

## 車両の進行方向に対する対称性を利用した外形復元

嶋 亮輔\* 北原 格<sup>†‡</sup> 亀田 能成<sup>†‡</sup> 大田 友一<sup>§</sup>

\*筑波大学 大学院システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>†</sup> 筑波大学 計算科学研究センター 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>‡</sup> 筑波大学 システム情報系 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>§</sup> 筑波大学 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: \*s1520805@u.tsukuba.ac.jp, <sup>†‡§</sup> {kitahara, kameda, ohta}@iit.tsukuba.ac.jp

**あらまし** 本研究では, Shape from Silhouette により固定カメラの撮影空間内を走行する車両の外形復元を行う手法を提案する. Shape from Silhouette で外形復元を行うには, 利用できるカメラが多い方がよい. ところが, 路上などでは, 同時に利用できるカメラはせいぜい数台程度である. そこで, 対象となる車両の形状が変化しないことと, 左右対称であることを利用して, 利用できるカメラを見かけ上増大させる方法を提案する. 固定カメラとの位置と車両との関係を入れ替えて考えることで, 車両に対して見かけ上多数の固定カメラを用意する. さらに車両の対称性を利用し, 観測カメラの台数を見かけ上2倍にすることで復元精度を向上させる. 本論文では, シミュレーションにより提案手法の実現性を確認した.

**キーワード** 三次元形状復元, シェープフロムシルエット, カメラキャリブレーション, 監視カメラ

## Outer Shape Reconstruction Based on Geometric Symmetry of Moving Vehicle

Ryosuke TOKI\* Itaru KITAHARA<sup>†‡</sup> Yoshinari KAMEDA<sup>†‡</sup> and Yuichi OHTA<sup>§</sup>

\*Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba,  
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan

<sup>†</sup> Center for Computational Sciences, University of Tsukuba  
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577 Japan

<sup>‡</sup> Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba,  
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan

<sup>§</sup> University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577, Japan

E-mail: \*s1520805@u.tsukuba.ac.jp, <sup>†‡§</sup> {kitahara, kameda, ohta}@iit.tsukuba.ac.jp

**Abstract** This paper proposes a new method of outer shape reconstruction of a vehicle moving on a road in front of surveillance cameras. The shape is reconstructed by applying Shape from Silhouette method. The number of the cameras available for Shape from Silhouette method is important to estimate precise shape though there are usually a few cameras on street. The number of the camera are virtually increased by treating the vehicle posed in the world and the cameras are virtually moving. Utilizing symmetry of the vehicle in its moving direction, the number of the virtual cameras can be doubled by putting mirrored cameras in the world. We conducted CG based experiment and verified our method.

**Keywords** 3D shape reconstruction, shape from silhouette, camera calibration, surveillance camera

### 1. はじめに

交通状況解析はこれまで道路の流量計測や車両の通過数など, 車1台をデータの単位と考えて統計解析を行うことが主流であった. このために, 様々な流量計測システムや道路監視カメラが導入されてきた.

路上では多種多様な車両が行き交うことから, 今後より精緻な交通状況解析のためには, 各車両の状態を個別に計測できることが望ましい. そのために, 汎用的な用途が見込まれる監視カメラは重要なセンサーとなる.

本研究では、路上に設置された道路監視カメラから、走行車両の外形復元を行う手法を提案する。ここで外形とは復元する対象物体のおよその3次元形状と定義する。理想は正確な三次元形状復元であるが、その形状から有用な情報が得られる程度の外形が復元できれば、交通状況解析には有用であろうと我々は考えている。

一般に物体の3次元形状復元を行う手法として、画像間の特徴点の対応付けを行う **Structure from Motion**[1][2](以下 **SfM**)や物体のシルエット画像を利用する **Shape from Silhouette**[3][4]がある。SfMは、画像間で安定して特徴点を抽出する必要があり、テクスチャレスな物体に適用することは困難である。本研究で対象とする車両はその性質上、車両の表面に特徴点が見いだせないことが多いため、この手法は適していない。

そこで、本研究では **Shape from Silhouette** を適用し3次元形状復元する。**Shape from Silhouette** は特徴点抽出できない場合でも、映像から対象のシルエットを取得することで形状復元が行える。車両が固定カメラの撮影空間内を走行する場合、車両の位置姿勢が変化することで相対的に多視点のシルエット画像を取得できる。

**Shape from Silhouette** で形状復元を行うためには、利用できるカメラは多い方がよい。その一方で、道路監視カメラは一つの地点にはせいぜい数台しかないことが普通である。そこで、車両が走行していることから、固定カメラの位置と車両の位置を入れ替えることで、相対的に車両が静止している状態に対して固定カメラの位置姿勢が変化しているとみなし、少ないカメラ台

数でも多視点のシルエット画像を取得する。

車両の位置推定に関してはタイヤの位置を追跡する手法[6]や走行環境の3次元モデルと実環境のカメラの映像を統合することで3次元位置を計測する手法[7]があり、本研究では車両の位置姿勢は取得できていることを前提とする。

このようにしてカメラの視点を仮想的に増加させても、路上を走行する車両がカメラに対し全周を見せることはない状況が容易に想定される。そこで、本研究では、仮想カメラを増やすために、車両の進行方向に対する対称性を利用することを提案する。車両は進行方向に対して面対称である。この面に対して、もともとあるカメラを対称な位置に移動させ、カメラの映像も鏡像を利用することで、原理的に2倍のカメラ視点を用意することができる。これにより外形復元の精度を向上させる。

提案手法の処理の流れを以下に示す。

- ① **Preprocess**: 車両の位置姿勢推定とシルエット画像の取得。
- ② **Virtual camera transition**: 車両に対して相対的に移動した地点における仮想カメラの位置姿勢を取得。
- ③ **Mirror positioning**: 仮想カメラの位置姿勢について、車両の対称面に鏡像の位置姿勢を算出。
- ④ **Mirror imaging**: 鏡像カメラの映像として元のカメラの鏡像画像が相当するので、そこからシルエットを取得。
- ⑤ **Shape from Silhouette**: 得られたシルエットの集合から外形復元

図1に本研究の提案手法の概念図を示す。本論文では、

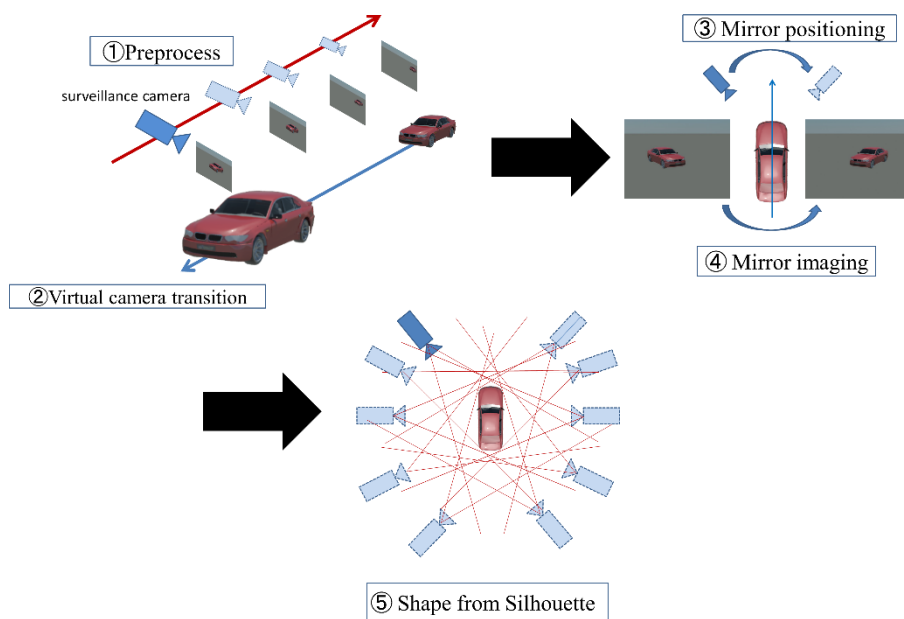


図1 外形復元の処理過程

作成した CG シミュレーションに提案手法を適用し、車両モデルの外形復元を行い提案手法の妥当性を検証する。

## 2. 関連研究

画像情報を利用した 3 次元形状復元手法について関連研究を述べる。

対象物体を様々な角度から撮影した画像群から、カメラモーションと特徴点の 3 次元位置を同時に復元する SfM[1]がある。SfM は画像間の特徴点の対応付けを行うことで 3 次元形状を疎な点群として復元する手法である。Microsoft の Photo Tourism[2]は、インターネット上の画像群を用いて SfM により大規模な屋外空間の 3 次元復元を行っている。SfM は事前にカメラパラメータが未知の画像群に対しても適用できる利点を持つ。しかし、SfM では撮影する画像間で対応する特徴点が安定して検出される必要がある。そのため対象となる物体には特徴点が検出されやすいテクスチャを持つことが望まれる。

物体の特徴点を用いずに 3 次元形状復元を行う手法として物体のシルエット画像を利用する Shape from Silhouette がある。多視点から取得した物体のシルエット画像を各視点から 3 次元空間に逆投影し、部分空間の論理積を求めて形状を復元する手法である。Shape from Silhouette により求められた形状は Visual Hull[3]とも呼ばれる。Visual Hull の形状をより正確に取得するためには、シルエット画像の枚数を増やすこと、つまり観測カメラの台数を増やすことが効果的である。しかし、多数のカメラを路上に設置することは簡単ではない。

カメラの台数を増やすことなくシルエット画像を増やし、Visual Hull を求める手法を Keith Forbes らは提案している[4]。彼らの研究では、カメラ 1 台と鏡 2 枚を用いて、対象が 5 視点 (カメラに直接映る 1 視点、鏡による反射の 2 視点、鏡による反射の 2 視点)から撮影できるようにする。得られる 5 視点の画像から対象のシルエットを取得し、それらを用いて Shape from Silhouette を行うことで、対象の 3 次元形状を復元し Visual Hull を取得している。しかし、彼らの手法では対象物体の大きさに合わせた鏡を用意する必要がある。本研究の対象とする車両のような大きな物体に本手法を適用することは現実的ではない。

## 3. カメラの相対移動

本章では、外形復元に用いる Shape from Silhouette と Shape from Silhouette に必要なカメラパラメータについて述べる。そして、本研究において取得できる情報から、射影変換行列を算出する手法について説明する。

### 3.1. Shape from Silhouette

Shape from Silhouette は物体のシルエット画像を用いて 3 次元空間を区切ることにより 3 次元形状復元を行う手法である。カメラの視点とそのシルエットから、焦点を頂点、シルエットをその断面とする錐体(視体積)が各カメラで得られる。複数のカメラの視体積の論理積を求めることで、元の物体の三次元形状の近似を得る。こうして得られる Visual Hull は真の形状を外包するものであり、これを真の形状に近づけるためには、利用するカメラ台数 (視点) を増やす必要がある。

### 3.2. 視体積

シルエットの逆投影を行い視体積を求めるためには、3 次元空間と 2 次元画像の関係を記述する射影変換行列  $P$  が必要である。射影変換行列  $P$  はカメラの内部パラメータと外部パラメータから求められる。カメラの内部パラメータはカメラの焦点距離  $f$ 、画像中心  $(c_u, c_v)$  から構成される。内部パラメータを要素に持つ 3 行 3 列の行列  $A$  は式(1)で表される。

$$A = \begin{pmatrix} f & 0 & c_u \\ 0 & f & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

カメラの内部パラメータに対し、外部パラメータは世界座標系におけるカメラの位置と姿勢によって求まる 3 行 3 列の回転行列  $R$  と 3 次元の平行移動ベクトル  $t$  で構成される。 $R$  と  $t$  の要素はそれぞれ式(2)で表される。

$$R = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{pmatrix}, \quad t = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

外部パラメータを剛体変換行列  $D$  で表すために同次座標系を導入すると、

$$D = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_1 \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_2 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_1 \\ 0 & 1 & 0 & t_2 \\ 0 & 0 & 1 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & 0 \\ r_4 & r_5 & r_6 & 0 \\ r_7 & r_8 & r_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = TR \quad (3)$$

射影変換行列  $P$  は内部パラメータ行列  $A$  と剛体変換行列  $D$  を用いて表すと式(4)となる。

$$P' = A'D \quad (4)$$

ただし、 $A'$ 、 $P'$  は  $A$ 、 $P$  を同次座標系に拡張した行列とする。

各カメラの視体積の論理積を算出することで Visual Hull を求めることができる。

### 3.3. カメラ移動

Shape from Silhouette は静止している物体に対して、

多視点からのシルエット画像を逆投影する必要がある。シルエット画像が多くなるほど復元される形状の精度は向上する。しかし、本研究では、車両が移動しているのに対してカメラが固定となる。そこで、車両の位置姿勢が取得できているという前提から、車両を静止とみなし、相対的にカメラを移動させることで視点の数を増やし、固定カメラでも Shape from Silhouette を適用できるようにする。

相対的なカメラの移動と相対移動したカメラ間の関係を車両の位置姿勢変化から求める手法を述べる。

まず、あるフレーム  $n$  での世界座標系におけるカメラの位置姿勢は  $D_c[n]$ 、車両の位置姿勢は  $D_v[n]$  と表せる。

ここで  $n$  から  $n+1$  での車両の位置姿勢変化を  $\Delta D_v[n]$  とすると、式(5)が得られる。

$$D_v[n+1] = \Delta D_v[n] D_v[n] \quad (5)$$

車両に対するカメラの相対移動は、車両の位置姿勢変化  $\Delta D_v[n]$  の逆行列を用いることで表せる。 $\Delta D_v[n]$  の逆行列は式(6)と表せる。

$$\Delta D_v[n]^{-1} = (\Delta t_v[n] \Delta R_v[n])^{-1} = \Delta R_v^{-1}[n] \Delta t_v^{-1}[n] \quad (6)$$

式(5)より、カメラの相対移動は式(7)で表せる。

$$D_c[n+1] = \Delta D_v[n]^{-1} D_c[n] \quad (7)$$

式(7)より剛体変換行列が求まることから、式(4)を用いて各視点における射影変換行列が求まり、よってそれに対応する視体積を得ることができる。

## 4. 対称性を利用した外形復元

前節で相対的に移動させたカメラを、車両の対称面において鏡像の位置姿勢から撮影したカメラに仮想的に変換することでさらに視点を増やす手法を述べる。

### 4.1. 車両の対称面

本研究では、図2に示すように、車両は車両座標系における進行方向の軸と鉛直方向の軸が成す平面において鏡像対称であると仮定する。

対称面は車両座標系に対して固定である。ここで、車両座標系を、その  $y$  軸を進行方向、鉛直方向を  $z$  軸とする左手系とする。対称面(Symmetry plane)  $\pi$  が  $x = 0$  の平面になるように車両座標系の原点を定める。対称面  $\pi$  の法線ベクトルは  $\mathbf{n} = (1, 0, 0)$  である。対称面  $\pi$  における鏡像変換行列  $M$  は、式(8)となる。

$$M = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

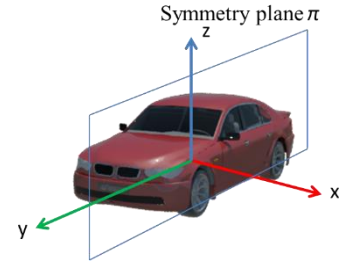


図2 車両の対称面

## 4.2. 鏡像変換

3.3 節で求めたカメラの位置姿勢を 4.1 節の  $M$  を用いて鏡像変換することで、相対移動した視点のさらに鏡像変換した視点を求める。鏡像変換されたカメラの座標系は元の座標系とは車両座標系から観測すると鏡対称となる。また、このとき、鏡像変換後のカメラで仮想的に撮影した映像は、もとのカメラの映像と、車両座標系から見て鏡対象となる。このことは、結果として、もとのカメラ映像を左右反転するだけで鏡像変換後のカメラ映像として利用できることを意味する。当然、そのシルエットも映像中で左右反転するだけでよいことになる。

## 5. 実験

提案手法の妥当性を検証するために実験を行った。実験には CG で作成した映像を使用した。車両、カメラの3次元位置姿勢及びシルエット画像を CG でシミュレーションするため、処理手順の①:Preprocess で取得するデータは既知とする。Shape from Silhouette の実行にあたっては、Forbse が作成し公開しているプログラム[5]を使用した。

### 5.1. 実験環境

図3と図4にカメラの配置と車両の走行経路を示す。カメラ1、カメラ2、カメラ3は焦点距離が 35mm 判換算で 50mm とする。地面からの高さは約 2.5m に設置した。カメラ4はより高所の道路監視カメラと想定し、焦点距離を同 10mm と設定し、地面からの高さは約 5m として設置した。

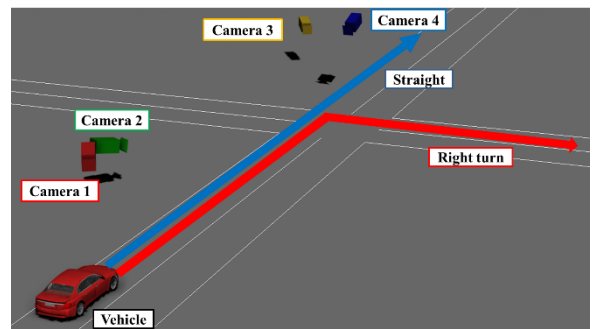


図3 カメラ配置と走行経路

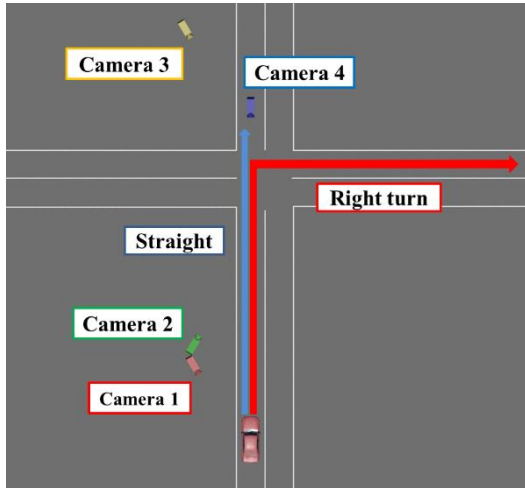


図 4 上方から見たカメラ配置

車両が路上を走行する場合に想定しうる状況として、直進や交差点で右左折することが考えられる。本実験では、直進ないし右折経路を走行する車両を対象に外形復元を行う。利用できる道路監視カメラと外形復元との関係を明らかにするため、5種類のシーンを表1のように用意し実験を行った。

シーン A は、車両が直進しているところをカメラ 1 で撮影する。シーン B では、カメラ 3 で車両が交差点を右折するところを撮影する。シーン C では、カメラ 1 とカメラ 4 の 2 台で車両が直進するところを撮影する。シーン D では、カメラ 3 とカメラ 4 の 2 台で車両が交差点で右折するところを撮影する。シーン E では、カメラ 1、カメラ 2、カメラ 4 の 3 台で車両が直進するところを撮影する。

	カメラ	走行経路	入力シルエット画像枚数
シーン A	カメラ 1	直進	10
シーン B	カメラ 3	右折	14
シーン C	カメラ 1,4	直進	11
シーン D	カメラ 3,4	右折	15
シーン E	カメラ 1,2,4	直進	21

表 1 実験シーケンス

## 5.2. 実験結果

シーン A~E において取得したデータを用いて本手法を適用し、車両の外形復元を行った。図 5 にシーン A~E で入力に用いたシルエット画像、相対移動させたあとのカメラの位置姿勢、および外形復元結果を示す。図 6 に上から見た復元結果を示す。カメラの位置姿勢を表す俯瞰図では、赤がカメラ 1、緑がカメラ 2、黄がカメラ 3、青がカメラ 4 を示していて、それぞれその淡色表現されたカメラが相対的に配置し直されたカメラ位置姿勢を示している。

本実験では、入力に用いた映像フレームは、画像内

に完全に車両のシルエットが収まっているものを使用している。使用した入力画像枚数は、表 1 の通りである。シミュレーションのため、車両のシルエットは正確に抽出できたものを使用している。

## 5.3. 考察

シーン A で復元したモデルは、ひし形のような形状となっている。本シーンでは車両の進行方向に対し平行にカメラが位置しているため、カメラに対し車両が見せる姿勢変化のバリエーションが少ない。よって、このレイアウトでは逆投影するシルエットの数が増やせても正確な外形復元には結び付きにくい。

シーン B で復元したモデルは、車両のフロント部分とリア部分については概ね元のモデルの外形を復元できていることがわかる。これは、車両が交差点で右折することにより、カメラに対しフロント部分だけでなくサイド部分及びリア部分を向けているため、多方向から撮影したシルエットが取得できたからである。

シーン C で得られた外形は、シーン A にカメラ 4 のシルエットを加えたことによって得られている。シーン A の復元結果よりもサイド部分が削られて、外形が実際の形状に近付いていることがわかる。これは、カメラ 4 が車両に正対している位置からシルエットを逆投影しているからである。斜めから逆投影しているため、サイドミラーの部分の形状については斜めに削られている。

シーン D は、シーン B にカメラ 4 を追加したものである。よってサイド部分のシルエットの拘束条件が増えたため、車両の元の形状により近い外形を復元できている。しかし、サイドミラーの部分はシーン C と同様の形状になっている。

シーン E はシーン C にカメラ 2 を追加したものである。カメラ 2 により車両後部の撮影ができるようになったため、車両のリア部分の形状がシーン C に比べて車両の元の形状により近づいていることがわかる。また、シーン C、D と同様に車両の幅を削ることができている。フロント部分についてはカメラ 4 のシルエットにて削れているが、リア部分については、斜め上からシルエットを逆投影しているため、削れていないことがわかる。

この 5 つのシーンの中では、シーン D の場合において、元の車両形状に最も近い外形を復元することができたと言える。シーン D は利用する道路監視カメラは 2 台だけであり、提案手法により路上での車両の外形復元が十分に行えることが期待できる。

## 6. おわりに

本研究では、数の少ない固定カメラ群の撮影空間内を走行する車両の外形復元手法を提案した。本提案手

法では、車両の移動からカメラを相対的に移動させることでカメラの視点を仮想的に増加させ、車両の対称性を利用することで、シルエット画像を増やし Shape from Silhouette を実行し車両の外形を復元する。CG 映像による実験にて検証を行い、現実に想定しうる状況において、提案手法によって車両の外形復元が行えることを示した。

今後の課題として、実際の路上において実車を用いて検証することが挙げられる。実際の環境において正確なシルエットの取得、及び車両の位置推定は安定して行えない恐れがある。よって、シルエット形状の不正確さや車両位置推定の誤差が復元に与える影響を調査することが必要である。

### 謝辞

本研究の一部は科研費 25280056 の助成を受けて実施された。ここに謝意を表明する。

### 参考文献

[1] 金出武雄, コンラッドポールマン, 森田俊彦. "因子分解法による体形状とカメラ運動の復元." 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.J76-D-II, No.8, pp.1497-1505, 1993.

- [2] Snavely, Noah, Steven M. Seitz, and Richard Szeliski. "Photo tourism: exploring photo collections in 3D." ACM transactions on graphics(SIGGRAPH2006). Vol.25, No.3, 2006.
- [3] A. Laurentini "The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding." IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.16, No.2, pp.150-162, 1994.
- [4] Keith Forbes, Fred Nicolls, Gerhard, De Jager, and Anthon Voigt. "Shape-from-silhouette with two mirrors and an uncalibrated camera," In Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision (ECCV), pp.165-178, 2006.
- [5] Keith Forbes. "Calibration, Recognition, and Shape from Silhouettes of Stones," PhD thesis, University of Cape Town, June 2007.
- [6] 飯田克弘,安時亨,"長区間の連続した3次元車両軌跡計測のためのビデオ解析システムの開発について," 土木計画学研究・論文集, Vol.21, No.4, pp.925-932, 2004
- [7] 加藤晃市,仲西正,塩昭夫,石井健一郎 "超広角単眼視による移動物体の形状抽出" 電子情報通信学会技術研究報告, PRU パターン認識・理解 Vol.93, No.229, pp.39-45, 1993.

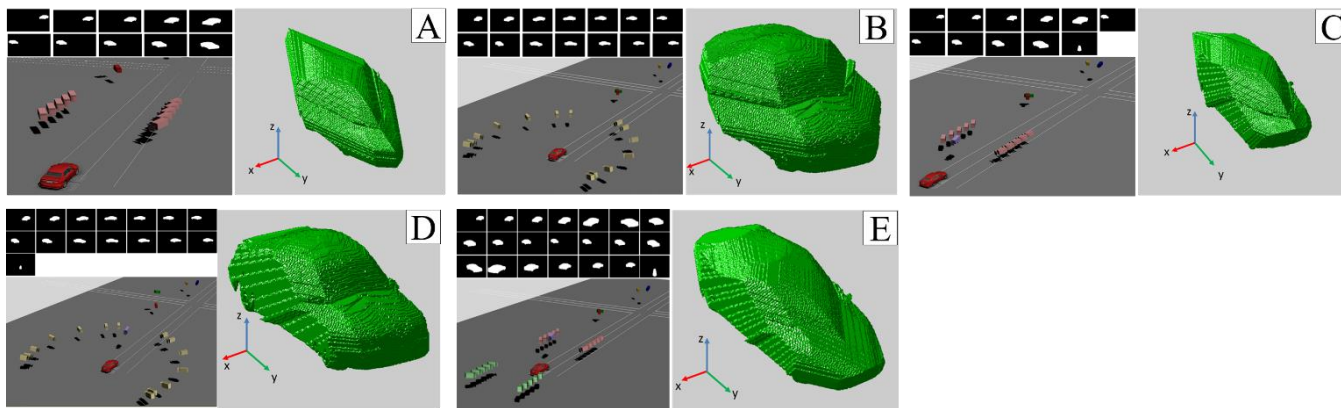


図 5 シーン A~E のシルエットと相対移動したカメラ位置および外形復元結果

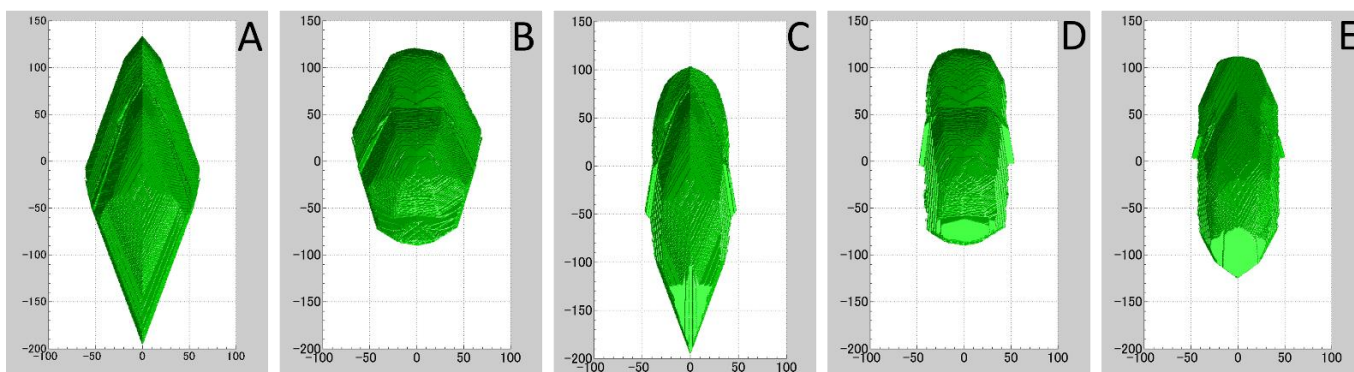


図 6 シーン A~E の上から見た外形復元結果