

# 支配的平面の情報を用いた最適補正による 砂浜の広範囲な3次元復元

松永 竜太郎<sup>1,a)</sup> 橋本 瑞樹<sup>1,b)</sup> 金澤 靖<sup>1,c)</sup>

## 概要：

本稿では、砂浜のように広大でほぼ平面状のシーンに対し、ドローンから撮影した映像を用いた高精度な3次元復元方法を提案する。このような平面状シーンに対しては、基礎行列あるいは基本行列ベースの復元では退化あるいは退化に近い条件であるため、カメラ運動の計算の誤差が大きくなり、結果として復元した形状に歪みが生じやすいという問題がある。提案法では、シーン内の支配的平面から計算した射影変換を用い、平面拘束に基づく最適補正による復元を行うだけでなく、砂浜の起伏部分に対しても、求めた支配的平面からのパララクスを利用した最適補正による復元を行う。そしてそれぞれの復元結果を合成してバンドル調整を行うことで、広範囲な砂浜形状を高精度に復元できる。実際のドローン映像を用いた実験により、提案法の有効性を示す。

## Accurate 3-D Reconstruction method for a Large Sandy Beach by Optimal Corrections using Dominant Plane

RYOTARO MATSUNAGA<sup>1,a)</sup> MIZUKI HASHIMOTO<sup>1,b)</sup> YASUSHI KANAZAWA<sup>1,c)</sup>

### Abstract:

We propose an accurate reconstruction method using homography and planar parallax for an almost planar scene like a sandy beach from the video by a drone. By using essential matrix or fundamental matrix based method for such a planar scene, a reconstructed shape often distorts because of degeneration of the scene. In order to reconstruct accurate shape for such a scene, we adopt homography-based reconstruction. In our method, using the homography computed from dominant plane in the scene, we can not only accurate dominant plane shape but also the undulation in the scene. For doing this, we adopt optimal computation for homography, optimal correction for planar triangulation, and optimal correction with parallax. By combining the reconstructed shapes and using bundle adjustment, we can obtain a large accurate 3-D reconstruction for the scene. We show the effectiveness of the our method by real image experiments.

## 1. はじめに

東日本大震災での津波による行方不明者の捜索活動は、現在もボランティアにより関上浜などで定期的に行なわれている [1]。この捜索活動は、図 1 に示すように、地中レーダを用いて砂浜の地中を調べ、反射の有無により埋没物の

有無を判定し、反応があった場所を手で掘り起こすという作業で行われている。しかし対象が埋没物であるため、地表面からは観測せず、網羅的にレーダを掛けて捜索を行う必要がある。そこで、人工衛星や航空機に搭載されたレーダの画像を解析し、捜索範囲を限定することも行われているが、航空機レーダは地中だけでなく地表面の物体でも反射されるため、埋没物と地表面上の物体との区別ができなだけでなく、解像度も粗い。また、砂浜の状態は天候により大きく左右されるため、埋没物が露出したり、逆に地表のものが埋もれたりすることも考えられる。加えて、新たに漂着することも考えられるため、地表面の漂着物の検

<sup>1</sup> 豊橋技術科学大学 情報・知能工学系,  
Department of Computer Science and Engineering,  
Toyohashi University of Technology, Japan.

a) r-matsunaga@img.cs.tut.ac.jp

b) m-hashimoto@img.cs.tut.ac.jp

c) kanazawa@cs.tut.ac.jp

出も重要となる。本研究はこのような搜索を効率的に行うために、ドローンに搭載したカメラ映像から、地表面の情報を3次元的に取得することを目的とする。

単眼カメラ映像からの3次元形状復元に関しては、これまで様々な手法が提案されているが [2], [3], [4], [5], [6], これらの手法は、本研究で対象とする砂浜のようなほぼ平面状であり、ほぼテクスチャが一様であるようなシーンに対しては、一般に復元した形状に対する歪みが大きくなってしまふ。これは、これらの従来手法の多くが基礎行列あるいは基本行列を分解してカメラの運動パラメータを推定しており、砂浜のようなほぼ平面のシーンに対しては基礎行列や基本行列が退化してしまうためである。

そこで本研究では、砂浜がほぼ平面であることを利用し、その平面の情報を積極的に用いた3次元復元を行うことを考える。このような平面に対する射影変換を積極的に用いることにより、未校正なカメラからでも形状復元を高精度に行うことが可能となる [7], [8]。ここでは、ドローンを移動させて撮影した砂浜映像から、支配的な平面に対する射影変換を計算し、その射影変換からカメラの運動推定を行う。そして、平面状の点群に対して平面三角測量 [9] を行い、平面状にない点群に対してはその射影変換との視差(パララックス)を用いた最適補正を行い、形状を復元する。この手法を用い、ドローン映像からキーフレームを自動的に選択し、連続するキーフレーム間から上記の復元を行って、各復元形状を合成し、最後にバンドル調整を行うシステムとして実装した。実際のドローン映像を用いた実験により、提案法の有効性を示す。

## 2. 関連手法

一連の画像群から3次元復元を行う手法として、コンピュータビジョンにおいては Structure from Motion (SfM)、ロボットにおいては Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) が挙げられる。

SfMを行うものとして、SnavelyらのBundler[2]がある。Bundlerは画像の対応をSIFT特徴量[10]を使って求め、バンドル調整による高精度な3次元復元を行っている。このBundlerはビデオ画像だけでなく、未整列な画像群にも適用可能であるが、Bundlerは基礎行列ベースの復元を行うため、砂浜のような平面状シーンに対しては復元形状に歪みを生じてしまうことが多い。また、カメラ映像をそのまま入力として与えられるが、ドローンにより撮影された砂浜の映像は、ホバリングや回転など復元に適さないフレームや、移動が微小であるために冗長なフレームも存在し、これらをそのまま用いると計算時間の増加を招く。また、蜜な形状復元を得るためには、Bundlerだけではなく、PMVS2[11]も後処理として使う必要がある。

SLAMでは KleinらのPTAM[3]や EngelらのLSD-SLAM[5]が挙げられる。PTAMは拡張現実感(AR)を



図1 閑上浜での搜索活動の様子。

目的としたものであり、シーン中の点をトラッキングすることで自己位置を推定する。このとき、トラッキング処理と環境マッピング生成処理を並列化することでリアルタイムで動作し、局所的にバンドル調整を行うことで高精度なSLAMを行える。しかし、比較的狭い空間での利用を想定していることや、特徴点のトラッキングを行なっているため、砂浜のような広く、かつテクスチャのほぼ一様なシーンでの利用はあまり適していない。

LSD-SLAM[5]は、特徴点を用いず画像の輝度値を利用してSLAMを行っており、輝度勾配の大きい点を使って、輝度値の差を最小化するように深度推定を行うことで高速化している。そのため、リアルタイムで復元を行うことができるだけでなく、ループ検出やカメラ姿勢の最適化によって工場全体のような大規模シーンでも利用が可能となっている。しかし、LSD-SLAMにおいても、対象の3次元的な起伏が十分に存在しない場合や、カメラの移動が少ない場合には、うまく働かない。

## 3. 射影変換とパララックス

図2に示すように、移動するカメラで異なる位置から平面 $\Pi$ 上の点 $X$ を観測したとする。このときの第1カメラと第2カメラの観測点をそれぞれ $\mathbf{x}=(x/f, y/f, 1)^T$ と $\mathbf{x}'=(x'/f, y'/f, 1)^T$ とすると、これらの観測点間の関係は $3 \times 3$ の射影変換行列 $H$ を使って次の式で表せる [9], [12]。

$$\mathbf{x}' = Z[H\mathbf{x}] \quad (1)$$

ここで、 $f$ はカメラの焦点距離であり、 $Z[\cdot]$ はベクトルの第3要素を1にする正規化を表す。この射影変換行列 $H$ は、移動前後運動のカメラ間の回転 $R$ と並進 $t$ 、平面の法線ベクトル $\mathbf{n}$ と第1カメラから平面までの距離 $d$ を用いれば、次のようにも書ける。

$$H = R^T \left( I - \frac{t\mathbf{n}^T}{d} \right) \quad (2)$$

ここで距離 $d$ は法線ベクトル $\mathbf{n}$ の方向を正とする。この $\{R, t\}$ を運動パラメータと呼び、 $\{\mathbf{n}, d\}$ を平面パラメータと呼ぶ。

今、図3に示すように、平面 $\Pi$ 上に乗っていない点 $X$ を移動するカメラで観測したとする。このとき平面 $\Pi$ に対する射影変換を行うと第2カメラの観測点 $\mathbf{x}'$ からずれた点 $\tilde{\mathbf{x}}'=(\tilde{x}', \tilde{y}', 1)^T$ に投影される。

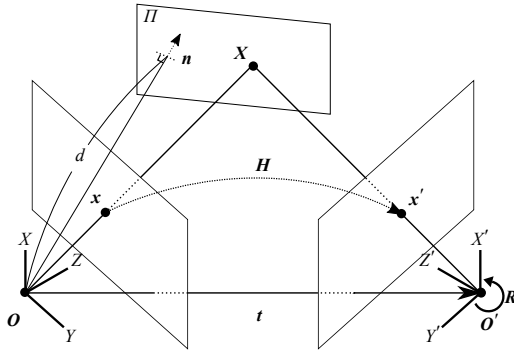


図2 平面上の点の関係.

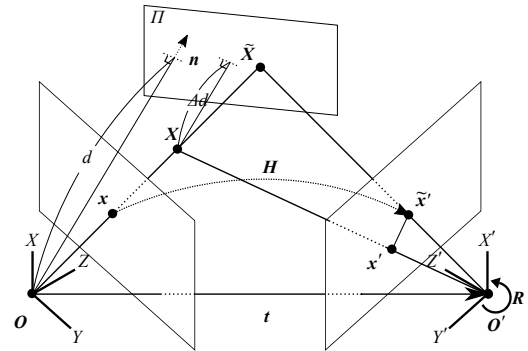


図3 平面上にない点の関係.

$$\tilde{x}' = Z[Hx] \quad (3)$$

この点  $x'$  と点  $\tilde{x}'$  との差はパララックス (parallax) と呼ばれる [13], [14], [15]. 提案法では, このパララックスに対する最適補正も行うことで, 起伏を含む平面形状に対する高精度な復元を行う.

#### 4. 支配的平面情報を用いた3次元復元

支配的平面に対する2台のカメラの画像間の射影変換行列を  $H$ , カメラ間の運動パラメータを  $\{R, t\}$  とし, 支配的平面のパラメータを  $\{n, d\}$  とし, それぞれ計算済みとする. このとき, 支配的平面上の載った点とそうでない点に対して, それぞれ最適に復元することを考える.

##### 4.1 支配的平面上の点群の復元

平面上の点群の3次元復元においては, 平面三角測量における最適補正を用いる [9], [16]. 射影変換行列  $H$  は既知とし, 平面上の点  $P=(X, Y, Z)$  が2つのカメラの画像面上にそれぞれ  $(x, y)$ ,  $(x', y')$  として観測されるとき, この最適補正は次の再投影誤差をその平面上で最小となるように  $(\hat{x}, \hat{y})$ ,  $(\hat{x}', \hat{y}')$  に補正することに等しい.

$$S = (x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2 + (x' - \hat{x}')^2 + (y' - \hat{y}')^2 \quad (4)$$

この補正後の点  $(\hat{x}, \hat{y})$ ,  $(\hat{x}', \hat{y}')$  を用いれば, 視線は必ず交差することから, 3次元復元は次式で計算できる.

$$X = \frac{d}{(n, \hat{x})} \hat{x} \quad (5)$$

ここで, ベクトル  $\hat{x}$  は補正後の  $(\hat{x}, \hat{y})$  による同次座標ベクトル

$$x = (\hat{x}/f, \hat{y}/f, 1)^T \quad (6)$$

とする. ただし,  $f$  はカメラの焦点距離,  $\{n, d\}$  は平面パラメータとする.

##### 4.2 平面上にない点群の復元

平面上にない点に対しては, 支配的平面の射影変換を適用した際に生ずるパララックスを使って復元を行う.

まず, 次のように中点法 [9] により, 初期復元  $X=(X, Y, Z)$  を計算する.

$$X = \frac{1}{2}(Zx + RZ'x' + t) \quad (7)$$

ただし

$$Z = \frac{d}{(n, x) - d'\rho}, \quad \rho = \frac{\|x - \tilde{x}\|}{\|t_3\tilde{x} - t\|} \quad (8)$$

とする. また  $\tilde{x} = Z[H^{-1}x']$  で,  $d'$  は第2カメラから平面までの距離,  $t_3$  は並進ベクトル  $t$  の第3成分とする. このとき, もし  $(x - \tilde{x}, t_3\tilde{x} - t) < 0$  なら  $-\rho$  とする.

$$Z' = \frac{d'}{(n', x') - d\rho'}, \quad \rho' = \frac{\|x' - \tilde{x}'\|}{\|R^T t - T_z \tilde{x}'\|}, \quad (9)$$

$$T_z = R_{13}t_1 + R_{23}t_2 + R_{33}t_3 \quad (10)$$

ここで,  $n'$  は第2カメラ座標系から見た平面の法線ベクトルであり,  $R_{ij}$  は回転ベクトル  $R$  の  $ij$  成分である. もし,  $(x' - \tilde{x}', R^T t - T_z \tilde{x}') < 0$  なら  $-\rho'$  とする.

次にパララックスを用いて補正を行うことを考える. パララックスは平面と3次元点とのずれであり, ここでは, 補正前後でその大きさがあまり変化しないように補正前後のパララックスの差を用いる. このときの再投影誤差は次式となる.

$$E = \sum_{l=1}^6 F_l(X)^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

ただし, 次のように置いた.

$$F_1(X) = \frac{x}{f} - \frac{X}{Z}, \quad (12)$$

$$F_2(X) = \frac{y}{f} - \frac{Y}{Z}, \quad (13)$$

$$F_3(X) = \frac{x'}{f} - \frac{X'}{Z'}, \quad (14)$$

$$F_4(X) = \frac{y'}{f} - \frac{Y'}{Z'}, \quad (15)$$

$$F_5(X) = \left(\frac{X'}{Z'} - \frac{\tilde{X}'}{\tilde{Z}'}\right) - \left(\frac{x'}{f} - \tilde{x}'\right), \quad (16)$$

$$F_6(X) = \left(\frac{Y'}{Z'} - \frac{\tilde{Y}'}{\tilde{Z}'}\right) - \left(\frac{y'}{f} - \tilde{y}'\right) \quad (17)$$

この再投影誤差をガウス・ニュートン法などにより最小化することで, 平面上にない点の復元を行う.

## 5. システムの構成

上述の提案法の有効性を確認するために、システムを実現した。ここでは、大きく分けて次の二つの処理を行う。

- (1) ドローン映像に特化した適切なフレーム選択
- (2) 支配的平面の情報を用いた3次元復元

ドローンに搭載されたカメラで砂浜を観測する際、しばしばホバリングによって映像を確認することも多い。また網羅的に観測する際には復元に適さない純粋回転に近い移動も多い。そこで本システムでは、橋本らの手法 [17], [18] を用いて、ドローン映像からキーフレームを選択する。ここでは、フレーム間のオプティカルフローによる運動推定を行い、カメラの運動が並進かつキーフレームとの重なり率がしきい値を下回ったとき、新しいキーフレームとして登録する。また、運動が回転やホバリングと判定されたときは無視するような処理を行う。

### 5.1 平面部分と立体部分の検出

観測対象である砂浜には漂流物や木片、砂の起伏などが存在するため、支配的な平面として一つの射影変換行列の関係を満足する部分とそうでない部分に分離する必要がある。ここでは、次のようにして、2フレーム間の点群を分離する。

- (1) 砂浜の平面部分を検出するために、射影変換を拘束条件とした RANSAC [19] を行い、得られたインライアの対応点集合を  $S_H$  とする。
- (2) 漂流物や砂浜の凹凸などの立体部分を検出するために、エッジ検出方程式を条件とした RANSAC を行い、得られたインライアの対応点集合を  $S_F$  とする。
- (3) 集合  $S_F$  は平面部分と立体部分を含む集合であるから、平面部分の点の集合との差  $S_F - S_H$  を立体部分の対応点群とする。

### 5.2 射影変換行列の計算と運動パラメータ・平面パラメータへの分解

支配的平面の検出により得られた対応点集合  $S_H$  を使い、その平面に対する射影変換行列  $H$  を求める。ここでは FNS 法 [9], [20] を用いた。次に、推定した射影変換行列  $H$  から運動パラメータ  $\{R, t\}$  と平面パラメータ  $\{n, d\}$  を求める [9]。このとき解は4組得られるため、法線ベクトル  $n$  はカメラから遠ざかる方向とし、カメラの向きは平面に対して垂直に向いていると仮定して、法線ベクトル  $n$  とベクトル  $(0, 0, 1)^T$  の内積が1に近い解を選択する。

### 5.3 平面部分と立体部分の3次元復元

射影変換行列  $H$ 、運動パラメータ  $\{R, t\}$  と平面パラメータ  $\{n, d\}$  を使い、前節の手法を用いて3次元復元を行う。

### 5.4 形状の合成

以上の復元を連続する2つのキーフレーム毎に行い、これらを合成して大きな形状を復元する。

2画像から復元された形状は並進ベクトルのノルムを1に正規化されたスケールで復元されているので、連続するキーフレーム対から復元した形状を合成するには、それぞれの位置や回転とスケールを合わせる必要がある。

そこで、まず、次の手順により、形状の合成時のずれを抑えるために復元形状から大きく離れてしまっている点の除去を行う。

- (1) 各3次元点に対して、近傍  $N$  点の距離の平均値を求める。
- (2) 求めた距離の平均値がしきい値を超えるなら、その点を除去する。

次に2つの形状を合成する。合成する形状を  $M^a$  と  $M^b$  として、形状  $M^a$  と  $M^b$  の対応する3次元点を  $X_i^a, i = 1, \dots, N_a$  と  $X_j^b, j = 1, \dots, N_b$  とするとき、合成の手順は次の通りとなる。

- (1) 2つの形状の重心  $X_g^a, X_g^b$  をそれぞれ計算する。

$$X_g^a = \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} X_i^a, \quad X_g^b = \frac{1}{N_b} \sum_{j=1}^{N_b} X_j^b \quad (18)$$

- (2) 計算した重心が原点となるように、3次元形状  $M^a$  と  $M^b$  を移動させる。

$$\begin{aligned} \tilde{X}_l^a &= X_l^a - X_g^a, \quad l = 1, \dots, N_a, \\ \tilde{X}_m^b &= X_m^b - X_g^b, \quad m = 1, \dots, N_b \end{aligned} \quad (19)$$

- (3) 移動後の形状  $M^a$  と  $M^b$  の対応する点からスケール  $S$  を計算する。

$$S = \frac{\sum_{k=1}^M \|\tilde{X}_k^a\|}{\sum_{k=1}^M \|\tilde{X}_k^b\|} \quad (20)$$

ここで、 $\{\tilde{X}_k^a, \tilde{X}_k^b\}, k = 1, \dots, M$  は対応する3次元点群とする。

- (4) スケール  $S$  を使って、形状  $M^a$  のスケールを形状  $M^a$  に合わせる。

$$X_m^b = S X_m^b, \quad m = 1, \dots, N_b \quad (21)$$

- (5) モーメント行列  $M$  を

$$M = \sum_{k=1}^M X_k^a X_k^{bT} \quad (22)$$

を計算し、特異値分解する。

$$M = U \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) V^T \quad (23)$$

合成のための回転行列  $R'$  を次式で計算する [9]。

$$R' = U \text{diag}(1, 1, \det(UV^T)) V^T \quad (24)$$

- (6) 形状  $M^b$  を行列  $R'$  で

$$\hat{X}_m^b \leftarrow R' X_m^b, \quad m = 1, \dots, N_b \quad (25)$$

のように回転させ、形状  $M^a$  に合成する。

表 1 実験環境.

項目	仕様
CPU	Core i7-6700k
メモリ	16GB
OS	Ubuntu14.04 LTS

表 2 実験に使用したドローン.

項目	使用ドローン 1	使用ドローン 2
モデル	Phantom 3 Professional	Inspire 2
メーカー	DJI	DJI
画像サイズ	3840 × 2160	3840 × 2160
焦点距離 [画素]	2362	2680
水平画角 [度]	83	73
垂直画角 [度]	61	53
フレームレート [fps]	30	30

表 3 形状評価に用いた動画の条件.

	動画 1	動画 2	動画 3
場所	閑上浜 A	閑上浜 B	赤羽海岸
ドローン	phantom3	phantom3	phantom3
動画時間 [秒]	20	30	35
フレーム数 [枚]	10	33	32
高度 [m]	15	15	15
カメラの向き	斜め	真下	真下
移動方向	右	後	前後

表 4 復元できた 3 次元点の数.

	動画 1	動画 2	動画 3
提案手法の点数 [個]	43625	266597	180468
Bundler の点数 [個]	28811	115097	37193
LSD-SLAM の点数 [個]	375896	3749935	2372968

## 5.5 バンドル調整

最後に、形状合成後の 3 次元点、カメラ位置、回転を初期値として与えてバンドル調整を行う。ここでは、文献 [9] の方法を用いた。このとき、バンドル調整の繰り返し最中に再投影誤差が大きくなってしまった点に対して、設定したしきい値を上回ったときに取り除く処理を加えている。

## 5.6 3次元復元の手順のまとめ

手順をまとめると、平面状シーンに対する支配的平面の情報を用いた 3 次元復元は次の流れとなる。

- (1) 平面部分と立体部分の検出
- (2) 射影変換行列の計算と運動パラメータ・平面パラメータへの分解
- (3) 平面部分と立体部分の 3 次元復元
- (4) 形状の合成
- (5) バンドル調整

## 6. 実画像実験

実際にドローンで撮影した動画を用いて、従来法との形状の比較実験と復元精度の評価実験を行った。表 1 に実験環境、表 2 に使用したドローンの仕様を示す。実験では事前にカメラキャリブレーションを行って内部パラメータは既知とし、レンズ歪みを取り除いた画像を使用した。また画像の特徴点検出は、予備実験により多くの対応が得られた SURF[21] を用いた。実際の動画は、まずドローンを撮影予定の高度まで上昇させ、高度はほとんど変えずに水平方向のみの移動により、地表の撮影を行った。

### 6.1 復元形状の比較

実験に使用した 3 種類の動画の撮影条件を表 3 に、これらの動画の最初の 4 枚のキーフレームを図 4 に示す。動画 1 は平坦な砂浜と砂の山が同時に映るシーン、動画 2 は平坦な砂浜および砂の山が映るシーン、動画 3 は平坦な砂浜

に漂流物の山があるシーンである。

また比較として、Bundler と LSD-SLAM による復元を行った。Bundler には提案手法と同じキーフレームを与え、LSD-SLAM には 640 × 380 にリサイズした動画を使用した。

各手法の復元点数の比較を表 4 に、提案手法の再投影誤差を表 5 に示す。また各動画から得られた復元形状結果を図 5 から図 7 に示す。図 5 から 7 を見てわかる通り、動画 1 に対しては提案手法と Bundler では安定して復元することができたが、LSD-SLAM では歪みが生じている。これは、動画の最初の部分においてホバリングがあり、その際の推定誤差が大きくなったためと考えられる。動画 2 では、提案手法では平面部分が平坦に、立体部分である砂の山も復元できたのに対し、Bundler と LSD-SLAM においては平面部分で歪みが生じている。これは提案手法が射影変換ベースの手法であるのに対し、Bundler と LSD-SLAM は基礎行列 (基本行列) ベースの手法であり、このようなほぼ退化シーンに対する影響が出たものと考えられる。また動画 3 では、提案手法は歪みは少ないが、フレームの初めの方と後の方で復元した形状においてずれが生じたのに対し、Bundler では形状の歪みがあるが提案法のようなずれは発生しなかった。また、LSD-SLAM では安定して復元できた。この動画 3 のシーンは比較的起伏が大きいことが影響しているだけでなく、Bundler や LSD-SLAM ではループクロージングのような遠いフレーム間での対応を利用しているためと考えられる。一方、提案手法ではバンドル調整による高精度化を行っているが、離れたフレーム間でのループクロージングは行なっていないため、合成時の誤差の累積が多くなってしまい補正しきれず形状のずれが発生したと考えられる。したがって、より高精度な復元を行うためには、できるだけ多くのキーフレーム間についてループクロージングを検出後に、改めてバンドル調整のような最適化を行う必要があると考える。





図 4 実験に使用した最初の 4 フレーム (上: 動画 1, 中: 動画 2, 下: 動画 3).

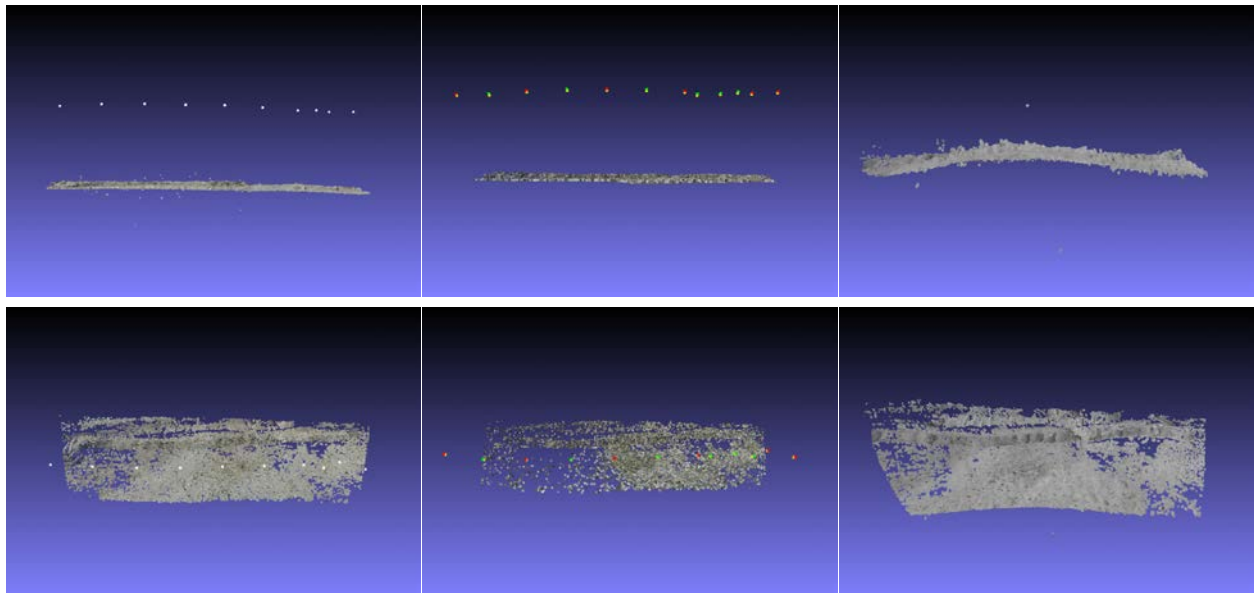


図 5 動画 1 の復元結果 (左: 提案手法, 中: Bundler, 右: LSD-SLAM).

表 5 再投影誤差 [画素].

	動画 1	動画 2	動画 3
バンドル調整前	0.615	0.847	1.00
バンドル調整後	0.451	0.621	0.697

## 6.2 復元精度の評価実験

次に本学のグラウンドを撮影した映像を用いて、復元形状の精度を評価した。実験に使用した動画の情報を表 6 に、各動画から選択された最初の 4 フレームを図 8 に示す。ここでは、復元結果のラグビーゴールの二つのポール間を基準として、復元結果全体のスケールを合わせ、トラックの端にある排水溝の蓋の幅の測定を行った。復元した形状を図 9 に、精度の評価結果を表 7 に示す。

蓋の大きさの真値 59.7[cm] に対して、蓋 1 では誤差が 0.451[cm]、蓋 2 では誤差が 2.08[cm] となった。蓋 1 と蓋 2 で精度が異なる理由としては、対応点の位置ずれも考え

表 6 精度評価に用いた動画の撮影条件.

	動画 4
場所	グラウンド
ドローン	Inspire2
動画時間 [秒]	20
フレーム数 [枚]	13
高度 [m]	15
カメラの向き	真下
移動方向	前

表 7 蓋の真値と精度評価結果.

	真値 [cm]	測定値 [cm]	誤差 [cm]
ポール間	500.0	—	—
蓋 1	59.7	59.249	0.451
蓋 2	59.7	57.614	2.086

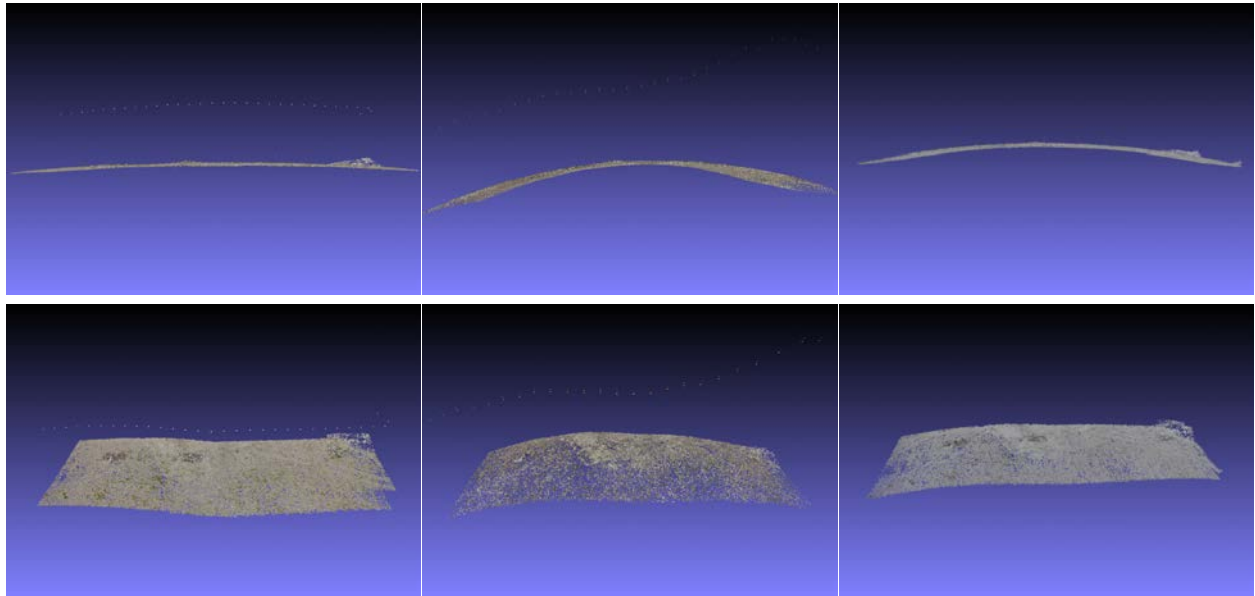


図 6 動画 2 の復元結果 (左: 提案手法, 中: Bundler, 右: LSD-SLAM).

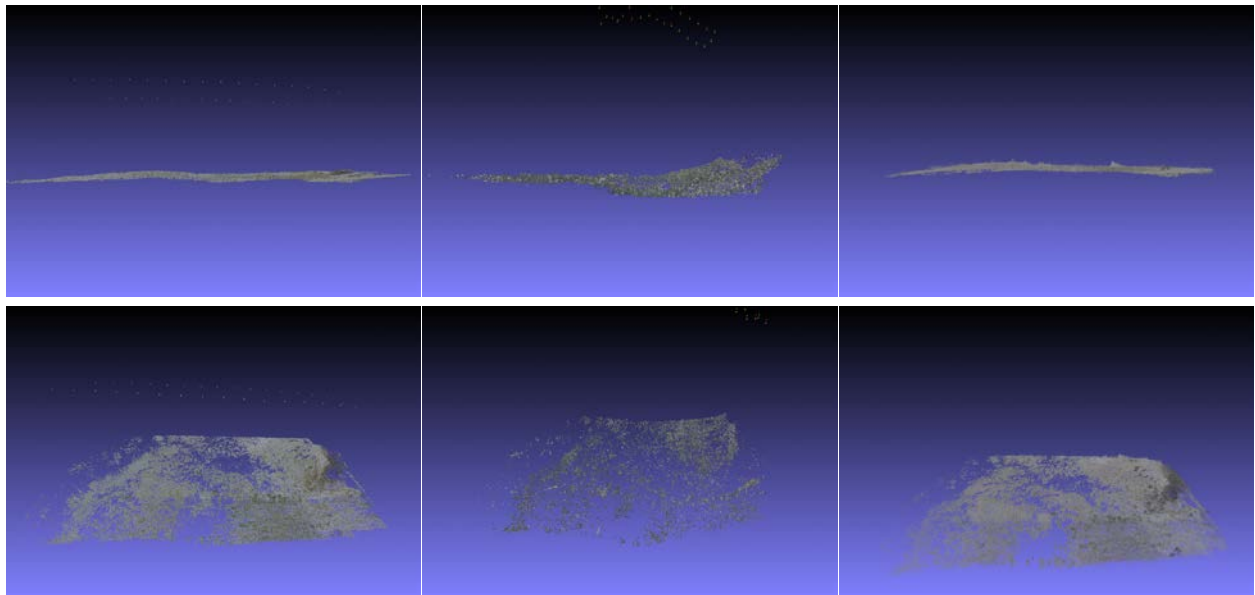


図 7 動画 3 の復元結果 (左: 提案手法, 中: Bundler, 右: LSD-SLAM).

られるが、復元形状の合成において誤差が累積し、映像の後の方のフレームで復元された蓋 2 の復元形状のスケールのずれがより大きくなったためであると考えられる。

## 7. まとめ

本稿では、砂浜のようなほぼ平面であるような広大なシーンに対し、シーンに支配的な平面の情報を用いた高精度な復元方法を提案した。提案法は射影変換をベースとした復元手法であり、基礎行列や基本行列ベースの復元手法では退化してしまう砂浜のような平面シーンに対しても安定して復元が行える。また提案法では平面上に載った点群には、射影変換の最適計算および平面三角測量を用いた復元を行い、平面上にない点群には、その射影変換によるパララックスを用いた補正を行うことで、精度の良い形状復元

が行なえる。そして、実際にドローン映像を処理するシステムを開発し、従来法との比較実験を行った結果、提案法の方が従来に比べ、精度の良い復元が行えることがわかった。

今後の課題として、往復時のずれを抑えるために前後フレーム以外での対応付けや、合成時に共通の 3 次元点が存在しないときの処理を付加するなど、より高精度な復元のための改良を行うことが挙げられる。

## 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究 (C)(No. 15K00232) および基盤研究 (B)(No. 15H02997) による。



図 8 精度評価に使用した動画の最初の 4 フレーム.

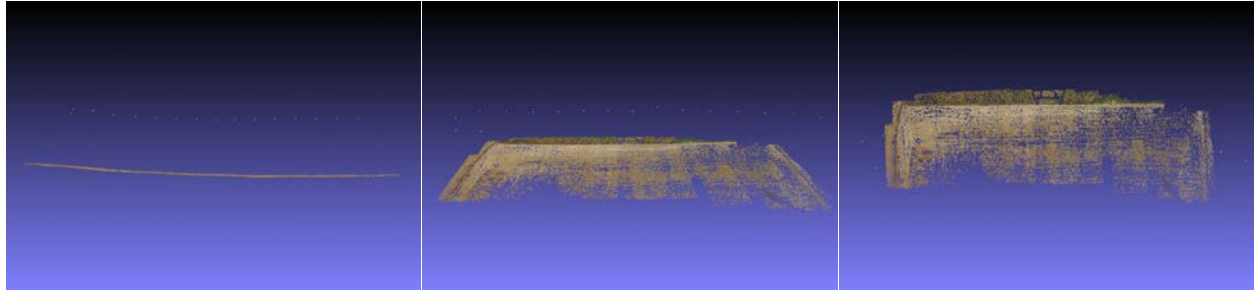


図 9 動画 4 の復元形状.

### 参考文献

- [1] 東日本大震災行方不明者捜索活動協議会実行委員会：東日本大震災行方不明者捜索活動協議会，<http://54renzock53.wixsite.com/mpsa>.
- [2] Snavely, N., Seitz, S. M. and Szeliski, R.: Photo tourism: Exploring photo collections in 3D, *SIGGRAPH Conference Proceedings*, New York, NY, USA, ACM Press, pp. 835–846 (2006).
- [3] Klein, G. and Murray, D.: Parallel Tracking and Mapping on a Camera Phone, *Proc. Eighth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'09)*, Orlando (2009).
- [4] Newcombe, R. A., Lovegrove, S. J. and Davison, A. J.: DTAM: Dense Tracking and Mapping in Real-time, *Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision, ICCV '11*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, pp. 2320–2327 (2011).
- [5] Engel, J., Schöps, T. and Cremers, D.: LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM, *eccv* (2014).
- [6] Mur-Artal, R., Montiel, J. M. M. and Tardós, J. D.: ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 31, No. 5, pp. 1147–1163 (2015).
- [7] Kanazawa, Y., Sakamoto, T. and Kawakami, H.: Robust 3-D reconstruction using one or more homographies with uncalibrated stereo, *Sixth Asian Conference on Computer Vision (ACCV2004)*, Jeju Island, Korea, pp. 503–508 (2004).
- [8] Kanazawa, Y. and Kawakami, H.: Detection of planar regions with uncalibrated stereo using distributions of feature points, *The 15th British Machine Vision Conference (BMVC2004)*, London, U.K., pp. 247–256 (2004).
- [9] 金谷健一，菅谷保之，金澤 靖：3次元コンピュータビジョン計算ハンドブック，森北出版 (2016).
- [10] Lowe, D. G.: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 60, No. 2, pp. 91–110 (2004).
- [11] Furukawa, Y. and Ponce, J.: Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (2007).
- [12] 金谷健一：空間データの数理—3次元コンピューティングに向けて—，朝倉書店 (1995).
- [13] Hartley, R. I. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, second edition (2004).
- [14] Sawhney, H. S.: 3D geometry from planar parallax, *1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 929–934 (1994).
- [15] Sawhney, H. S.: Simplifying motion and structure analysis using planar parallax and image warping, *Proceedings of 12th International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 403–408 vol.1 (1994).
- [16] 矢野直樹，金谷健一：平面シーンの最適三角測量，研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)，Vol. 2010, No. 4, pp. 1–8 (2010).
- [17] 橋本瑞樹，松永竜太郎，金澤 靖：ドローン映像からの広域な平面上形状の高精度な3次元復元，第19回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2016) (2016).
- [18] Matsunaga, R., Hashimoto, M., Kanazawa, Y. and Sonoda, J.: Accurate 3-D reconstruction of sands from UAV image sequence, *2016 International Conference On Advanced Informatics: Concepts, Theory And Application (ICAICTA)*, pp. 1–6 (2016).
- [19] Fischler, M. A. and Bolles, R. C.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395 (1981).
- [20] 新妻弘崇，金谷健一：最適な射影変換の新しい計算アルゴリズム，研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)，Vol. 2009, No. 37, pp. 1–8 (2009).
- [21] Bay, H., Tuytelaars, T. and Van Gool, L.: *SURF: Speeded Up Robust Features*, pp. 404–417, Springer Berlin Heidelberg (2006).