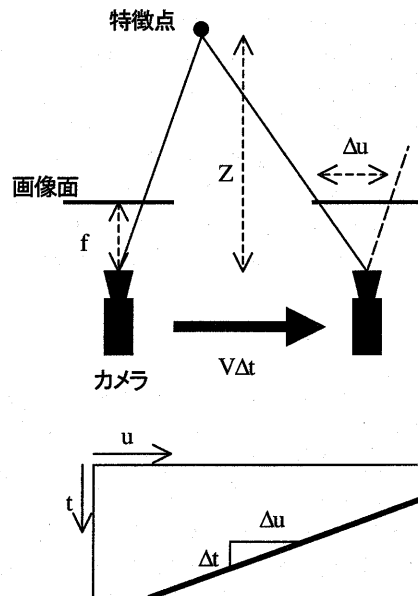


図3 奥行きとEPI軌跡との関係

参照)。これにより、カメラの移動速度が一定であるとき、カメラから遠くにあるものほど軌跡の傾きが垂直に近づき、手前にあるものほど傾きが水平に近くなること分かる。

つぎに、時空間画像を垂直な面、つまり $u =$ 一定の面で切断することを考える。この断面は縦方向のラインスキャンカメラで撮影したものと同じで、パノラマ画像になり、PVI(Panoramic View Image)と呼ばれる[4]。

以上の、時空間ボリュームと、その断面である EPI, PVI との関係を図4にまとめる。

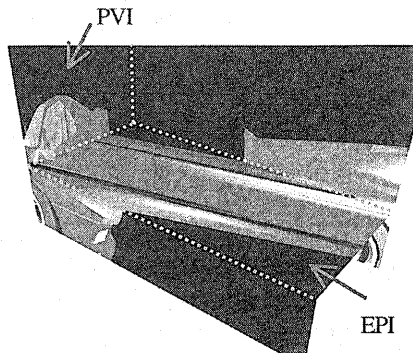


図4 時空間ボリュームとEPI, PVI

2-2 時空間画像中でのスペキュラの挙動

EPI, PVI を用いた解析は、物体のコーナー、稜線や表面テクスチャといった実際に物体表面に存在する特徴点の挙動に関するものである。一方、表面に映り込んだスペキュラは実際の物体に存在しない仮想的な特徴である。光源、物体位置、カメラ位置を変化させるとスペキュラの位置は変わってしまい、実質的にはスペキュラはノイズと見なされてしまうため、認識をおこなうときには、物体表面上のスペキュラは除去することが望ましい。

一方で、スペキュラは物体形状や光源環境を推定するための重要な情報と考え、スペキュラ位置から物体形状の復元[5]や、光源位置の推定[6]をおこなうことも可能である。

ここでは、車両側面に映り込んだスペキュラが、等速直線運動するカメラから生成した時空間画像でどのような挙動を示すかを調べる。

時空間ボリュームは、2次元に配列されたピ

クセルの集合である2次元画像(u, v)を、時間方向 t に押し出したボクセルの集合体である、と捉え直すことができる。ここで、時空間ボリューム内の各ボクセルには、対応する(u, v, t)でのRGB値を与える。このとき、各ボクセルで輝度値を計算し、Marching Cube法[7]によって等値面を形成し、視覚化した。今回は、等値面として設定する値を十分高くすることで、スペキュラ成分によって形成される多様体を取りだした。

図5に示したのは、前項で用いたCG画像列において等値輝度面の値を240としたときの多様体である。この時空間画像中には、大きく2つのスペキュラ多様体が現れている(同図点線で囲んだ部分)。EPIで形成される実際の特徴点の軌跡(前後のホイール等)が時間方向に急な傾きを持った直線を形成するのに対し、スペキュラ多様体はずんぐりとしており、時間方向に緩やかな傾きを持っている。また、他の物体によって遮蔽されることがないにもかかわらず、途中で消失していることが分かる。このように、理由は後述するが、時空間画像中ではスペキュラの挙動は、テクスチャなどの挙動とは異なっていることが分かる。

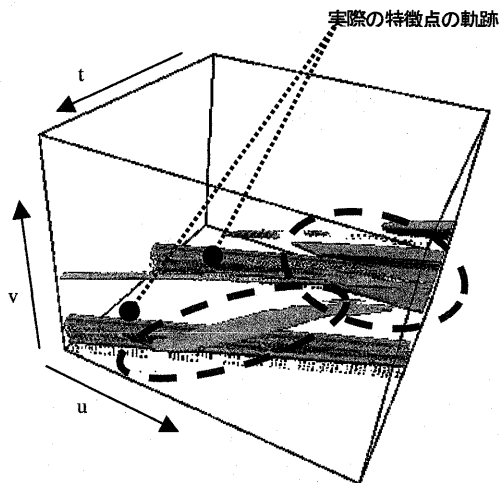


図5 時空間ボリュームに現れるスペキュラ

3. スペキュラ除去法

3-1 PVI を用いたスペキュラ除去

車両側面上に発生するスペキュラは、時空間ボリュームにおいて、ほぼ限定された範囲内に現れる。これは、スペキュラが出現しにくい領域が存在することを意味する。図5の例では、 u が小さな値をとる範囲、つまり各時刻での画像中の左側には、あまりスペキュラ多様体が出現していないことがわかる。したがって、この範囲内において $u = \text{一定}$ の PVI を生成すれば、スペキュラを含まないパノラマ画像が簡単に生成できる。

3-2 EPI からのスペキュラ除去

Sato ら[8]は物体と光源の位置関係が時間変化する状況下で、物体上の点を時系列に観察することで、スペキュラを取り除き、物体の真の色を推定した。また、Swaminathan ら[9]は、同様の考え方で EPI を利用してスペキュラを検出、除去する手法を提案した。本稿では、後者の方法を車両側面のスペキュラ除去に適用した。以下ではその手法について説明する。

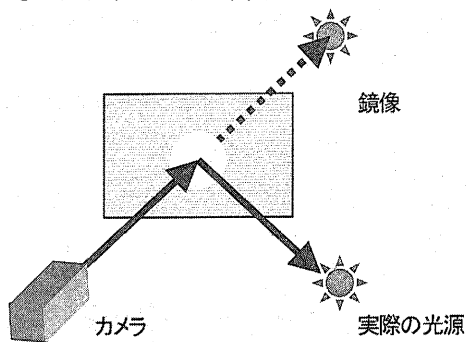


図6 光源の鏡像

車両上のスペキュラは、車両表面を鏡に見立てたとき、太陽が映り込んだものとみなすことができる。したがって、スペキュラをカメラから見ることは、反射表面を対称とした太陽の鏡像を見ていることと等価である(図6)。この状況で EPI を生成すると、太陽の鏡像であるスペキュラは、カメラから見て車両よりも遠くにあるため、スペキュラの軌跡の傾きは垂直に近くなる(図7左図)。その結果、得られる EPI 上では、緩やかな傾きに囲まれた領域内(近くにある



図7 EPIに出現するスペキュラ

物体)に、急な傾きをもつ領域(遠くにある物体)が存在することになる。ところが、幾何的な配置を考えると、近くの物体の上に、遠くの物体が見えることは、近くの物体が透明物体でない限り、あり得ない。幾何的な整合性を考えると、図7左図のように、遠くにある物体(ライトグレー)は、近くにある物体(ダークグレー)に遮蔽されるはずである。しかしスペキュラは、遮蔽されるはずの垂直に近い軌跡(白)を描いているにもかかわらず、カメラに観測される。このように、EPI 上で幾何的に整合性が合わない軌跡がスペキュラであると判断することができる。

また、車両側面は実際には平面ではなく、曲率を持った有限の大きさの曲面である。そのため、太陽の鏡像であるスペキュラが観測されるカメラの位置には制限があり、EPI 上にスペキュラが出現しつづけることは、ほとんどない(図7右図。白い部分がスペキュラ)。したがって、他の物体に遮蔽されていないにもかかわらず、時系列途中で消失する軌跡も、スペキュラであると考えられる。

以上の考察より、EPI を利用したスペキュラ除去は次のようにおこなう。

- 1 時空間ボリュームにおいて、各 $v = \text{一定}$ の EPI を生成する。
- 2 各 EPI において、傾きが最も緩やかな軌跡を Hough 変換によって取り出す。これはカメラから見て、最も手前にある特徴点の軌跡であり、車両表面であるとする。
- 3 EPI 上でのある 1 点の RGB 値の復元を考える。その点での輝度値が閾値以下で

車両表面にスペキュラが存在するとき、この最も緩やかな傾きの軌跡が、EPI 上においてスペキュラの軌跡によって遮蔽される。したがって、スペキュラを除去した後の色(RGB 値)は以下のように求める。

あるとき、その点はスペキュラではないと見なし、何もしない。閾値以上であるとき、その点はスペキュラである可能性があるので、次のステップに進む。

- 4 車両表面上の特徴点は、2で得られた傾きに沿って、同一の点が写っている。したがって、この傾きに沿って探索することで、スペキュラが外れたときのRGB値がわかる。よって、傾きに沿った探索線上でのRGB値の最低値を、その点でスペキュラを取り除いたRGB値とする。
- 5 2~4の操作を、すべてのEPIに対しておこない、元の画像列を復元する。

4. 実験

4-1 CG 動画像からのスペキュラ除去

まず、本手法によるスペキュラ除去の効果に関して、先のCG動画像を用いて予備実験をおこなった。

時系列画像中の2枚(320×240pixel)と、PVIによる画像を図8に示す。上段が元の画像列の例、中段は時空間ボリュームの中央である $u=150$ 付近、下段は左端よりの $u=50$ 付近での断面で再構成したPVIである。

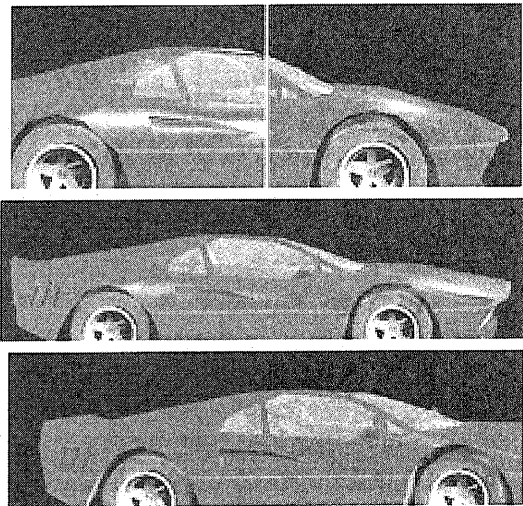


図8 時系列画像例(上)とPVI(中央・下)

もとの時系列画像中には強いスペキュラが映っているが、中段のPVIではそれが弱まり、下段では完全にスペキュラが消失している。ただし、下段の画像は、撮影したカメラの光軸から離れた方向の光線を集めて再構成しているため、幾何的に違和感のある車両になっている。

次に、EPIからスペキュラを除去した画像を図9示す。復元後は全体的にくすんだ色に変化しているが、スペキュラは完全に除去されており、幾何的にも違和感のない車両ができています。ただし、同一EPI上で最も緩やかな傾きを奥行きとして代表させているので、それとは異なる奥行きのものは、窓枠の一部のように、なくなってしまう。

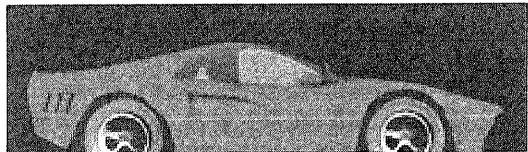


図9 EPIからのスペキュラ除去結果

4-2 実動画像からのスペキュラ除去

つぎに、太陽光源下の屋外で撮影された実画像列(480×360pixel)を用いて、スペキュラ除去をおこなった。画像列は、プローブ車に高速度ビデオカメラを取り付け、ほぼ等速で走行しながら、沿道の駐車車両を撮影した。図12に実画像列の一部を示す。車両側面には強いスペキュラが映り込んでいる。

この車両での、時空間ボリューム内におけるスペキュラの挙動を図10に示す。これは2-2項と同様、輝度値が240となるボクセルの等値面である。後部ドア窓枠の特徴点が時間方向に傾きをもった直線状の軌跡として現れているのに対してスペキュラは時間方向にほぼ一定の位置に出現する多様体として観察される。また、同図の左側にはスペキュラ多様体が現れていないことが分かる。

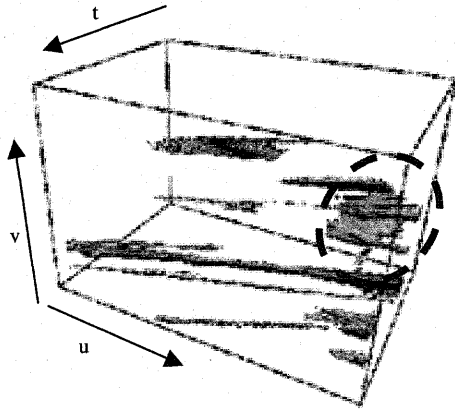


図10 実画像列の時空間ボリューム
に現れるスペキュラ

そこで、スペキュラ多様体が出現しない時空間ボリュームの中央付近でPVIを生成した(図11)。図12で見られたような強いスペキュラは消えており、PVI生成は、高速、簡単な手法であり、強いスペキュラを除去するには有効な手段であることが確認できた。ただし、スペキュラ除去のためには、あらかじめ時空間ボリューム内でスペキュラの発生していない領域を知っていなければならない。また、PVIをボリュームの中央から離れたところで生成すると、前項でも述べたように、違和感のある車両に再現されてしまう。さらに本稿では、車両のスペキュラ除去を目的としているため、あまり重要視していないが、車両の解像度を元の画像と一致させると背景のテクスチャが不自然になる、という欠点がある。これは、元の画像列が透視投影で構成されていたのに対して、PVIでは画像縦方向が透視投影、横方向が正射影になって再構成されるためである。



図11 PVIによるスペキュラ除去

次にこれらの車両に対し、EPIを用いてスペキュラを除去した結果を図13示す。図12で発

生している強いスペキュラが除去できているのがわかる。EPIでスペキュラを取り除いた後のRGB値を探索する際、閾値以下の輝度では探索しないので、輝度値の低い背景ではテクスチャが保存されている。閾値以上の点であっても、表面上に実際に存在する点(例えば白いテクスチャなど)は、EPIで探索線上に載るため、きちんと保存される。また、PVIが複数枚のスペキュラを含んだ画像から、1枚のスペキュラを除去したパノラマ画像を生成したのに対し、EPIを用いた方法では、スペキュラを含んだ画像列から、スペキュラを除去した画像列を生成できるため、動画処理に用いることが可能である。

ただし、EPIを用いた手法では動画取得後に、画像縦方向に並ぶピクセルの数だけEPIを生成し、Hough変換をおこなってスペキュラ除去後のRGB値を探索するため、計算時間がかかってしまい、リアルタイム処理には向いていない。PVIによる手法が、事前情報をもとに、各画像の一部のみを利用して高速化を可能にしているのに対し、EPIを用いた手法では、各画像のすべての情報を用いて全自動的に処理をおこなってコスト高になっている、捉えることができる。

5. まとめ

車両認識において、誤認識を引き起こす要因のひとつであるスペキュラを、時空間解析をフレームワークとして除去する方法について述べた。

時空間でのスペキュラの挙動は、通常のテクスチャとは異なる挙動を示すことを利用し、スペキュラを取り除くことができた。本稿で述べた手法では、一般道路を走行するプローブ車から取得した沿道駐車車両の画像列のみを用いており、幾何形状取得や、画像中でのスペキュラ領域のセグメンテーションを必要としていない。

今後は、さらに詳細なPVI、EPI解析によって、より正確なスペキュラ成分の検出、除去をおこなう。また、スペキュラを除去した画像を、実際の認識システムに適用することを目指す。

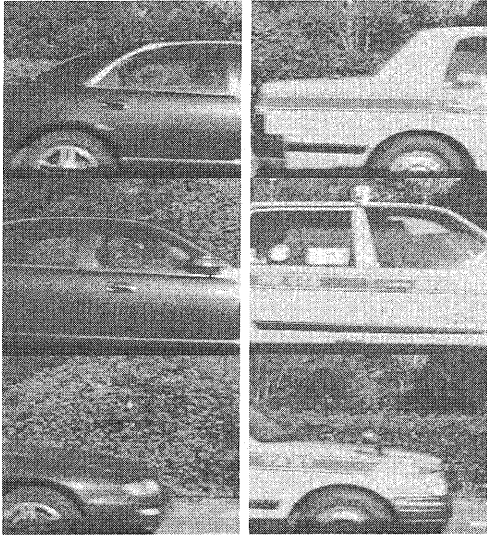


図12 実画像列の例

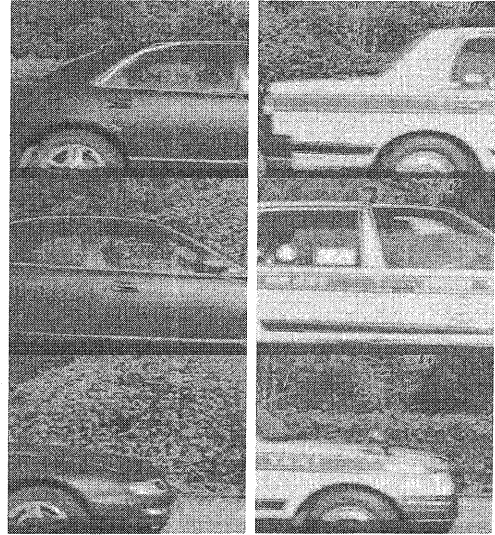


図13 スペキュラを除去した画像列

参考文献

- [1] S. Mohottala, M. Kagesawa and K. Ikeuchi, Vehicle class recognition using 3D CG, Proc. 2003 ITS World Congress, 2003.
- [2] K. Hirahara and K. Ikeuchi, Detection of street-parking vehicles from Panoramic street image, Proc. ICITS, 2003.
- [3] R. C. Bolles, H. H. Baker and D. H. Marimont, Epipolar- plane image analysis: an approach to determining structure from motion, International Journal of Computer Vision, 1, pp.7-55, 1987.
- [4] J. Y. Zheng and S. Tsuji. Panoramic representation for route recognition by a mobile robot. International Journal of Computer Vision, 9(1), pp.55-76, 1992.
- [5] M. Oren and S. K. Nayar, A theory of specular surface geometry, International Journal of Computer Vision, 24(2), pp.105-124, 1996.
- [6] 原、R. T. Tan、西野、中澤、池内 “単一カラー画像からの光源位置と光源色の推定” 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), I, pp.477-482, 2002
- [7] W. Lorensen and H. Cline, Marching cubes: a high resolution 3d surface onstruction algorithm, Proc. SIGGRAPH'87, pp.163-170, ACM, 1987.
- [8] Y. Sato and K. Ikeuchi, Temporal-color space analysis of reflection, Journal of the Optical Society of America, 11(11), pp.2990-3002, 1994.
- [9] R. Swaminathan, S. B. Kang, R. Szeliski, A. Criminisi and S. K. Nayar, On the motion and Appearance of specularities in image sequences, Proc. ECCV, 1, pp.508-523, 2002.