

## 写真から復元した3次元形状と地形データの位置合わせ

安 仲 啓 輔<sup>†</sup> 玉 木 徹<sup>†</sup> 金 田 和 文<sup>†</sup>

本研究では、地雷除去作業に必要な起伏データを含んだ地図の作成の基礎的検討として、複数枚の写真に写る地形の3次元形状の復元を行う。まず、キャリブレーションパターンを撮影し、カメラ内部行列を求める。そして、対象となる地形を2方向から撮影して、エピポーラ拘束に基づいて2つの視点間の位置関係を算出し、3次元形状を復元する。さらに、レンジファインダから得られた地形のデータと位置合わせを手動で対応点を与えて行う。

### Shape reconstruction from images and registration to range data

KEISUKE YASUNAKA,<sup>†</sup> TORU TAMAKI<sup>†</sup>  
and KAZUFUMI KANEDA<sup>†</sup>

In this paper, we describe a method for reconstructing three dimensional shape of geograph by using two or more photographs, for a basic examination of making a map used to review a field in prior to detecting and removing land mines layed in the area. First, a picture of calibration pattern, is taken to compute camera intrinsic parameters. Next, pictures of the geograph from two different directions, are taken, and relative position of two view points is estimated based on the epipolar geometry, then the three dimension shape of the geograph is recovered. Finally, the restored points are registered to data obtained by a range finder with correspondences of those points given manually.

#### 1. はじめに

現在、世界中には約7000万個<sup>3)</sup>の地雷が埋設されている。地雷は一度埋設されると半永久的にその効力を保ち続ける。そのため、戦争が終わったあとも地雷原と知らずに足を踏み入れた一般市民に怪我を負わせ、埋設国において復興・開発上の労働力を失うという大きな障害の一つとなっている。これを受けて、日本をはじめ世界の国々では、地雷除去の援助・研究<sup>4)</sup>を行っている。

地雷の探知・除去技術において、地雷が埋設されている地域の土壌や地形、気候、土地利用状況、などによって必要な機器・技術は異なるため、地雷埋設地域の状況を把握し、どのような機器・技術が必要となるか知ることが重要となる。そこで、地形の起伏、土地利用状況など情報を含む地図(3次元地図)を作成することによって地雷埋設地域の状況を把握する。

本研究が想定する地雷源地図作成のながれを、図1に示す。飛行体に搭載したデジタルカメラにより地雷原を撮影した画像を、レンジファインダからは地雷原の起伏の3次元データを得る。まず、地雷原を撮影

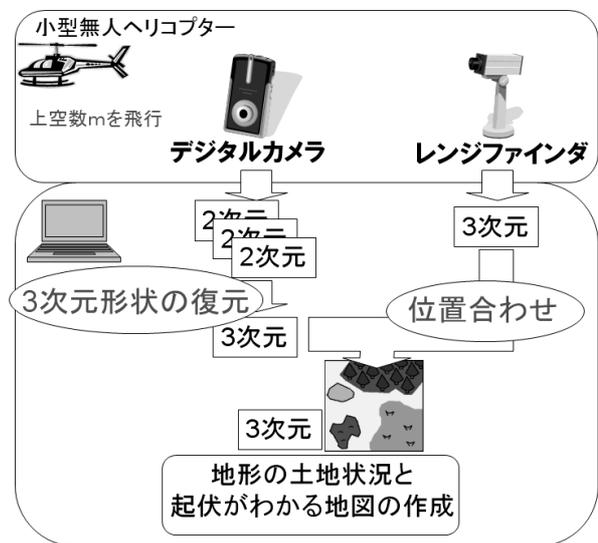


図1 地雷源地図作成の流れ

した画像から、地形の起伏と地形の利用状況が同時にわかるように地形の3次元形状の復元を行う。そして、レンジファインダからのデータとの位置合わせを行い、それを全範囲に繰り返し行う。

<sup>†</sup> 広島大学大学院工学研究科情報工学専攻  
Department of Information Engineering, Graduate  
School of Engineering, Hiroshima University

本研究ではその基礎的検討として、対象の地形を撮影した2枚の画像から、まず3次元形状の復元を行う。そして、復元した3次元形状が正しく復元できているかどうかを確かめるため、レンジファインダにより得た対象の地形の3次元データと位置合わせを行い、対象地形の3次元形状の復元の精度を検討する。

## 2. カメラ校正<sup>1)</sup>

3次元形状の復元を行う際には、まずカメラ校正を行っておく必要がある。カメラ校正(キャリブレーション)は3次元空間上の点が、カメラで撮影した画像にどのように射影されるかを調べるものであり、カメラ内部変数を求めるプロセスである。

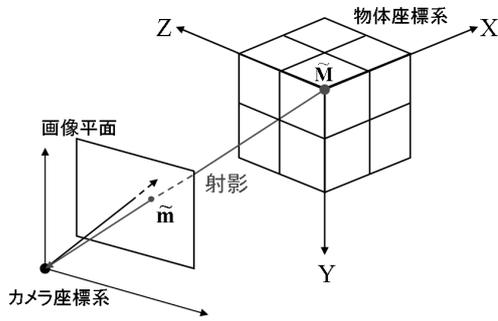


図2 カメラ校正

3次元空間上の点の座標  $\tilde{M} = [X \ Y \ Z \ 1]^T$  を画像に射影した座標  $\tilde{m} = [u \ v \ 1]^T$  とすると中心射影における射影方程式は、次のように表現される。

$$\tilde{m} = P\tilde{M} = A \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \tilde{M} \quad (1)$$

ここで、 $A$  はカメラ内部行列、 $P$  は射影行列、 $R$  と  $t$  はそれぞれ3次元座標と画像座標間の回転と並進を表している。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1^T & p_{14} \\ \mathbf{p}_2^T & p_{24} \\ \mathbf{p}_3^T & p_{34} \end{bmatrix}$$

式(1)を展開すると、1つの3次元空間上の点と画像上の点の対応の組から  $P$  の要素に関する2つの方程式

$$\mathbf{p}_1^T \tilde{M} - u \mathbf{p}_3^T \tilde{M} + p_{14} - u p_{34} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{p}_2^T \tilde{M} - v \mathbf{p}_3^T \tilde{M} + p_{24} - v p_{34} = 0 \quad (3)$$

を導出できる。この3次元空間上の点と画像上の点の対応の組を  $n$  組与えることによって  $P$  を導出する。

さらに、 $P$  の実際のスケールは  $\|\sqrt{p_{31}^2 + p_{32}^2 + p_{33}^2}\| = \|\mathbf{p}_3\| = 1$  で計算される。

次に  $P$  から、カメラ内部行列  $A$

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

を求める。 $\alpha_u, \alpha_v$  を軸の単位長、 $u_0, v_0$  を画像中心の座標とすると、

$$u_0 = \mathbf{p}_1^T \mathbf{p}_3 \quad (4)$$

$$v_0 = \mathbf{p}_2^T \mathbf{p}_3 \quad (5)$$

$$\alpha_u = \sqrt{\mathbf{p}_1^T \mathbf{p}_1 - u_0^2} \quad (6)$$

$$\alpha_v = \sqrt{\mathbf{p}_2^T \mathbf{p}_2 - v_0^2} \quad (7)$$

の関係式よりカメラ内部行列  $A$  の各パラメータを求める。

## 3. 3次元形状の復元<sup>1)</sup>

前節において、それぞれの画像にどのように3次元空間上の点が射影されるかを求めた。この画像に対しての射影に従って、ある未知の空間を見ている2枚の画像間の幾何関係を定めるエピポーラ幾何について述べる。

未知の空間上の点を画像1に射影した  $\tilde{m} = [u \ v \ 1]^T$  と画像2に射影した点  $\tilde{m}' = [u' \ v' \ 1]^T$  には

$$\tilde{m}^T F \tilde{m}' = 0 \quad (8)$$

の関係がある。これをエピポーラ拘束といい、式(8)をエピポーラ方程式という。また、 $F$  を基礎行列といい、3次元空間上の点を2枚の画像に射影したとき、その2枚の画像に射影された点のデジタル画像座標の関係を決めているものである。

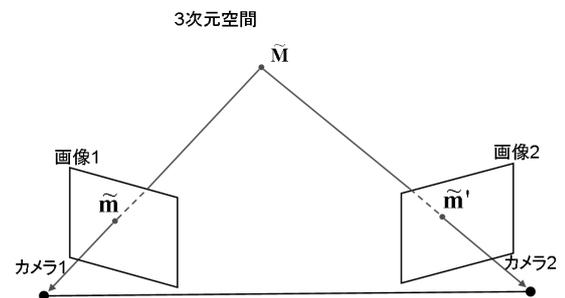


図3 エピポーラ幾何

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix}$$

式 (8) を展開すると

$$\begin{aligned} &uu'F_{11} + uv'F_{12} + uF_{13} + vu'F_{21} + vv'F_{22} \\ &+ vF_{23} + u'F_{31} + v'F_{32} + F_{33} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

2枚の画像間の点の  $n$  組の対応により、 $F$  を導出する。

次に、3次元空間上の点の復元を行う。まず、前節で導出した基礎行列  $F$  の両側からカメラ内部行列  $A$  をかけることによって正規化を行う。

$$E = A^T F A' \quad (10)$$

ここで、 $A, A'$  はそれぞれ画像 1、画像 2 を撮影したカメラのカメラ内部行列である。また、 $E$  は基本行列といい、3次元空間上の点を 2枚の画像に射影したとき、その 2枚の画像に射影された点の正規化画像座標の関係を定めているものであり、2枚の画像におけるそれぞれの対応点の正規化画像座標を  $\tilde{x} = [x \ y \ 1]^T$ 、 $\tilde{x}' = [x' \ y' \ 1]^T$  とすると、

$$\tilde{x}^T E \tilde{x}' = 0 \quad (11)$$

のような関係となる。また、正規化画像座標とデジタル画像座標には

$$\tilde{x} = A^{-1} \tilde{m} \quad (12)$$

の関係があり、カメラ内部行列  $A$  によって簡単に求めることができる。

基礎行列  $E$  には 2枚の画像間の幾何関係の並進ベクトルを  $t$  とすると、

$$E^T t = 0 \quad (13)$$

の関係がある。そこで、 $P$  を求めたときと同様の方法により、 $EE^T$  の固有値分解を行い最小の固有値に対応する固有ベクトルを  $\bar{t}$  の方向をさす単位ベクトル  $\bar{t}$  として導出する。また、 $\bar{t}$  にスケールを合わせた  $E$  を  $\bar{E}$  とすると

$$\bar{E} = \bar{t} \times R \quad (14)$$

の関係から 2枚の画像間の回転行列  $R$  を求める。

回転行列  $R$  と並進ベクトル  $\bar{t}$  により運動が復元できたならば、形状を復元することができる。図 4 にその概念図を示す。2枚の画像におけるそれぞれの対応点の正規化画像座標を  $\tilde{x} = [x \ y \ 1]^T$ 、 $\tilde{x}' = [x' \ y' \ 1]^T$  示しており、 $s, s'$  はそれぞれベクトル  $\tilde{x}, \tilde{x}'$  の長さを表している。

2枚の画像における対応点は同じ 3次元空間上の点を射影した点であるので、各画像の焦点と  $\tilde{x}, \tilde{x}'$  を結んだ直線はこの 3次元空間上の点で交わるはずである。しかし、実際にはノイズの影響で 2本の直線が厳密に 1点で交わることはまずない。そこで、2本の直線までのユークリッド距離の自乗和が最小となる 3次元空間上の点を求め、その点を本来交わるべき 3次元空間上の点として与える。1枚目の画像の 3次元座標

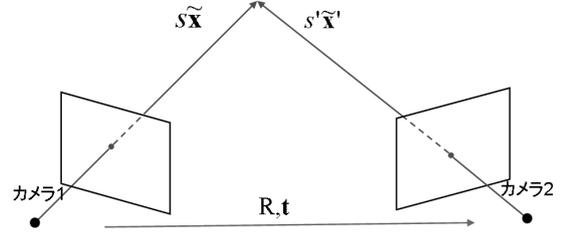


図 4 概念図

系を 3次元空間の座標系とすると、ある 3次元空間上の点の座標  $M = [X \ Y \ Z]^T$  に対して、式 (15) のような評価関数を立てることができる。

$$C = \|M - s\tilde{x}\|^2 + \|M - s'R\tilde{x} - t\|^2 \quad (15)$$

ここで、 $C$  を  $s, s'$  で微分したものがそれぞれ 0 であると、式 (15) の前後それぞれの項を  $=0$  とおいて、 $M$  について連立方程式をたて、それを解くと

$$\begin{aligned} \left( 2I - \frac{\tilde{x}\tilde{x}^T}{\tilde{x}^T\tilde{x}} - \frac{R\tilde{x}'\tilde{x}'^T R^T}{\tilde{x}'^T\tilde{x}'} \right) M = \\ \left( I - \frac{R\tilde{x}'\tilde{x}'^T R^T}{\tilde{x}'^T\tilde{x}'} \right) t \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、

$$B = \left( 2I - \frac{\tilde{x}\tilde{x}^T}{\tilde{x}^T\tilde{x}} - \frac{R\tilde{x}'\tilde{x}'^T R^T}{\tilde{x}'^T\tilde{x}'} \right)$$

$$b = \left( I - \frac{R\tilde{x}'\tilde{x}'^T R^T}{\tilde{x}'^T\tilde{x}'} \right) t$$

とすると、

$$BM = b \quad (17)$$

のように書くことができ、これから

$$M = B^{-1}b \quad (18)$$

式 (18) に算出した回転行列  $R$ 、並進ベクトル  $t$  を代入し、さらにある 3次元空間上の点を画像 1 に射影した点  $\tilde{x} = [x \ y \ 1]^T$ 、画像 2 に射影した点  $\tilde{x}' = [x' \ y' \ 1]^T$  を与えることによって、3次元空間上の点  $M = [X \ Y \ Z]^T$  を復元することができる。

#### 4. 位置合わせ<sup>2)</sup>

2枚の画像から3次元形状を復元した点群データが3次元スキャナから得た点群データのどの部分にあたるかを調べるために、それぞれのデータを復元点を回転、並進させることによって位置あわせを行う。ただし、今回は3次元復元の精度がどのくらいのものであるかを確認するため、3次元スキャナのデータが正しいと仮定し、手動により対応点を与え位置あわせを行い、その結果から復元精度を評価する。

これにあたり、まず復元した点群データの回転  $R$ 、並進  $t$  を行い、その移動先の点の座標から最近傍の3次元データから得た点を対応点とし、そのユークリッド距離を全対応の組に対して求め、そのユークリッド距離の和が最小となるような回転  $R$ 、並進  $t$  が最適であると考え、そこで、本研究では誤差関数として式(19)のように設定する。

$$E(p) = \sum_i^N \|RM_i + t - M'_i\|^2 \quad (19)$$

ここで、 $M_i$  は  $i$  番目の復元点、 $M'_i$  は  $i$  番目の復元点に対応する3次元スキャナから得た点、 $N$  は復元点数、 $R$  は復元点群の座標と3次元スキャナの点群の座標の幾何関係の回転行列、 $t$  は復元点群の座標と3次元スキャナの点群の座標の幾何関係の並進ベクトルをそれぞれ表している。この式(19)が最小になるように回転行列  $R$  と並進ベクトル  $t$  を設定することにより位置あわせを行う。

### 5. 実験結果

#### 5.1 キャリブレーションパターン

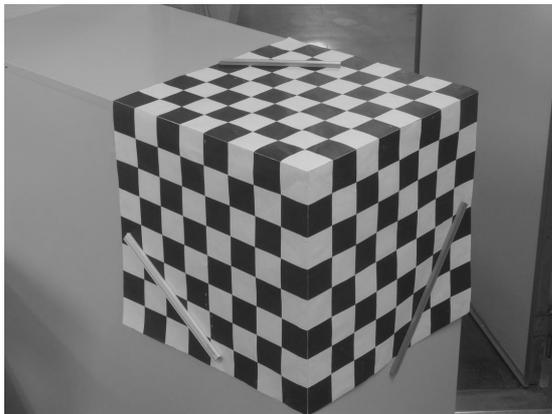


図5 キャリブレーションパターン

今回の実験において、カメラ校正を行うため図5のようなキャリブレーションパターンを作成した。各方向の大きさは5cm × 5cm、8マス × 8マス × 8マスのキューブとした。また、手前の角を原点(0,0,0)とし、図5のように  $X$  軸、 $Y$  軸、 $Z$  軸を設定した。また、カメラ校正のためにキャリブレーションパターンを撮影した画像のサイズは2240 × 1680pixelで、実際のキャリブレーションを行う際は、画像を縦横  $\frac{1}{2}$  に縮小をした。

算出した射影行列  $P$  とカメラ内部行列  $A$  を以下に示す。

$$P = \begin{bmatrix} 2138.06 & 238.276 & -1580.46 & 1070210 \\ -611.924 & 2526.08 & -514.577 & 593004 \\ 0.640166 & 0.39961 & 0.656125 & 1737.42 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 2635.08 & 0 & 426.951 \\ 0 & 2634.74 & 280.085 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

#### 5.2 3次元形状の復元

今回は、図6のように同じカメラで対象の地形を左右から撮影した画像を使用し、手動により対応点を100点与えて3次元形状の復元を行った。図7、8にそれぞれの画像から得た対応点を示す。そして、この対応点より得た基礎行列  $F$  を以下に示す。

$$F = \begin{bmatrix} 2.41604e^{-07} & 1.82369e^{-06} & 0.00122519 \\ 2.01693e^{-06} & 1.11958e^{-06} & 0.00207621 \\ 0.00162242 & -0.00527562 & -1.49038 \end{bmatrix}$$

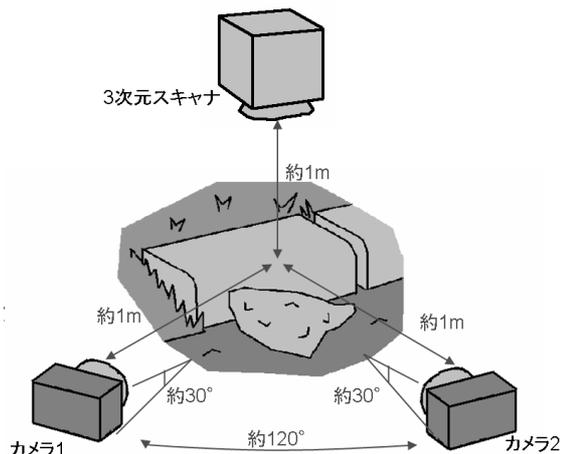


図6 位置関係

また、この  $F$  から導出した  $E$ ,  $\bar{E}$ ,  $\bar{t}$ ,  $R$  をそれぞれ

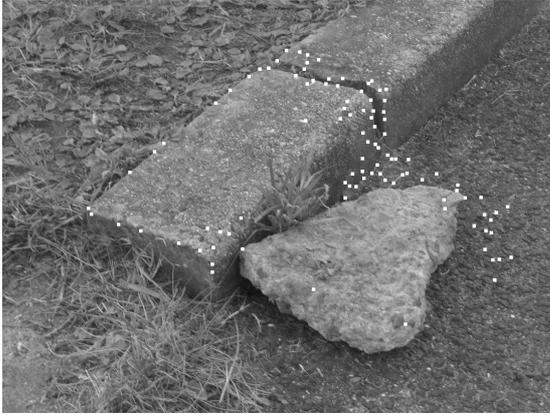


図 7 画像 1 から抽出した点

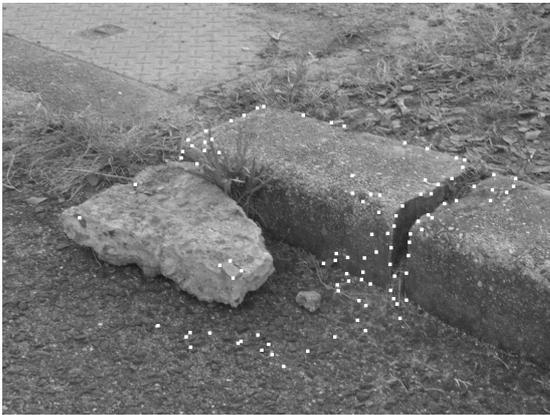


図 8 画像 2 から抽出した点

以下に示す。

$$E = \begin{bmatrix} 1.67761 & 12.6614 & 4.84626 \\ 14.003 & 7.77195 & 8.56532 \\ 6.03561 & -11.0222 & -0.579559 \end{bmatrix}$$

$$\bar{E} = \begin{bmatrix} 0.553157 & 0.484366 & -0.391986 \\ 0.484366 & 0.977749 & -0.0181147 \\ -0.391986 & -0.0181147 & 0.469094 \end{bmatrix}$$

$$\bar{t} = \begin{bmatrix} 0.725725 \\ -0.348575 \\ 0.593143 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.917273 & 0.125426 & -0.377992 \\ 0.210891 & -0.958095 & 0.193853 \\ -0.337838 & -0.257532 & -0.905286 \end{bmatrix}$$

復元した形状を 3 次元プロットした結果を図 (9) に

示す。

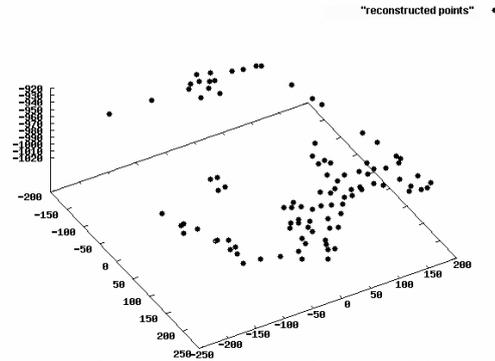


図 9 復元結果 [mm](仰角 30°方位角 60°)

### 5.3 位置合わせ

前節で復元した形状と 3 次元スキャナから得たデータとの位置合わせを行い、復元の精度を算出する。手動により復元点から 30 点を選出し、3 次元スキャナから得た点との対応を与え、誤差関数を最小とするような回転  $R$  と並進  $t$  を算出する。さらに、復元点、残りの 70 点と合わせて、全 100 点に対して先ほど算出した回転、並進を用いて座標変換を行い、式 (20) を用い、3 次元スキャナから得た点の中から、もっとも近い点とのユークリッド距離の和を算出し誤差を求める。

$$E(p) = \sum_i^N \sqrt{\|RM_i + t - M'_i\|^2} \quad (20)$$

算出した  $R, t$  を次に示す。

$$R = \begin{bmatrix} -0.661252 & 0.282433 & -0.704817 \\ 0.878542 & 0.527565 & -0.365468 \\ -0.410494 & 0.71509 & 0.488143 \end{bmatrix}$$

$$t = \begin{bmatrix} -767.061 \\ -381.522 \\ -392.049 \end{bmatrix}$$

図 9 に復元点を 3 次元プロットした結果、図 10 に復元点と 3 次元スキャナからの点との位置合わせを行い、重ねて 3 次元プロットした結果を示す。軸はそれぞれ  $X, Y, Z$  であり、単位はすべて mm、 $Z$  軸、つまり高さ軸は 3 次元スキャナからの負向きの距離、 $X-Y$  平面は 3 次元スキャナの画像平面と平行な面を表している。式 (20) により計算した誤差 100 点合計で  $E(p) = 473$  となった。つまり、1 点あたり 5mm

弱の誤差が出ている。この原因としては、点抽出時の誤差、ピクセルでの丸め誤差、抽出点の偏り、復元範囲と3次元スキャナからの点の範囲のずれなどが考えられる。

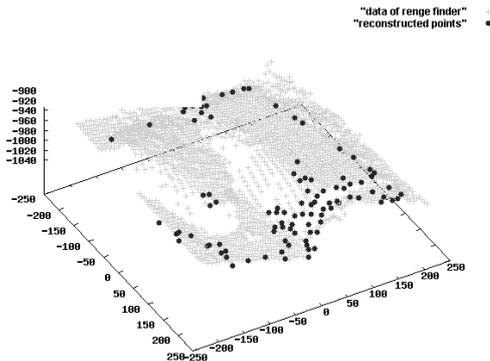


図 10 位置合わせ結果 [mm](仰角 30°方位角 60°)

## 6. おわりに

本論文では、使用するカメラのカメラ校正を行い、そのカメラによって対象の地形を2方向から撮影した画像から3次元形状の復元を行った。さらに、3次元スキャナから得たデータとの位置合わせを行い、3次元形状復元の精度の算出を行った。ただし、検討についてはさまざまな対象や実験環境に対して適応を行っていないので、十分に行えていない。また、今回の実験結果のみに関してはセンチメートル単位の実現が行われていると言える。しかし、今回は図6のような対象から1mの距離からの撮影であるため、比較的精度のよい結果が出たと考えられる。今後、地雷源地図の作成に適応した場合、地雷源を1mの距離から撮影することができるかどうかは未知な部分であり、実際は地雷原上のどの高さまで近づけるかなどわからないので、実験環境を変えることはかなり有効だと考えられる。

今後は、3次元形状を復元において2枚の画を抽出をの自動で行い、また位置合わせにおいて手動で対応点を与えずに回転  $R$  と並進  $t$  を算出する。

## 参 考 文 献

- 1) 徐 剛：写真から作る3次元CG イメージ・ベースド・モデリング&レンダリング，近代科学社(2001)
- 2) 廣田祐一郎，増田智仁，長谷川一英，小川原光一，池内克史：“気球上から取得した三次元形状の歪み補正”，第21回日本ロボット学会学術講演

会(2003)

- 3) CMC カンボジア地雷撤去キャンペーン，<http://cmc-net.jp/>
- 4) 文部科学省，対人地雷探知・除去技術の研究開発，[http://www.mext.go.jp/a\\_menu/kagaku/jirai/main9\\_a4.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/jirai/main9_a4.htm)