

未知の物体に映る鏡像を用いた隠れた物体の3次元復元

飯田 光樹^{1,,a)} 坂上 文彦^{1,,b)} 佐藤 淳^{1,,c)}

概要: 本稿では、未知の物体に映る鏡像を基に、他の物体などに隠されて見えない対象物体を3次元復元する手法を提案する。自動車事故発生の原因として死角からの急な飛び出しや前方死角における停止車両の存在などが挙げられる。このような事故を回避するためには、早い段階で死角に存在する対象物体を検出する必要がある。そこで本研究では、自車カメラから観測可能な他車のボディに映りこんだ鏡像を用いることで、死角に存在する対象物体を3次元復元する。しかし観測可能な車両であってもそのボディ形状は一般に未知である。そこで本研究では、鏡面物体として用いる観測可能な他車の形状と死角に存在する対象物体の形状とを鏡像から同時復元する手法を提案する。

キーワード: 死角, 3次元復元, 映り込み, 多視点画像, Bスプライン

Recovering Hidden Objects from Mirror Images Reflected on Unknown Objects

Abstract: In this paper, we propose a method for recovering the 3D structure of invisible objects by using mirror images reflected on unknown objects. The causes of car accidents include sudden jumping out from blind spot and the presence of a stopped vehicle in the front blind spot. Thus, in this research, we recover the target object existing in the blind spot by using mirror images reflected on the body of other vehicles that can be observed from the own vehicle camera. However, the body shape of the observable vehicle is unknown in general. Thus, in this research, we propose a method for simultaneously recovering the shape of observable vehicles used as mirror objects and the position of the target object existing in the blind spot from the mirror images.

Keywords: blind spot, 3D reconstruction, multiple view images, B spline surface

1. はじめに

近年、自動車の智能化は日に日に進展しており、自動ブレーキや自動運転などが実用化されつつある [1]。そのような技術発展の中で今後対応が求められる事故のケースとして、死角からの急な飛び出しや道路上の死角に存在する停止車両などの衝突事故などが挙げられる [2], [3]。このような事故では、飛び出した物体や停止車両を視認してから事故を回避することは難しく、早い段階で死角に存在する対象物をドライバーが認識する必要がある。死角に存在する物体を視認する手段として、道路上の危険な箇所には

図1に示すようなカーブミラーが設置されており、これによって直接見えない箇所の状態をドライバーが確認できるようになっている。

しかし、カーブミラーは常に設置されているわけではなく、特に走行レーン前方において前を走る車の先で停止している車両などの死角情報に関しては、既存のミラーに頼ることはできない。そこで本研究では、近傍を走る他車の車体をミラーの代わりに用いることで、死角に存在する物体を3次元復元する方法を考える。図2は、前方車両に遮られてその先が見えない場合の例であるが、このような場合においても自車の側方に存在する車両には前方車両の先の様子が映っていることがわかる。このため、このような他車への映り込みを用いることで、死角となって見えない箇所の3次元情報を復元することができると考えられる。

¹ 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

a) iida@cv.nitech.ac.jp

b) sakaue@nitech.ac.jp

c) junsato@nitech.ac.jp



図 1 カーブミラーによる死角の把握

Fig. 1 Observation of the blind spot with a curved mirror.



図 2 ミラー代わりに利用する車体

Fig. 2 Car body used as a mirror.

しかし、図 2 の左側の車体の様子から分かるように、車体はカーブミラーなどとは異なり、その 3 次元形状は複雑に変化しており、またその形状は車両ごとに異なる。このため車体への映り込みも車体の形状に応じて複雑に歪む。したがって、車体への映り込みを基に死角の 3 次元情報を得るためには、車体の 3 次元形状を推定し、車体上の鏡像の歪みを取り除く必要がある。そこで、本研究では自車カメラから観測可能な他車の車体に映り込んだ鏡像を用いることで、他車の車体の形状と死角に存在する対象物体の位置や形状を同時復元する手法を提案する。

2. 従来技術と本研究のアプローチ

自車両から直接観測可能な範囲において死角を除去する技術は、近年大きな進化と遂げている [5], [6]。一方で、自車両からでは直接観測できない死角領域の情報を可視化する技術はまだ研究途上にある。これまでに、他車両に搭載されたカメラと自車両カメラを協調することで、自車からでは観測できない死角領域の様子を可視化する技術 [7] などが提案されている。しかしこれらの手法では、他の車両との画像通信を必要とするため、実用化が容易ではない。そこで本研究では、他の車両への映り込みを用いて、自車両からでは死角となって見えない領域の 3 次元情報を復元することを考える。

ミラーを用いた画像処理技術として、神原ら [8] は球状の鏡面物体を様々な移動させ、その移動する球面鏡への映り込みを用いることで、周囲の 3 次元形状の復元を実現している。しかし、この手法では鏡面物体の形状は既知である必要がある。また、Aswin ら [9] は未知の鏡面物体への映

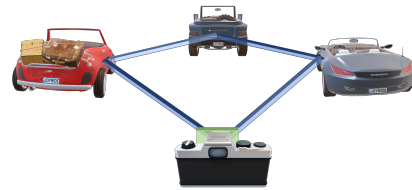


図 3 死角に存在する物体の車両への映り込み

Fig. 3 Reflection of objects in the blind spot.

り込みを用いることで、その鏡面物体の 3 次元形状を復元する手法を提案している。しかし、この手法では周囲環境やカメラと鏡面物体の位置関係を既知とする必要があり、位置関係の把握に特殊な装置を必要としている。

このように、鏡面物体に映った鏡像を用いることで周囲環境や鏡面物体の 3 次元形状を復元する研究は数多く行われているが、これらの研究では、対象とする周囲環境もしくは鏡面物体形状のいずれか一方は既知、あるいは別の手段で取得可能であることを前提としていた。一方で、本研究で考える自動車の走行環境では、対象物体の位置や形状は未知であり、また鏡面物体として用いる他車の形状も未知である。

そこで、本研究では、1 台のカメラで撮影した画像のみを用いて、歪んだ鏡面物体の形状とそこに映り込む対象物体の位置や形状を同時復元し、死角に存在する物体の位置や形状の推定を行う手法を提案する。

3. 死角に存在する物体の車両への映り込み

今、図 3 に示すように、前方に存在する物体から出た光が左右に存在する車両で鏡面反射し、その光が自車のカメラによって観測されているとする。一般に物体面における反射では、鏡面反射成分と拡散反射成分が存在する。自動車のボディのようによく磨かれた面では強い鏡面反射を行うが、拡散反射も行う。このため、図 3 に示す前方の物体（車両）における拡散反射光が、左右の車両のボディ面で鏡面反射し、カメラによって観測される。この結果、図 2 に示すように、前方の様子がカメラで観測される。以降では、図 3 の前方の物体のように死角に存在する復元対象の物体を対象物体と呼び、図 3 の左右の車両のように対象物体の光を反射する物体を鏡面物体と呼ぶことにする。

対象物体から出た光線は空気中を移動し、図 4 に示すように鏡面物体に到達する。このとき、この鏡面に入射する入射光（赤色矢印）は鏡面物体（青色面）において鏡面反射し、鏡面の法線（黄色矢印）に対して入射角と反射角が等しくなる方向に反射する。この光線を反射光（緑色矢印）とし、入射光のベクトルを F 、反射光のベクトルを R 、法線ベクトルを N とすると、反射光ベクトル R は次式のように入射光ベクトル F と法線ベクトル N を用いて表せる。

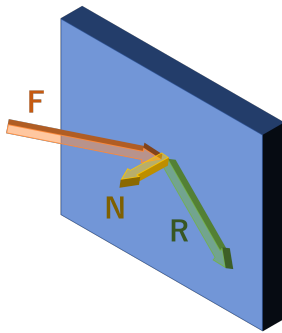


図 4 光線の鏡面反射

Fig. 4 Specular reflection of a light ray.

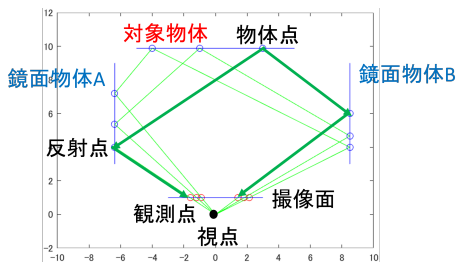


図 5 2つの鏡面物体における光線経路

Fig. 5 Ray path in two mirrored objects.

$$R = F - 2(F \cdot N)N \quad (1)$$

この反射光 R は、さらに空気中を移動し、カメラの撮像面で観測される。一方で、先ほどと同じ物体上の点から出た光線が、先とは異なる鏡面物体においても同様に反射し、その反射光も図 3 に示すように撮像面で観測することができる。すると、このような複数の鏡面物体に映る鏡像を用いることで、1枚の画像において複数の方向から観測した対象物体の情報を得ることができる。

ここで、鏡面物体の形状について考えると、同じ入射方向の光線であっても、鏡面物体の形状によって反射する方向は大きく変化する。しかし、鏡面物体の形状をそのまま推定すると推定すべきパラメータの数が大きくなり、推定に必要な情報量も増えることになる。また、本研究では光線の反射方向の計算を行うが、このためには推定した形状を微分して法線を計算しなければならず、反射方向の計算が複雑になる。

そこで、本研究では鏡面物体の曲面形状を、場所ごとに異なる法線を持つ平面として近似することにする。このような近似は、車両のボディ面のように、大局的には平面的であるが局所的には形状が大きく変化しているような物体に対して有効である。

また、図 3 のように走行中の自動車同士の位置関係は、多くの場合互いに平行である。このため車両の側面はカメラの光軸に対してほぼ平行であり、背面はカメラの光軸に対してほぼ垂直であると考えられる。本研究では推定すべきパラメータを可能な限り減らすため、この位置

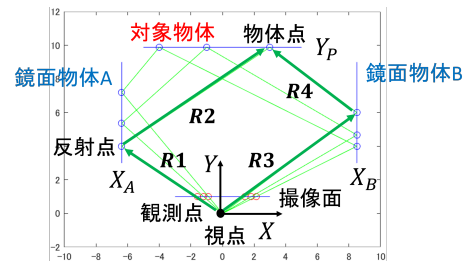


図 6 法線が均一である場合における光線の様子

Fig. 6 The appearance of light rays when the normals are uniform.

関係を用い、鏡面物体はカメラの光軸に対して平行に存在し、対象物体は光軸に対して垂直に存在しているものと仮定することにする。

これらの仮定のもとで、本研究における状況を 2次元平面上で簡易的に示したものが図 5 である。このとき、緑の矢印が光線の経路を表しており、対象物体上の同じ物体点から異なる方向に出た光線が同一の撮像面上で観測される様子を表している。次節では、これらの条件下で対象物体と鏡面物体を復元する手法について述べる。

4. 法線が均一である場合の推定手法 (提案法 1)

まず、鏡面物体の法線が均一であると仮定した場合の復元法について説明する。本稿では、これを提案法 1 と呼ぶことにする。

3 節で説明したように、対象物体から出た光線が鏡面物体で反射し、撮像面で観測されたとする。本手法ではこの光線の経路を逆に追跡することで、隠れた対象物体の位置を推定する。

今、視点から撮像面上の観測点に向かうベクトルを I とすると、視点から鏡面物体上の反射点へ向かうベクトル R は、以下のように表すことができる。

$$R = \alpha I \quad (2)$$

ここで、 α は正の実数である。

このとき、3 節と同様な状況を 2次元平面上において表した図 6 を考える。図 6 の緑矢印に示すように、ベクトル R_1, R_2, R_3, R_4 を定義したとき、視点から撮像面に向かうベクトルを鏡面物体ごとにそれぞれ I_A, I_B とすると、ベクトル R_1, R_2, R_3, R_4 はそれぞれ以下のように表せる。

$$R_1 = \alpha I_A \quad (3)$$

$$R_2 = R_1 - 2(R_1 \cdot N_A)N_A \quad (4)$$

$$R_3 = \alpha I_B \quad (5)$$

$$R_4 = R_3 - 2(R_3 \cdot N_B)N_B \quad (6)$$

ここで、 N_A と N_B は鏡面物体 A と鏡面物体 B の法線ベクトルである。鏡面物体の法線がそれぞれの鏡面上において

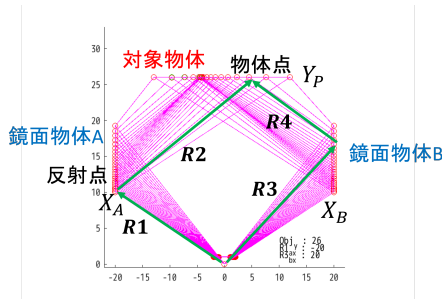


図 7 法線が不均一である場合における光線の様子

Fig. 7 The appearance of light rays when the normals are non-uniform.

均一であるとする、 N_A は $[1, 0]^T$ の単位ベクトル、 N_B は $[-1, 0]^T$ の単位ベクトルとなる。

ここで、図 6 に示すように、視点から鏡面物体 A に向かい鏡面物体 A で反射して物体点へ到達するベクトル $R1 + R2$ と、鏡面物体 B で反射し物体点に到達するベクトル $R3 + R4$ は、同じ物体点に到達する。したがって、これらのベクトルの間には以下の関係が成り立つ。

$$R1 + R2 = R3 + R4 \quad (7)$$

本研究では、(7) 式が成り立つように鏡面物体と対象物体の推定を行う。このため、本手法で用いる損失関数は、次式のように表すことができる。

$$Loss = \sum_{i=1}^L \|(R1_i + R2_i) - (R3_i + R4_i)\|^2 \quad (8)$$

ここで、 L は光線追跡によって到達する対象物体上の物体点の数である。このとき、条件として鏡面物体は平面であるとしているため、 $R1$ と $R3$ の X 座標の値がそれぞれすべて同一であるという制約をかける。同様に、対象物体も平面であると仮定し、 $R1 + R2$ の Y 座標の値も全て等しいという制約をかけることにする。これらの制約のもとで式 (8) に示す損失関数を最小化するよう左右の鏡面の X 座標と対象物体の Y 座標を推定することで、対象物体の位置を推定することができると思われる。

5. 法線が不均一である場合の推定手法 (提案法 2)

次に鏡面物体の法線が不均一である場合において鏡面物体と対象物体を推定する提案法 2 について説明する。

鏡面物体の法線が不均一である場合における光線の様子を図 7 に示す。図 7 に示すように、この場合には光線 $R2$ と光線 $R4$ は複雑に交差する。提案法 2 では提案法 1 とは異なり、鏡面物体の法線分布が均一ではないことから、この鏡面物体の不均一な法線分布を対象物体の位置と同時に推定する必要がある。

本研究では推定すべきパラメータの数を減らすため、鏡面物体における法線分布を B スプライン曲面を用いてパラ

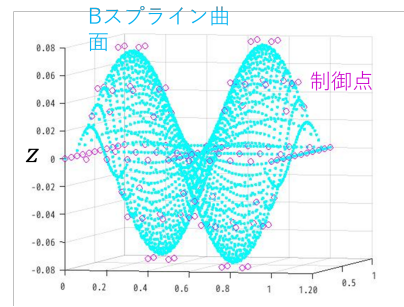


図 8 B スプライン曲面と制御点

Fig. 8 B-spline curved surface and control points.

メトリックに表現する。そこで次に、B スプラインによる 3 次元空間中の曲面の表現について述べる。

5.1 B スプライン曲面による法線の表現

B スプライン曲面 [12] は、図 8 に示すように複数の制御点の位置を変えることで任意の曲面を表すものであり、コンピュータグラフィックスでは 3 次元形状を表現するために広く用いられている。このとき p, q をパラメータとする 3 次元曲面 $\mathbf{x}(p, q) = [x, y, z]^T$ は M 次の B スプライン関数によって以下のように表される。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} N_i^M(p) \cdot N_j^M(q) \cdot \begin{bmatrix} x_{ij}^B \\ y_{ij}^B \\ z_{ij}^B \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、 $[x_{ij}^B, y_{ij}^B, z_{ij}^B]^T$ ($i = 0, \dots, I-1; j = 0, \dots, J-1$) は $I \times J$ 個の制御点であり、その配置に応じて曲面の形状を制御できる。また、 N_i^M は M 次の B スプライン基底関数であり、ノットベクトル $t = [t_0, t_1, \dots]$ を用いて以下のように定義される。

$$N_i^M(p) = \frac{p - t_i}{t_{i+M} - t_i} N_i^{M-1}(p) + \frac{t_{i+M+1} - p}{t_{i+M+1} - t_{i+1}} N_{i+1}^{M-1}(p) \quad (10)$$

$$N_i^0(p) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_i \leq p \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

また、パラメータ p, q を x, y と対応付けることで曲面上の点の z 座標を次式のように表現することができる、

$$z(x, y) = \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} N_i^M(x) \cdot N_j^M(y) \cdot z_{ij}^B \quad (11)$$

式 (11) により、曲面の z 座標を各座標 (x, y) の関数として表現することができる。したがって、この B スプライン曲面の $I \times J$ 個の制御点 z_{ij}^B ($i = 0, \dots, I-1; j = 0, \dots, J-1$) を変化させることで、任意の z 座標の分布を表現することができる。

なお、この表現では分布の連続性を仮定しているため、分布内に不連続な境界がある場合には表現が難しい。しか

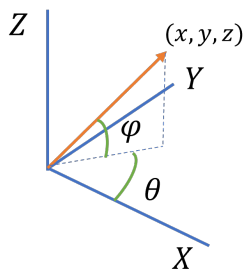


図 9 法線の表現

Fig. 9 Representation of surface normal.

しこのような場合でも、制御点数を増加させることで近似的に分布を表現することができると考えられる。

次に鏡面物体の法線分布を表現する場合を考える。このとき、法線は面に対して垂直な単位ベクトルである。そのため、法線は2つのパラメータを用いて表すことができる。ここで法線ベクトルの方向を図9のように方位角 θ と仰角 ϕ で表すとすると、単位法線ベクトル $\mathbf{N} = [x, y, z]$ は2つのパラメータ θ および ϕ を用いて次式のように表すことができる。この式は $\theta = 0, \phi = 0$ のときに、 $[x, y, z]^T = [1, 0, 0]^T$ となり x 軸方向の単位法線ベクトルとなる。

$$\begin{cases} x = \cos \theta \cos \phi \\ y = \cos \theta \sin \phi \\ z = \sin \theta \end{cases} \quad (12)$$

本研究では、3節で述べたように、各点において法線方向が異なる平面として曲面形状を近似的に表現するが、その際に平面上の各点によって異なる法線の分布を少ないパラメータによって表現するために、先に述べたBスプライン曲面を利用する。(11)式に示すように、Bスプライン曲面を用いることで z 座標を x と y の関数として表現することができた。そこで本研究では、 z 座標の代わりに法線方向を表す θ と ϕ をそれぞれBスプライン曲面で表現することで、2つのBスプライン曲面によって法線分布を表現する。すなわち、法線のパラメータである θ と ϕ を次式のように表す。

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_\theta(x, y) \\ z_\phi(x, y) \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで、式(13)の $z_\theta(x, y)$ と $z_\phi(x, y)$ はそれぞれ式(11)に示すBスプライン表現である。

式(13)により、平面の上の点 (x, y) における法線をパラメトリックに表現することができる。以降では、式(13)の右辺を関数 $BTP(z_\theta(x, y), z_\phi(x, y))$ として表すことにする。

5.2 Bスプライン曲面を用いた推定手法

提案法2の損失関数は提案法1の損失関数である式(8)から以下のように変化する。

$$Loss = \sum_{i=1}^L \|(R1_i + R2_i(z^B)) - (R3_i + R4_i(z^B))\|^2 \quad (14)$$

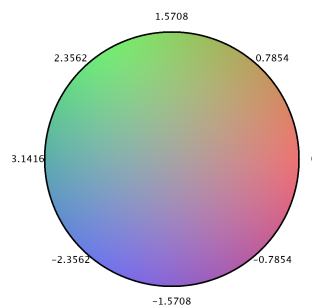


図 10 法線方向のカラーマップ

Fig. 10 Color map for surface normal

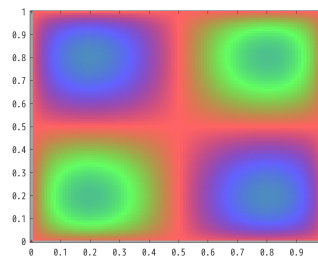


図 11 カラーマップによる法線表現の例

Fig. 11 Example of surface normal representation

ここで z^B は鏡面物体の法線分布をBスプライン曲面で表したときの制御点である。この損失関数は鏡面物体の法線分布を表すBスプライン曲面の制御点 z^B によって損失関数が増加することを表している。

この場合においても、 $R1$ から $R4$ の4つのベクトルは式(3)のように表せる。このときの法線 N_A と N_B は5.1項の式(13)で示したように、以下のようにBスプライン関数を用いて表すことができる。

$$N_A, N_B = CNV(BTP(z_\theta(x, y), z_\phi(x, y))) \quad (15)$$

ここで、 $CNV()$ は式(12)を用いて、極座標系によって表現された法線を直交座標系における単位ベクトル $[x, y, z]^T$ に変換する関数である。これによって、鏡面の位置ごとに異なる法線に応じて反射方向の推定を行うことが可能になる。

また、この法線分布の表現として本研究ではカラーマップを用いる。本研究で使用するカラーマップは図10に示すものを使用する。このカラーマップは中心が $\phi = 0$ と対応しており、カラーマップ内の位置に対して、中心からの長さが ϕ であり、 x 軸(点線)からのなす角 θ に対応して色分けがされているものである。このカラーマップをもとに鏡面上の法線の方向を色づけすることで、図11のように、色によって鏡面物体上の法線の分布を表現する。ここで図11は θ の分布が図8の形状を持つ場合の例である。

6. 実験結果

本節では、4,5節で述べた提案法1と提案法2に関する実験を行い、これらの手法の評価を行う。

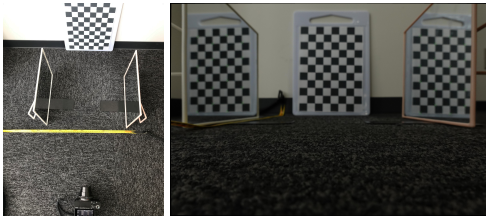


図 12 法線が均一である場合における実画像実験の実験環境 (左) とカメラ画像 (右)

Fig. 12 Experimental environment (left) and camera image (right) of a real image experiment when the normals are uniform.

表 1 実画像における提案法 1 を用いた実験の結果 (cm)

Table 1 Results of an experiment using the proposed method 1 in a real image (cm).

	対象物体の Y 座標
真値	68.50
推定値	69.55
推定誤差 (E)	1.05

事故の回避において重要となるのは対象物体までの距離である。そこで本実験では、次式に示す対象物体の Y 座標 (カメラ光軸方向の距離) の真値と推定値との推定誤差 E を評価した。

$$E = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \|Y_p - \hat{Y}_p\| \quad (16)$$

ここで、 L は物体点の数、 Y_p は対象物体の Y 座標、 \hat{Y}_p はその推定値を表す。なお、本実験においては Zhang ら [14] のカメラ校正手法を用いて、事前にカメラの校正を行った。鏡面物体には、平らな鏡と曲面形状を持つ自動車のミニチュアを用いた。また、不定性解消のため鏡面物体 A と B の位置は既知とした。

6.1 法線が均一である場合の実験結果

まず、法線が均一である場合における推定結果を示す。本実験では、図 12(左) に示すように、カメラに対して対象物体が映り込むように対象物体と鏡面物体 A、B を配置した。

この配置で撮影した際に得られたカメラ画像を図 12(右) に示す。この画像中において 16 点の対応点を取り、16 本の拘束式を用いて提案法 1 により推定を行った。その推定結果を表 1 と図 13 に示す。図 13 の赤丸が復元した物体点を表しており、緑丸が鏡面物体 A の反射点、青丸が鏡面物体 B の反射点を表している。シアン色で示した点線は追跡した光線の経路を表している。

図 13 をみると、推定した物体点の位置が鏡面物体 A で反射してきた場合と鏡面物体 B で反射してきた場合とでわずかにずれていることが分かる。これは実画像において取得した特徴点の位置に誤差が含まれているためであると考

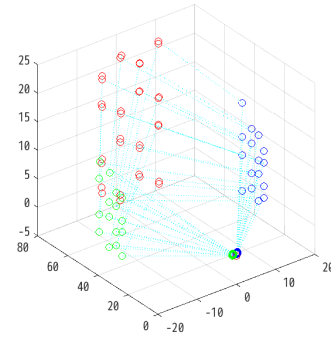


図 13 提案法 1 を用いた実画像実験の推定結果

Fig. 13 Estimated result of real image experiment using the proposed method 1.

表 2 実画像における提案法 2 を用いた実験の結果 (cm)

Table 2 Results of an experiment using the proposed method 2 in a real image (cm)

	対象物体の Y 座標
真値	19.50
推定値	16.90
推定誤差 (E)	2.60

えられる。しかし、表 1 の対象物体の位置を比較すると推定誤差は 1.05cm であり、カメラから対象物体までの距離が 68.5cm であることを考慮すると、十分小さい値であることが分かる。この結果より、実画像実験において提案法 1 の有効性を確認することができた。

6.2 法線が不均一である場合の実験結果

次に、鏡面物体の法線が不均一である場合における実験結果を示す。本実験における各物体の配置の様子を図 14(左) に示す。また、このとき撮影して得られたカメラ画像を図 14(右) に示す。

この画像より 22 組の対応点を取得し、22 本の拘束式を用いて提案法 2 を用いて推定を行った。この推定結果を表 2 と図 15 に示す。図 15 の赤丸は復元した物体点を表しており、緑丸は鏡面物体 A の反射点、青丸は鏡面物体 B の反射点を表している。また、シアン色で示した点線は追跡した光線の経路を表している。

6.1 節の実画像実験と同様、到達した物体点の推定位置はそれぞれの鏡面物体でわずかにずれがあった。また、表 2 において真値と推定値を比較すると、推定誤差は 2.60cm であった。カメラから対象物体までの距離が 19.50cm であるため、6.1 節の実験よりも推定誤差が大きくなっていることがわかる。このことから、非平面の場合にはより復元が難しいことがわかる。

次に、法線分布を表す B スプライン曲面の推定結果をもとに、カラーマップを用いて推定した法線分布を表したものを図 16 に示す。図 16 の推定結果をみると、上部は法線

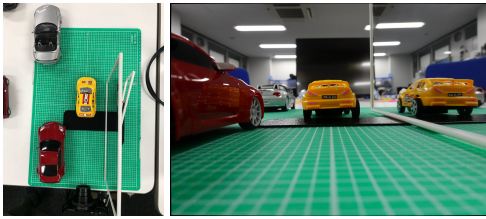


図 14 法線が不均一である場合における実画像実験の実験環境 (左) とカメラ画像 (右)

Fig. 14 Experimental environment (left) and camera image (right) of a real image experiment when normals are non-uniform.

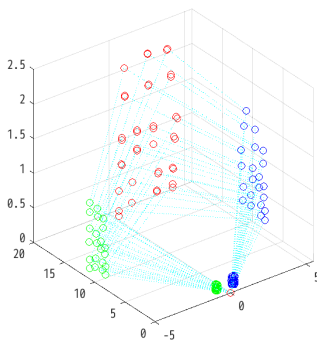


図 15 提案法 2 を用いた実画像実験の推定結果

Fig. 15 Estimated result of real image experiment using the proposed method 2.

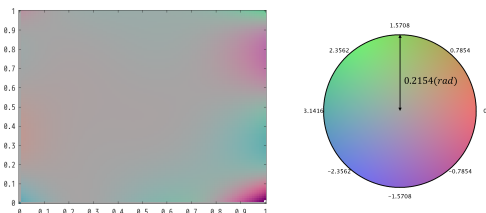


図 16 法線分布の推定結果 (右のカラーマップにより法線方向を表現)

Fig. 16 Normal distribution estimation result (normal direction is expressed by the color map on the right)

が上向きに向いていることがカラーマップと比較して分かる。実際に、図 14(右)の左側にある車体を見ると、物体上部では法線が上を向くように面が湾曲していることが分かる。このことから、提案法を用いることで、鏡面物体の形状復元 (不均一な法線分布の復元) も行なえていることが分かる。以上の結果より、提案法 2 の有効性を確認することができた。

7. 結論

本研究では、死角に存在する物体との衝突事故を回避するため、車両のボディ面に映りこむ鏡像を利用して死角に存在する物体の位置や鏡面物体の形状を復元する手法を提案した。提案法では、鏡面物体を法線が位置ごとに

めらかに変化する平面として近似し、B スプライン曲面によって法線分布を表現することで、鏡面物体の形状をパラメトリックに表現した。また、光線をベクトルとして表現し、異なる鏡面物体で反射した光線が同じ物体の特徴点に到達する関係を用いて、死角に存在する物体の位置を推定する手法を提案した。実験では、実際に鏡や自動車のミニチュアを鏡面物体として使い、対象物体の位置や鏡面物体の形状 (法線分布) が推定できることを示し、提案法の有効性を確認した。

今後の課題として、死角に存在する物体の位置に加えて形状も同時に復元する手法への拡張などが挙げられる。

参考文献

- [1] 国土交通省: 運転支援技術・自動運転技術の進化と普及, 入手先 (<https://www.mlit.go.jp/common/001213451.pdf>).
- [2] 警察庁交通局: 令和 2 年における交通事故の発生状況等について, 入手先 (<https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/jiko/R02bunseki.pdf>).
- [3] 警視庁: 歩行者の交通人身事故発生状況, 入手先 (https://www.keishicho.metro.tokyo.jp/about_mpd/jokyo_tokei/tokei_jokyo/vta.files/walker.pdf).
- [4] 総務省: 平成 28 年版情報通信白書, 日経印刷, 2017.
- [5] ブラインドスポットモニター, トヨタ自動車, <https://toyota.jp/safety/scene/highway/index3.html>
- [6] Blind spot detection for heavy commercial vehicles, Bosch, <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/assistance-systems/blind-spot-detection-cv/>
- [7] K. Ichikawa and J. Sato, Image Synthesis for Blind Corners from Uncalibrated Multiple Vehicle Cameras, Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 956-961, 2008.
- [8] Kanbara, M., Ukita, N., Kidode, M., Yokoya, N., 3D scene reconstruction from reflection images in a spherical mirror, International Conference on Pattern Recognition, Vol. 4. 874-879, 2006.
- [9] Sankaranarayanan, A.C., Veeraraghavan, A., Tuzel, O., Agrawal, A.K., Specular surface reconstruction from sparse reflection correspondences, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1245-1252, 2010.
- [10] 加藤俊二: 身の回りの光と色., 裳華房, 1993.
- [11] 竹内淳: 高校数学でわかる光とレンズ 光の性質から、幾何光学、波動光学の核心まで., 講談社, 2016.
- [12] 佐藤淳: コンピュータビジョン-視点の幾何学-, コロナ社, 1999.
- [13] Laboratory, I.F.: 極座標への変換についてももう少し詳しく教えてほしい, 入手先 (https://science.shinshu-u.ac.jp/ti-iyama/?page_id=4311).
- [14] Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration., IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22 (11), 1330-1334, 2000.