

## EPI 解析に基づく動画像からの鏡面反射成分の分離

阪野 貴彦 池内 克史

東京大学 生産技術研究所 〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

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

**あらまし** 本稿では、移動カメラによって撮影された画像列から鏡面反射成分を除去し、物体表面上にある実際の特徴としての拡散反射成分のみを取り出す手法について述べる。等速直線運動するカメラからの画像列に EPI (Epipolar Plane Image) 解析を施すことで、2つの反射成分の違いを検出し、鏡面反射成分を除去することで拡散反射成分のみによる画像を再構成した。本手法を用いることで、光源の反射による強いハイライトによって、物体表面上のテクスチャが隠れてしまったとしても、画像列中にその領域からハイライトが外れた画像が得られていれば、もとのテクスチャが再現できることを示す。また、光源による鏡面反射成分だけでなく、物体表面上に他の物体が映り込んだ成分も、同じ原理によって除去できることも示す。

**キーワード** EPI, 拡散反射成分, 鏡面反射成分, ハイライト

## Removing Specular Components of Image Sequences based on EPI Analysis

Atsuhiko BANNO and Katsushi IKEUCHI

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

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

**Abstract** This paper describes a method, which removes specularities from image sequences taken by a video camera in uniform straightly-line motion. Specular components, especially strong highlights, raise some problems in object recognition. Based on spatio-temporal image analysis, we are able to detect specular components and reconstruct original texture on the body as diffuse components. Analyzing the motion of specular components in EPIs (Epipolar Plane Images), we can distinguish specularities from ordinary texture. Some experiments have been conducted using our methods, and the results show the effectiveness the method to remove specularities from image sequences. Moreover, even if texture on a body is hidden by strong highlights, this method recovers the original texture.

**Key words** EPI, Diffuse reflection components, Specular reflection components, Highlight

### 1. はじめに

コンピュータビジョンやパターン認識では、与えられた画像をもとに、写っている物体の形状やテクスチャといった物体固有の特徴を抽出する処理が、不可欠な要素となっている。また、バーチャルリアリティや複合現実感等では、高度な光学的整合性を実現するため、物体の正確な反射特性を推定する方法が重要になっている。そのため、あるシーンを撮影した画像から光源による影響と、物体が持つ固有の情報とを分離する必要がある。

このとき、物体の特徴を抽出したり、光源の情報を取り出す

ために、画像から拡散反射成分と鏡面反射成分とを分離する必要がある。これまでに1枚の画像から反射成分を分離する手法は盛んに研究されてきた [1][2][3][4]。しかし、光源が物体表面に正反射して観察される強いハイライトが画像中に存在すると、物体表面のテクスチャが遮蔽されてしまい、このようなハイライトが存在すると、1枚の画像のみから元のテクスチャを復元することは不可能となり、複数枚の画像を使用することになる。

Sato ら [5] は光源方向を変化させ、4次元空間である時間—RGB 空間において、反射成分の分離をおこなった。Lin [6] らは光源位置を変化させた疎な画像列を用いての分離をおこなった。また、光源によるハイライトとは別に、滑らかな物体表面

に他の物体が映り込んだ鏡面反射に対して, Farid ら [12] は偏光を利用し, 2 枚の入力画像からそれぞれの反射成分を分離した. 最近, Swaminathan ら [7] は光源を動かすかわりにカメラを移動させることで, 反射成分を分離する手法を提案した.

本稿では, 物体表面上の鏡面反射成分を除去し, 拡散反射成分のみによる画像を再構成するために, 光源を固定し, 等速直線運動するカメラから得られた画像列を利用する. その際, 得られた時空間ボリュームの断面である EPI を解析することで, 鏡面反射成分の除去を全て自動的におこなう. 本手法により, ハイライトによって物体表面のテクスチャが見えなくなったとしても, 画像列のどこかでハイライトの外れたテクスチャが観察されれば, 元のテクスチャが再現できることを示す. また, 光源によるハイライト, 鏡面反射成分だけでなく, 他の物体の映り込みについても除去が可能であることを示す.

## 2. EPI 解析

### 2.1 EPI (Epipolar Plane Image) について

動画像は, ある一定の時間間隔で撮影された時系列画像の集合である. これらの画像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. 動画像取得の際のサンプリング間隔が密, または画像中の物体やカメラの運動が緩やかである場合, 時系列画像は時間方向に対し強い相関を持ち, その結果, 時空間ボリュームの断面は, 時間方向に対し連続な画像が形成される. この時空間ボリュームの断面画像を解析することによって, 画像中の物体やカメラの動きを解析することができる. 本研究では, 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. 図 1 に想定している撮影状況を上から見た図を示す. 図のように静止している物体を撮影しながら, 右方向へ等速直線運動をするカメラを考える.

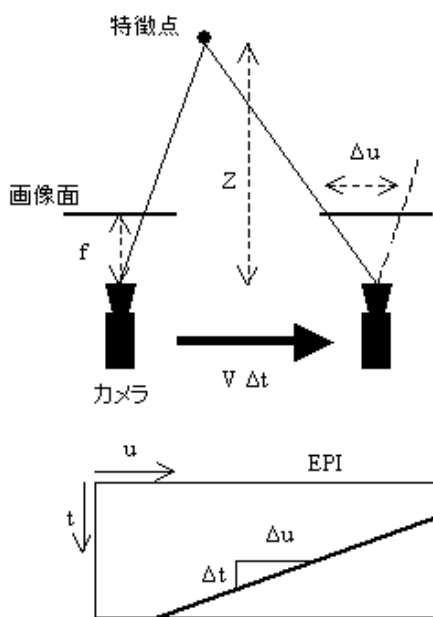


図 1 奥行きと EPI 中の軌跡との関係

形成された時空間ボリュームを画面中での水平な面で切断す

ることを考える. この断面は EPI(Epipolar Plane Image) と呼ばれる [8]. 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, 特徴点が EPI 上で描く直線の傾きとの間には次の関係が成り立つ.

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{fV}{Z} \quad (1)$$

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. 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が分かる. また,  $f, V$  が既知であれば, 得られた EPI から 3 次元形状が取得できる.

### 2.2 EPI 上での反射成分の挙動

#### 2.2.1 2 色性反射モデル

我々が知覚する物体の見えは, 2 色性反射モデルとして記述できる. 2 色性反射モデルによれば, 物体からの反射光は鏡面反射成分と拡散反射成分の 2 つの反射成分の和からなる. このモデル例として, Phong モデル [9], Torrance-Sparrow モデル [10] 等が提唱されているが, いずれのモデルにおいても, 次の 2 点が前提となっている. すなわち,

- 拡散反射成分の大きさは, 物体表面の法線ベクトルと光源方向ベクトルのなす角 (入射角) によってのみ決定され, 視線方向ベクトルに依存しない. つまり, 視点位置によって変化しない.
- 鏡面反射成分の大きさは, 入射角と反射角が等しくなった角度で最も大きくなる. つまり, 鏡面反射成分は, 視点位置によって変化する.

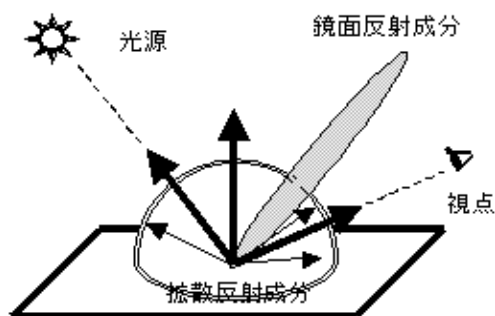


図 2 2 色性反射モデル

この 2 点を踏まえ, 対象シーン, 光源位置が固定された状態で, 視線位置を変化させる状況を考える. このとき, 対象物体表面上のある 1 点を追跡すると, 反射光の輝度値のうち, 変化するのは鏡面反射成分のみということになる. また, 視線方向が光源に対する正反射方向から大きく外れ, 鏡面反射成分の大きさが 0 になったときは, 拡散反射成分のみが得られていることになる. したがって, カメラを移動しながら, 物体上のある 1 点を観察し, RGB 値が低い値で一定となったとき, 拡散反射

成分のみが得られていることになる。また、視点を動かし、視線方向ベクトルが正反射方向近傍になったとき、物体表面にほぼ光源色に近い強い光が見えることになる。このハイライトの強さは光源の強さと物体の表面特性によって決まり、滑らかな面であれば、非常に狭い領域での強い光となる。

### 2.2.2 移動カメラから見たハイライトの挙動

ここでは、無限遠方に置かれた点光源下で、物体表面に映り込んだ光源としてのハイライト部分が、移動カメラの画像内においてどのような挙動を示すか考察する。平面、曲面上のハイライトの挙動が実際のテクスチャの挙動とどのようにちがうのかを、解析的に考察する。

曲面上の点  $(x, y)$  について、法線方向を  $\theta_n$  とすると、

$$\frac{dy}{dx} \tan \theta_n = -1 \quad (2)$$

また、表面上の点  $(x, y)$  にハイライト部分があり、その点での接線と原点との距離を  $\rho_n(\theta_n)$  とすると、

$$x \cos \theta_n + y \sin \theta_n = \rho_n(\theta_n) \quad (3)$$

反射方向よりカメラから曲面を見たとき、視点とハイライト部分を結ぶ視線と  $x$  軸となす角を  $\theta_r$  とすると、視線(直線)は、

$$x \cos(\theta_r - \frac{\pi}{2}) + y \sin(\theta_r - \frac{\pi}{2}) = \rho_r(\theta_r) \quad (4)$$

より

$$-x \sin \theta_r + y \cos \theta_r = \rho_r(\theta_r) \quad (5)$$

ここで、 $\rho_r(\theta_r)$  は、視線と原点との距離である。まとめると、

$$\begin{pmatrix} \rho_n(\theta_n) \\ \rho_r(\theta_r) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_n & \sin \theta_n \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (6)$$

上式が、2次元における光源方向—物体表面(凸包体)—視線方向の関係式である[11]。つぎに、画像面について考える。カメラは姿勢を変えずに  $x$  軸に対し平行に移動をすると仮定する。焦点距離を  $f$  画像中でのハイライト部分の  $x$  座標を  $d$  とすると、 $\tan \theta_r = f/d$  より

$$d = f \cot \theta_r \quad (7)$$

となる。

つぎに具体的な物体表面の例として平板と、原点を中心とする半径  $r$  の円をとりあげる。また、光源としては  $x$  軸上無限遠 ( $\theta_i = 0$ ) に置かれた点光源を考える。

#### I) 平板の場合

平板では、 $\rho_n$ ,  $\theta_n$  は一定である。したがって、光源が  $\theta_i = 0$  の無限遠にあれば、

$$d = f \cot \theta_r = f \cot 2\theta_n = \text{const.} \quad (8)$$

より、ハイライト部分は画像上において位置が不変となる。これは、物体表面に映り込んだ光源に限らず、平行移動するカメラから無限遠方にある物体を観察したとき、画像上での位置は

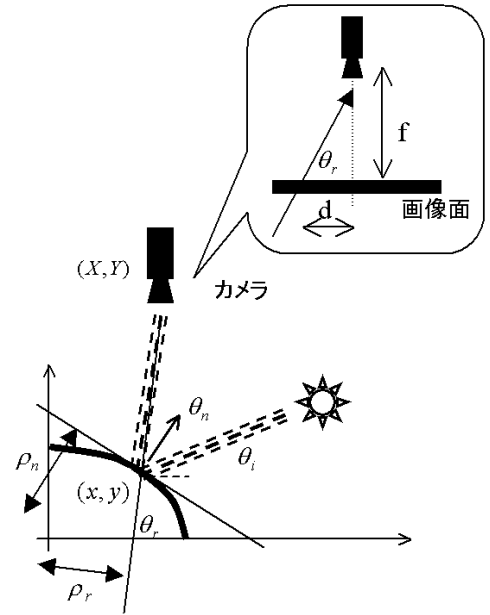


図3 光源—曲面—カメラの位置関係

不変であることに対応する。

#### II) 円の場合

表面上の点  $(x, y) = (r \cos \theta, r \sin \theta)$  にハイライト部分があるすると、

$$\theta = \theta_n = \frac{\theta_r}{2} \quad (9)$$

また、

$$\begin{aligned} \rho_r &= -x \sin \theta_r + y \cos \theta_r \\ &= -r \cos \frac{\theta_r}{2} \sin \theta_r + r \sin \frac{\theta_r}{2} \cos \theta_r \end{aligned} \quad (10)$$

カメラ  $(X, Y)$  は視線上にあるので、

$$-X \sin \theta_r + Y \cos \theta_r = \rho_r(\theta_r) \quad (11)$$

したがって、

$$X = Y \cot \theta_r + r \cos \frac{\theta_r}{2} - r \sin \frac{\theta_r}{2} \cot \theta_r \quad (12)$$

これらの式より  $\theta_r$  をパラメータとしたカメラ位置と、画像上でのハイライト位置の関係が得られた。

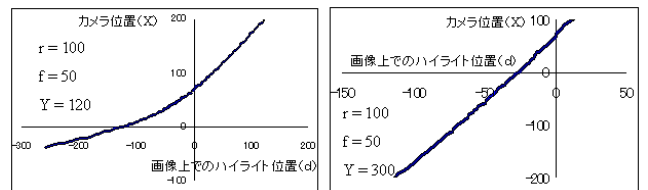


図4 移動カメラから見た画面上のハイライト位置

図4は、原点を中心とした半径  $r = 100$  の円を移動カメラから見たとき、画面上でのハイライト位置を示したものである。カメラは  $x$  軸に平行に等速で移動するので、カメラ位置  $X$  の縦

軸は時間軸としてみる事ができる。したがって上の図は EPI と同等に考える事ができる。平板では無限遠方の光源は画面中で不動であったのに対し、曲面では、光源が無遠慮にあつたとしても、カメラ位置によって変化することがわかる。図 4 の右と左の図では、曲面とカメラとの距離が異なっているが、曲面に近いカメラ (図 4 左:  $Y = 120$ ) では EPI でのハイライト軌跡は曲線になっていることがわかる。ただし、このことはカメラが大きく移動したときに初めてわかる現象であり、局所的に EPI を取り出したときは、ほぼ直線になっていて、軌跡の曲率を検知することは困難であり、実際の特徴点の軌跡と見かけ上の区別はつかない。さらに、カメラ位置が曲面から遠ざかったところ (図 4 右:  $Y = 300$ ) では、ハイライト軌跡はほぼ直線になってしまう。したがって、EPI のみを見れば、実際の特徴点と、光源の反射によって生じるハイライトは同様の挙動を示すことがわかる [7]。

このように、ハイライト (鏡面反射成分) が描く EPI 上で描く軌跡のみを見ただけでは、実際の物体上の特徴点 (拡散反射成分) なのかハイライトなのかを区別することは難しい。ただし、その傾きの大きさと、ハイライトが出現するときの幾何的な整合性を考えることで、拡散反射成分と鏡面反射成分とを分離することが可能となる。次章ではその方法について述べる。

### 3. 反射成分の分離方法

Sato ら [5] は光源の位置を任意に変化させ、物体上の点の RGB 値を観察することで、拡散反射成分と鏡面反射成分を分離した。また、Swaminathan ら [7] は、同様の考え方で EPI を利用して強いハイライト部分を検出、除去する手法を提案した。本研究では、後者の方法に基づいて、鏡面反射成分の全自動的な分離に適用した。以下ではその手法について説明する。

物体表面上の鏡面反射成分は、ハイライトが出現している物体表面を鏡に見立てたとき、光源が映り込んだものとみなすことができる。したがって、ハイライトをカメラから見ることは、反射表面を対称とした光源の鏡像を見ていることと等価である (図 5)。この状況で EPI を生成すると、光源の鏡像としてのハイライトは、カメラから見て物体表面よりも遠くにあることになる。このため、ハイライトの描く軌跡の傾きは大きくなって垂直に近くなる。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 (近くにある物体) を押しよけて、急な傾きをもつ領域 (遠くにある物体) が見えていることになる。ところが、幾何的な配置を考えると、これは矛盾である。すなわち、近くの物体の上に、遠くの物体が見えることになるからであり、これは、近くの物体が透明物体でない限りありえない。幾何的な整合性を考えると、遠くにある物体 (EPI では急な傾き) は、近くにある物体 (緩やかな傾き) によって遮蔽されるはずだからである。しかしハイライト部分は、遮蔽されるはずの急な傾きを持つ軌跡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。

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 (図 7 参照)。

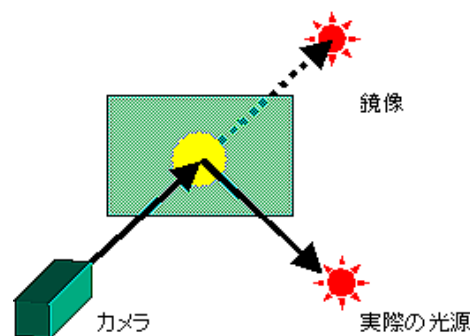


図 5 実際の光源と見かけの光源

- (1) 空間ボリュームにおいて、各断面の EPI を生成する。
- (2) 各 EPI において、Canny オペレータによるエッジ抽出をおこない、Hough 変換によって最も緩やかな傾きを取り出す。この傾きが垂直になるよう EPI に対し、アフィン変換をおこない長方形に変形する。この変換をおこなったのちに、EPI 上の垂直な線上には物体表面上の同一点が載ることになる。一方、ハイライト部分に関しては、境界が不鮮明なため、ハイライトのエッジは検出されにくい。また、エッジを抽出する画像として、シェーディングによって生成されるエッジの影響を除去するため、次式で定義される Maximum Chromaticity を画素値とする Chromaticity EPI を用いた (図 6)。

$$\text{Max.Chromaticity} = \frac{\max(R, G, B)}{R + G + B} \quad (13)$$

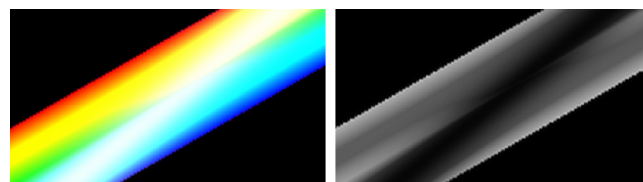


図 6 EPI(左) と Chromaticity EPI(右)

物体表面にハイライト等の鏡面反射成分が存在するとき、EPI 上では、緩やかな傾きの軌跡の上に、より大きな傾きを持つ軌跡が載っていた。したがって、アフィン変換後、ハイライトの軌跡は垂直にならず、傾きを持った軌跡になる。そこで、鏡面反射成分を除去を以下のようにおこなう。

- (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あるとき、その点には鏡面反射成分はないと見なし、何もしない。閾値以上であるとき、その点に鏡面反射成分が含まれている可能性があるため、次のステップに進む。
- (4) 物体表面上の特徴点は、アフィン変換後の EPI の垂直線上に同一の点が写っている。したがって、この垂直線に沿って探索することで、鏡面反射成分が外れたときの RGB 値がわかる。つまり、探索線上での RGB 値の最低値を、その点の拡散反射成分による RGB 値とする。
- (5) 探索線上の最低の RGB 値で置き換えた長方形に対し、先のアフィン変換の逆変換をおこない、元の平行四辺形の形状に戻す。

(2)~(5)の操作を、すべてのEPIに対しておこない、拡散反射成分のみによる時空間ボリュームを再構成する。あとは、このボリュームから時系列画像として1枚ごとの画像を取り出すことで、鏡面反射成分の除去された画像を得ることができる。また、原画像から拡散反射成分のみによる画像を引くことで、鏡面反射成分を取り出すことができる。

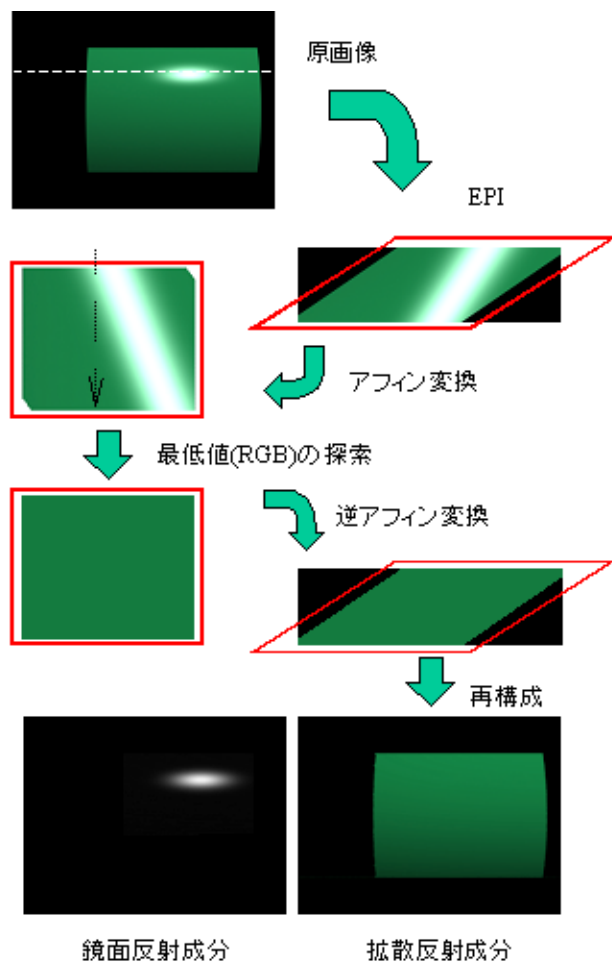


図7 EPIからの拡散—鏡面反射成分分離の流れ

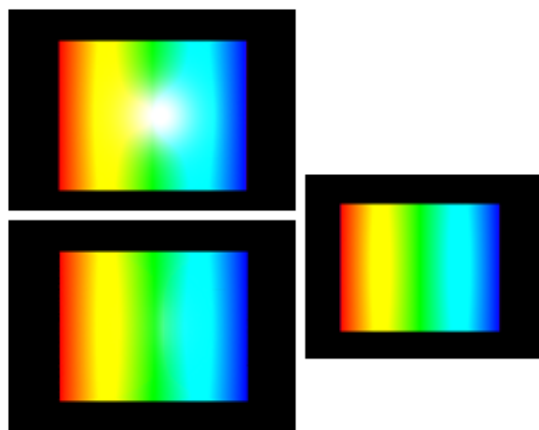


図8 テクスチャのある表面での例  
左上—原画像, 右上—正解(使用したテクスチャ), 左下—復元画像

#### 4. 実験結果

ここでは、合成画像の画像列から鏡面反射成分を除去した数例を示す。まず図8に、テクスチャのある物体表面上の鏡面反射成分を除去したものを示す。本手法では、強いハイライトが存在しても、鏡面反射成分が観察されない画像を元に拡散反射成分を再現しているため、テクスチャのある物体表面であっても、再現可能である。復元した画像と、原画像に使用したテクスチャを比較すると、テクスチャを正確に再現していることがわかる。

つぎに、物体表面に他の物体が映り込んだものに対し、EPIを用いて反射成分を除去する。これも、原理的には、光源による鏡面反射成分の除去と同じである。図9ではテクスチャのある平板表面に、手前の円柱が映り込んでいる。カメラから見ると、平板に映り込んだ円柱は、平板より後方にある鏡像であるため、EPIでは平板上の特徴点が描く軌跡よりも傾きの急な軌跡を描くことになる(図9中央)。したがって、前章の考察どおり、EPIを用いて鏡面反射成分を除去することができた。

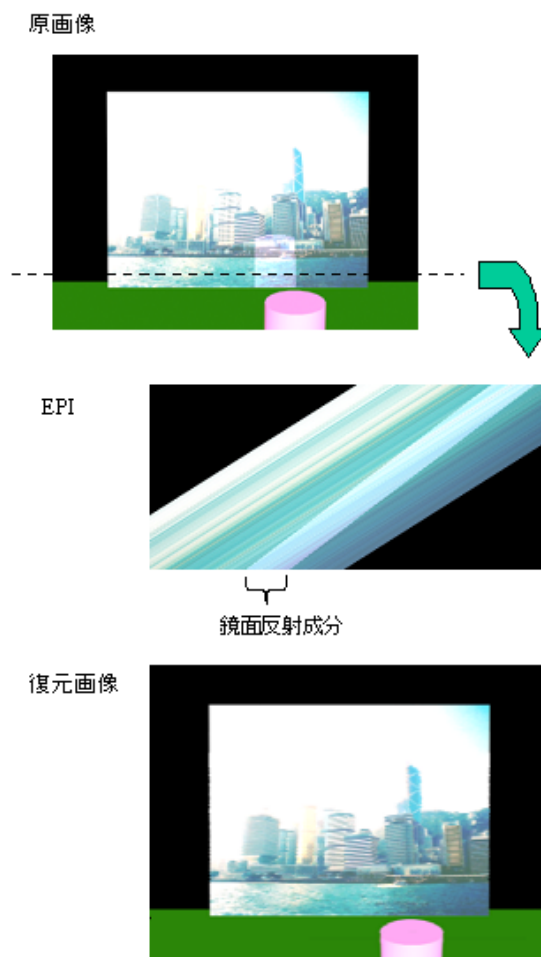


図9 他の物体が映り込んだ表面での例

次はシーン内に奥行きがある場合の例である。カメラから物体までの距離に比べて、シーン中の奥行きが無視できるほどの短さであれば、移動するカメラで得られる画像は射影変換ではなく、アフィン変換で近似することができる。このとき奥行き

のあるシーンに対しても、同じ手法を用いて鏡面反射成分を除去することができる(図10)。カメラ光軸に対して傾きをもって置かれた物体表面に関しても、鏡面反射成分が除去され、元のテクスチャが復元されていることがわかる。また、白色のテクスチャであっても完全に復元できていることがわかる。

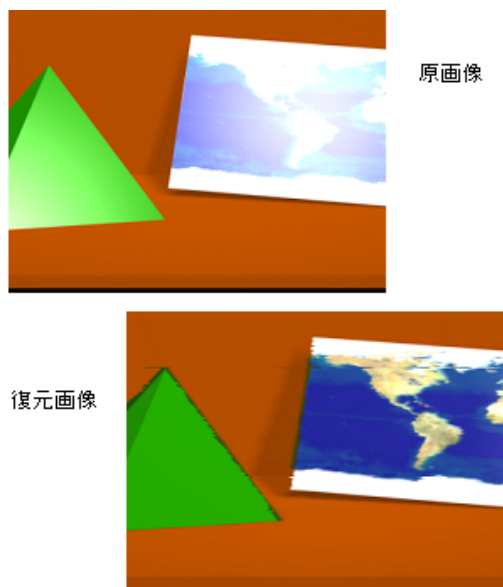


図10 奥行きのあるシーンでの鏡面反射成分除去

最後に、実画像についてハイライトの除去をおこなった(図11)。使用した画像列は、太陽光源の下で路上に駐車してある車両を、等速で走行する計測車両に搭載したビデオカメラにより撮影したものである。画像シーンは奥行きを持っているが、強いハイライトは、カメラから最も近い車両表面上にのみ存在するものとした。

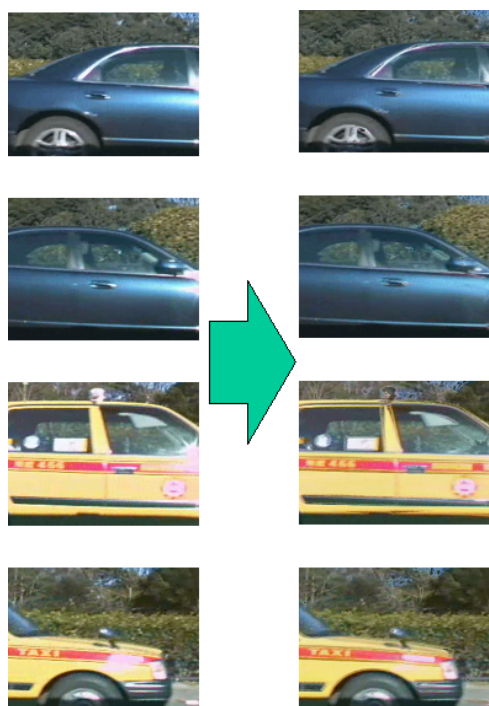


図11 実画像での例

屋外環境での実画像においても同様に、鏡面反射成分の除去ができていることが分かる。また、太陽光源による強いハイライトによって、タクシー車両表面の文字が見えなくなってしまったものに対しても、鏡面反射成分除去によって復元ができている。

## 5. まとめ

本稿では対象シーンと光源を固定した状態で、等速直線運動するカメラから得られた画像列を用いて、物体表面の鏡面反射成分を除去する方法について述べた。本手法では、EPI上において鏡面反射成分を除去したものを再び画像列に再構成することによって、強いハイライトや他の物体の映りこみも除去でき、元のテクスチャを復元することができた。今後は、さらに複雑なシーンに関する鏡面反射成分除去や、幾何形状・光源情報の同時推定等をおこなっていく予定である。

## 文 献

- [1] S.Shafer, Using color to separate reflection components, Color Research and Applications, vol. 10, no. 4, pp. 210-218, 1985.
- [2] R.Bajscy, S.W.Lee and A.Leonardi, Detection of diffuse and specular interface reflections by color image segmentation, International Journal of Computer Vision, vol.17, no. 3, pp. 249-272, 1996.
- [3] R.T.Tan and K.Ikeuchi, Separating reflection components of textured surfaces using a single image, Proc. of ICCV, pp. 870-877, Oct. 2003.
- [4] 原健二, R.T.Tan, 西野恒, 中澤篤志, 池内克史, "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), vol. 1, pp. 477-482, Jul, 2002.
- [5] Y.Sato and K.Ikeuchi, Temporal-color space analysis of reflection, Journal of the Optical Society of America, vol. 11, no. 11, pp. 2990-3002, Nov. 1994.
- [6] S.Lin and H.Y.Shum, Separation of diffuse and specular reflection in color images, Proc. of CVPR, vol. 1, pp. 341-346, 2001.
- [7] R.Swaminathan, S.B.Kang, R.Szeliski, A.Criminisi and S.K.Nayar, On the motion and appearance of specularities in image sequences, Proc. of ECCV, vol. 1, pp. 508-523, 2002.
- [8] 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, vol. 1, pp. 7-55, 1987.
- [9] B.T.Phong, Illumination for computer generated pictures, Communications of the ACM, vol. 18, no. 6, pp. 311-317, Jun. 1975.
- [10] K.E.Torrance and E.M.Sparrow, Theory of off- specular reflection from roughened surfaces, Journal of the Optical Society of America, vol. 57, pp. 1105-1114, 1967.
- [11] M.Oren and S.K.Nayar, A theory of specular surface geometry, International Journal of Computer Vision, vol. 24, no. 2, pp. 105-124, 1996.
- [12] H. Farid and E.D.Adelson, Separating reflections from images using independent components analysis, Journal of the Optical Society of America, vol. 16, no. 9, pp. 2136-2145, Sep. 1999.