

## 2B2-3 飛行型レスキュー・ロボットによる3次元地形測定の誤差軽減

## Reduction of 3D Terrain Measurement Error in Using Aerial Rescue Robots

○ 中西 弘明 (京都大学) 井上 純一 (大阪産業大学)

Hiroaki Nakanishi, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo, Kyoto

Koichi Inoue, Osaka Sangyo University, 3-1-1 Nakagaito, Daito, Osaka

**Abstract:**

In this paper, measurement error in 3D terrain mapping systems by use of aerial rescue robots is analyzed and we propose a method to reduce measurement error. The proposed method consists of (1) attitude estimation by use of EKF, (2) estimation of sensor install angle, and (3) estimation of magnet deviation. We also show experimental results using an autonomous unmanned helicopter.

**Keyword:** 3D Terrain Mapping, Aerial Rescue Robot, Sensor Fusion, Measurement Error Analysis

**1 はじめに**

地形の3次元形状データは非常に有用なデータである。全地球規模で地形データを取得するシステムとして日本が打ち上げた陸域観測衛星だいち(ALOS)がある。この衛星は地図作成、地域観測、資源探査、災害状況把握への貢献が目的である。人工衛星は広域の情報を取得可能であるが、観測希望時刻に必ずしも目的地域を観測できるとは限らない。このため、災害科学を目的とすれば状況把握に十分な効果を発揮すると考えられるが、災害対応活動への適用には迅速さに問題がある。一方、飛行型レスキュー・ロボットは低空を飛行するために観測領域が狭いが、容易かつ迅速に適用可能であるために災害対応用途として有用である。本稿では、飛行型レスキュー・ロボットを利用して3次元地形計測を行う方法について述べ、その測定誤差を低減する方法について述べる。

**2 飛行型レスキュー・ロボット**

現在のところ、レスキュー・ロボットの使用目的は情報収集活動であり、その中でも無人航空機を元にした飛行型レスキュー・ロボットは広域情報収集に適しており、その構造から空中浮遊型、回転翼型、固定翼型に分けることができる。飛行型レスキュー・ロボットの特徴は鳥瞰的画像が得られることにある。鳥瞰的画像は隠れなどが多く、被災地の状況を把握しやすい。また、空中を移動することにより地上の被災状況に依らず上空から速やかに被災地に接近することができるのも飛行型レスキュー・ロボットの利点である。航空法では飛行型レスキュー・ロボットは単なる空中浮遊物に過ぎないが、無人航空機と分類されることから、有人機と飛行高度が区分され、低空域(150m以下)の飛行に限られる。このた

めに有人機と比べると一度に観測できる領域が狭いが、得られる情報の解像度が高く、細かな状況把握が可能である。

**3 3次元地形測量**

移動体を用いたマッピングは測定に用いる移動体の位置情報と移動体から測定点までの距離情報を複合化により実施する。

**3.1 使用センサ**

移動体の位置測定には、機体に搭載した加速度計など慣性センサによる慣性航法(INS)あるいはGPSが用いられている。しかし、INSは加速度計の雑音成分の影響により誤差が増大しやすく、GPSは使用環境に大きく依存する。これらの問題点を解決するために、Kalman FilterによるGPS-INS複合航法を用いる。また、GPS単独航法よりも測定精度が向上することも複合航法を用いる利点である。

距離を測定するセンサとしてはステレオカメラ、レーザ距離計が用いられる。ステレオカメラ自体は軽量であるが、測定可能距離を大きくするためには、視差を大きくせねばならない。つまり、大きな機体が必要となる。また、一度の観測で面状の距離情報を得ることができるが、くまなく地形情報を収集するには機体の移動速度がステレオ処理に必要な演算時間により制限を受ける。すなわち、ステレオカメラは低速飛行が可能な機体に適している。レーザ距離計には単一点測距タイプ、ミラーの回転による2次元スキャンタイプ、レーザ放射・受光部にさらに首振り機構を付加した3次元スキャンタイプが存在する。単一点測距タイプにより十分な分解能で地

形情報を得るために測定対象領域のくまなく飛行せねばならない。すなわち、計測時間が問題となる。これに対して、2次元スキャンタイプでも移動することにより地形情報を蓄積せねばならないが、機首に垂直な面をスキャン面を合わせるようにセンサを取り付けると、機首方向の移動により帯状に地形情報が得られる。このようにスキャン方向に垂直な方向に移動することにより地形情報が獲得することができる。空中からのセンシングでは3次元スキャンタイプは特に必要というわけではない。また、固定翼機は飛行体の中でも移動速度の速さに特徴があるが、移動速度の増加は一スキャンの間に飛行する距離の増加をもたらす。つまり、機体の移動方向に垂直な方向に比べて平行な方向の分解能は減少する。これに対して、回転翼機や飛行船では低速飛行ができるので機体の移動方向に平行な方向の分解能を制御できる。以上の議論より、固定翼の飛行型レスキューロボットは3次元地形情報収集システムのベースとしては適さず、回転翼型あるいは飛行船がそのベースとして適切である[1, 2, 3, 4]。

### 3.2 3次元位置算出法

Fig. 1に飛行ロボット（自律型無人ヘリコプタ）を用いた地形測量の概略図を示す。 $F_B$ を機体軸、 $F_E$ を地球軸とする[5]。このほかにセンサ固定座標系として $F_L$ を用いる。本稿ではレーザースキャナー（以下、LRF）を用いるとして説明するが、他のセンサでも基本的に算出法は同じである。 $F_L$ の原点はレーザ光の射出点にとり、 $z_L$ 軸を射出点を通りラインスキャンの中心を通るようにとる。射出点と放射レーザ光線により作られる平面をスキャン面と呼び、このスキャン面が $y_L-z_L$ 平面となるように $y_L$ 軸をとり、機体右方向を正の向きとする。 $x_L$ 軸はこれらの軸に垂直な方向にとる。3次元地形データの測定プロセスは、 $F_L$ 表現での地表点を $F_B$ 表現、 $F_E$ 表現へと座標変換することにより行なわれる。 $F_L$ の地表点の位置 $\mathbf{r}_L$ は、地表測定点までの距離 $R$ とスキャン角度 $\alpha$ を用いて、

$$\mathbf{r}_L = (0 \ R \cos \alpha \ R \sin \alpha) \quad (1)$$

と表される。LRFは必ずしも機体に平行に取り付けられることは限らないことから、 $F_L$ の $F_B$ に対する姿勢角のそれを取り付け角と呼び、 $(\Phi, \Theta, \Psi)$ で表す。また、LRFは機体重心に取り付けることはできない。 $F_L$ から $F_B$ への変換行列を $L_{BL}$ 、 $F_B$ の原点から $F_L$ の原点への平

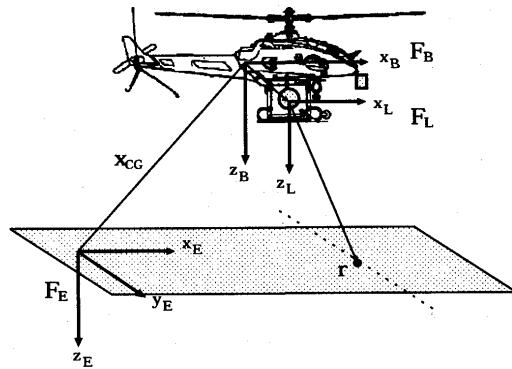


Figure 1: 3D Terrain Mapping by an Aerial Robot

行移動量  $\mathbf{x}_{COE}$  より、 $F_B$  における地表点の位置  $\mathbf{r}_B$  は

$$\mathbf{r}_B = (\mathbf{x}_{COE})_B + L_{BL}\mathbf{r}_L \quad (2)$$

と表せるから、これを  $F_E$  表示に変換して、

$$\mathbf{r}_E = (\mathbf{x}_{CG})_E + L_{EB}(\mathbf{x}_{COE})_B + L_{EB}L_{BL}\mathbf{r}_L \quad (3)$$

測定地点の3次元情報が算出できる。ここで、 $L_{EB}$  は、 $F_B$  から  $F_E$  への変換行列である。また、 $\mathbf{x}_{CG}$  は  $F_E$  の原点から  $F_B$  の原点への平行移動量である。(3) から分かるように、地球固定座標における地形の3次元絶対位置を求めるには、LRFの観測データ  $(R, \alpha)$  の他に

1. 機体の絶対位置と姿勢角  $(\mathbf{x}_{CG}, L_{EB})$
2. LRFの取り付け位置と取り付け角  $(\mathbf{x}_{COE}, L_{BL})$

が必要である。最終的な地形の精度は、これらの精度に依存する。

### 3.3 誤差解析

(3) を元にして、3次元地形測定誤差の解析する。ただし、3次元地形測定において特に重要な高さ方向のみを示す。また、議論を簡単化するために、機体ピッチ角、取り付けピッチ角は0であるとする。(3)を展開すると測定点の高度 $h$ は、

$$h = H - R \cos \alpha \cos \phi' + R \sin \alpha \sin \phi' \quad (4)$$

となる。ここで $\phi'$ は機体ロール角 $\phi$ 、取り付けロール角 $\Phi'$ の合成ロール角である。それぞれの測定誤差は独立と仮定し、(4)より $h$ の誤差分散 $\sigma_h^2$ を求める

$$\sigma_h^2 = \sigma_H^2 + \cos^2(\alpha + \Phi')\sigma_R^2 + R^2 \sin^2(\alpha + \Phi')[\sigma_{\Phi'}^2 + \sigma_{\alpha}^2] \quad (5)$$

となる。ここで  $\sigma_H^2$ ,  $\sigma_R^2$ ,  $\sigma_\alpha^2$ ,  $\sigma_\Phi^2$  はそれぞれ複合航法システムによる測定誤差, LRF の測定距離誤差, 測定角度の誤差, 取り付け角の誤差の分散である。 (5) が表すように,  $\sigma_H^2$  は  $\sigma_h^2$  へ単純な和として影響する。よって, 平行移動に関する値  $x_{CG}$  の測定誤差は単純に地形データ誤差に加算されるにすぎない。RTK-GPS および GPS-INS 複合航法による機体位置の誤差は 2cm 程度と小さい。LRF 取り付け位置の測定誤差は一般にそれほど大きなものとはならない。これらに対して (5) の第三項は  $R$  の増加につれて大きくなる。この項は姿勢角誤差の影響による測定誤差であり, 測定誤差に最も大きな影響を与える。センサが機体に剛体的に取り付ける場合は  $\sigma_\alpha^2$  は 0 であるが, 取り付け角誤差は算出値に大きな偏差をもたらす。以上の議論は測定地点の水平位置の算出においても同様である。つまり, 角度に関する測定精度が 3 次元地形測定誤差に対して最も大きな影響がある。

## 4 3 次元地形測定の誤差軽減

前節で述べたように 3 次元地形測定の主要誤差要因は姿勢角の誤差である。姿勢角の測定・推定誤差は (1) センサ取り付け角誤差と (2) 機体姿勢角推定誤差に分類することができる。以下では, それぞれの誤差を軽減する方法について述べる。

### 4.1 取り付け角測定

センサの取り付け角の精密測定の重要性はリモートセンシングの分野で指摘・研究されている。Miller らは無人ヘリコプタに対する LRF の取り付け角の測定法を提案しているが, キャリブレーション用の測定点 (マーカ) までの距離を十分に長くする必要があるため, マーカ上を飛行し採集した測定データを基に取り付け角を求める [1]。この方法はロボットがサンプリングを実施した位置の測定誤差の影響が大きい。その影響を小さくするためにはロボットとマーカ間の距離を大きくせねばならない。つまり, 高高度からマーカ位置を測定せねばならないが, 高高度から小さいマーカにレーザを照射するのは困難であり時間・手間が大きい。これに対して, 本稿では取り付け角の簡便かつ精密な測定法を提案する。

Fig. 2 に取り付け角の測定用システムの模式図を示す。LRF を取り付けた飛行型ロボットを地上からある程度の高さの台の上に据え, 地上には 4 点のマーカを設置する。実験に用いた LRF の最短測定距離が 2m であったので, 計測では台の高さをおよそ 2m とした。提案手

法は取り付け角が計測を極力小さな系で実施するものである。取り付け角の算出をするために測定するものは次の通りである。

1. 機体ロール角およびピッチ角 ( $\phi, \theta$ )
2.  $F_L$  におけるマーカの相対位置 ( $\mathbf{r}_{ABL}$  など)
3.  $F_E$  におけるマーカの相対位置 ( $\mathbf{r}_{ABE}$  など)

以下の, 取り付け角の算出にはヨー角  $\psi$  は現れない。このためにその測定の必要はない。1. は次節に示す方法で算出する。ただし, 測定誤差を軽減するために測定結果の時間平均をとる。2. は LRF の測定データより求めることができる。マーカの特定は既知の形状あるいはレーザ反射率を用いて行う。3. を求めるには  $x_B$  軸とレーザスキャン方向軸  $y_L$  の  $x_E$ - $y_E$  面への射影  $P \mathbf{L}_{EB} \mathbf{e}_{x_B}$ ,  $P \mathbf{L}_{EB} \mathbf{L}_{BL} \mathbf{e}_{y_L}$  を用いる。ここで  $\mathbf{e}_X$  は  $X$  方向の単位ベクトル, 射影行列  $P$  は

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

である。3. はこれらのなす角度  $\beta$  を求めることにより容易に算出できる。以下に, これらの測定データから取り付け角  $[\Phi, \Theta, \Psi]$  を算出する方法を示す。

[ $\Phi$  の算出] (3) により 2 つのマーカ A, B の測定データから算出したマーカの 3 次元位置の差をとる。

$$(\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A)_E = \mathbf{L}_{EB} \mathbf{L}_{BL} (\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A)_L \quad (7)$$

が成り立つことから, 評価関数  $J_\Phi$  を

$$J_\Phi = \frac{1}{2} \| \mathbf{L}_{BL} (\mathbf{r}_{AB})_L - \mathbf{L}_{BE} (\mathbf{r}_{AB})_E \|^2 \quad (8)$$

と定義する。 $\Phi$  は  $J_\Phi$  を最小にするから, (8) を最適化することによって  $\Phi$  の推定値  $\hat{\Phi}$  を求めることができる。

[ $\Theta$  の算出] 4 つのマーカの重心位置は必ずスキャン面上にあることから,

$$(\mathbf{r}_i)_E - \frac{1}{4} \sum_{j=A,B,C,D} (\mathbf{r}_j)_E \quad (i = A, B, C, D) \quad (9)$$

はスキャン面上のベクトルである。これらの外積を求めることにより、スキャン面の法線  $\boldsymbol{\eta}$  が求まる。法線  $\boldsymbol{\eta}$  は  $F_L$  の  $x_L$  軸と一致することから  $\Theta$  の推定値を求めることができる。

$$\boldsymbol{\eta}_E = \mathbf{L}_{EB} \mathbf{L}_{BL} \mathbf{e}_{x_L}, \quad \mathbf{L}_{BL} \mathbf{e}_{x_L} = \mathbf{L}_{BE} \boldsymbol{\eta}_E \quad (10)$$

$$\hat{\Theta} = \arcsin(-\{\mathbf{L}_{BE} \boldsymbol{\eta}_E\}_z) \quad (11)$$

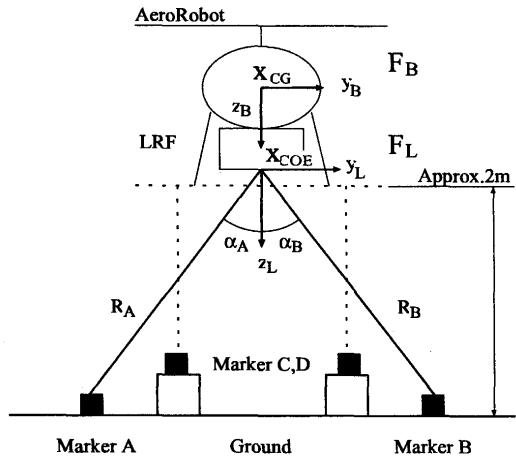


Figure 2: A System to Measure Install Angle of LRF

[ $\Psi$  の算出]  $PL_{EB}e_{x_B}$  と  $PL_{EB}L_{BL}e_{y_L}$  とのなす角が  $\beta$  であることから,

$$[|PL_{EB}e_{x_B}| \cdot |PL_{EB}L_{BL}e_{y_L}| \cos \beta - (PL_{EB}e_{x_B})^T (PL_{EB}L_{BL}e_{y_L})]^2 = 0 \quad (12)$$

が成り立つ。 (12) の左辺を  $J_\Psi$  と定義すると,  $\Psi$  は  $J_\Psi$  を最小にすることから,  $J_\Psi$  を最適化することによって  $\Psi$  の推定値  $\hat{\Psi}$  を求めることができる。

[ $\Phi, \Theta, \Psi$ ] = [0, 0, 0] よりそれぞれの方法を適用することにより推定値を更新し, 収束するまで推定を繰り返す。数値シミュレーションにより提案手法の有効性を確認した。まず, それぞれの測定値に誤差がないとき, 真の取り付け角に収束することを確認した。次に, それぞれの測定位置に最大 2cm の誤差が含まれる場合についてシミュレーションを実施したところ, 推定角度誤差は最大でも 0.1deg と良好な結果を示した。本稿で示した方法は  $r_A - r_B$  などの演算を行っているためにロボットの重心位置, およびセンサ取り付け位置  $x_{COE}$  の影響を受けない。このことは取り付け角度の推定誤差を低減に貢献している。

## 4.2 機体姿勢角推定

地上ロボットではロール角, ピッチ角を求めるために加速度センサにより検知された重力方向を利用していることが多い。しかし, この方法は運動による加速度が小さい状態にしか適用できず, 飛行型ロボットには当てはまらない。角速度を検知するジャイロを機体に取り付け, その観測値を時間積分により姿勢角を求める方法が考え

られる。時間積分するための初期姿勢には静止状態において加速度計により求めたロール角・ピッチ角の推定値が用いられる。ヨー角は加速度計により知ることはできないので, 磁気方位センサを用いる。しかし, INS と同様に角速度観測値の雑音の影響により短時間の推定に限られる。そこで, 姿勢角の運動方程式 (13) を状態方程式として, Kalman Filter を設計することによりジャイロ・加速度計・方位センサを複合した姿勢角推定器を構築する。

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで,  $\phi, \theta, \psi$  はロール角, ピッチ角, ヨー角,  $p, q, r$  はロール, ピッチ, ヨー角速度である。観測値としては 3 軸加速度計の出力, および磁気方位センサ出力とする。

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \\ \psi_{mag} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \sin \theta + \delta_{ax} \\ -g \sin \phi \cos \theta + \delta_{ay} \\ -g \cos \phi \cos \theta + \delta_{az} \\ \psi + \delta_\psi \end{bmatrix} \quad (14)$$

ここで,  $\alpha_{ax}, \alpha_{ay}, \alpha_{az}$  は機体に取り付けた加速度計の観測値,  $\psi_{mag}$  は磁気方位センサ出力,  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  は観測雑音である。すでに述べたように加速度計の観測値には重力加速度だけでなく慣性加速度も含まれる。 (14) は慣性加速度による影響を小さくするためには, 加速度観測雑音の共分散は実際のものよりも大きく設定する必要がある。この方法は姿勢角系および位置・速度系を含んだ GPS-INS 複合航法に拡張できる。このとき状態方程式として (13) に (15) が加わり, 出力方程式は (16) となる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_E \\ \dot{v}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_E \\ L_{EB}\alpha_B + \mathbf{g}_E \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} x_{GPS} \\ y_{GPS} \\ z_{GPS} \\ v_{xGPS} \\ v_{yGPS} \\ v_{zGPS} \\ \psi_{mag} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + \delta_x \\ y + \delta_y \\ z + \delta_z \\ v_x + \delta_{vx} \\ v_y + \delta_{vy} \\ v_z + \delta_{vz} \\ \psi + \delta_\psi \end{bmatrix} \quad (16)$$

ここで  $\alpha_B$  は加速度センサの観測値,  $\mathbf{g}_E$  は  $F_E$  からみた重力加速度ベクトル,  $\delta_{vx}, \delta_{vy}, \delta_{vz}$  はそれぞれ速度観

測誤差である。(14)を観測方程式として用いる場合と比べると、慣性加速度の姿勢角推定へ影響がなく、姿勢角の推定精度が向上する。以上的方法はジャイロ・加速度計などの観測値に含まれるオフセット誤差の推定除去まで拡張できるが、本稿では割愛する。

### 4.3 地磁気偏角の推定

4.2の議論では、方位角は磁気方位センサによるものであった。磁気方位センサは地磁気ベクトルの観測値から方位角を求める。しかし、磁北と呼ばれる地球磁石S極としての北は地理上の北(真北)と一致せず、磁北と真北との間に地磁気偏角が存在する。地磁気偏角は地球の内・外部の要因で時間・場所により変化するが、[6]によれば現在の日本国内では西偏約5~10度である。地磁気偏角は3次元地形測定結果において水平位置の算出に大きな影響がある。誤差解析の結果(5)が示すように、誤差は高度が十分に高いときにはスキャン角度が最大となるときに算出誤差が最大となる。このため、スキャン角度が大きい部分の誤差を軽減するために、レーザスキャンが重複するように測定を行うことが好ましい。このとき、機体右方向にスキャンされる結果と左方向にスキャンされる結果が重複することになるが、地磁気偏角が存在するとき、スキャン重複部分では地理的に同一地点が異なる二点にみえる。これを防ぐには地磁気偏角を精度よく推定する必要がある。それには国土地理院が公開している磁気偏角[6]に基づいて方位角観測値に補正を加えるほかに(1)複数GPSにより機体の姿勢角を推定、(2)観測結果から磁気偏角を推定、などが考えられる。(1)を飛行型レスキューロボットに適用する場合には有人機や船舶に比べて小型であることが問題になる。GPSアンテナ間の距離が大きくできないためにアンテナ位置測定の誤差が小さくても姿勢角の測定結果はそれほど小さくはできない。例えば、最大スキャン角度40度、飛行高度50mとしてデータを収集するときに位置誤差を10cm以下にするにはアンテナ間距離を1mとするときGPSの測定位置誤差が2mm程度でなければならない。そこで以下では(2)について述べる。

すでに述べたように、地磁気偏角の影響により異なる方向から取った同一地点の測定データが異なる複数の地点として見える。しかし、測定誤差が地磁気偏角のみならば、磁気偏角の座標回転をデータに加えることにより同一地点のデータに変換することができる。つまり、標高に特徴がある領域の測定データを異なる方向から収集したデータと比較して最も相関が高くなる座標回転角度

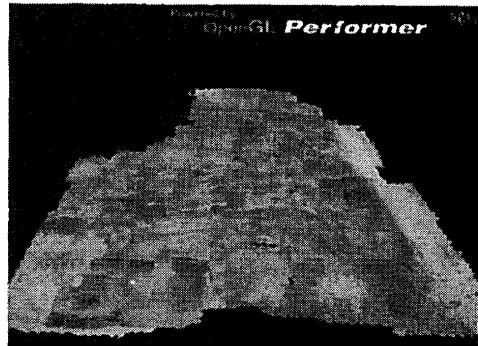


Figure 3: 3D Terrain Map of KMA Flight Test Field

が地磁気偏角と推定できる。以下にその具体的な推定方法を記す。

1. 目標地点の付近を複数の飛行経路からスキャンし、目標物付近の3次元地形データを取得する。飛行経路1および2によって得られた3次元地形データから作成されたものを、それぞれデータ1、データ2とする。
2. データ1およびデータ2をそれぞれがスキャンされたときの機体の位置を中心に $z_E$ 軸回りにある角度 $\vartheta$ だけ回転させる。
3. データ1において評価地点を中心とする検査領域Dを設定し、高度 $h$ に関する相互相関 $P$ を求める。
4.  $\vartheta$ を変化させて手順2, 3を繰り返し $P$ を求めたのち、 $P$ が最大となる地磁気偏角推定値 $\vartheta$ を求める。

### 5 実験結果

飛行型レスキューロボットとして自律型無人ヘリコプタ[3, 4]を用いて3次元地形測定実験を行った結果を示す。LRFとしてRIEGL社製LMS-Q140i-80を用いた。飛行実験は京都市伏見区にある関西模型飛行場において実施した。実験により構築した飛行実験場の3次元マップをFig. 3に示す。また、磁気偏角の推定実験のために、飛行実験により得られた3次元地形データにおける補正前の目標物の像の位置関係をFig. 4に示す。 $\vartheta$ を0~20度に0.01度ずつ変化させたときの相互相関の推移をFig. 5に示す。 $\vartheta$ の増加によりほぼ単調に相関が増加し、11.26度のとき相関が最大となった。検査領域はデータ1における目標物の像を中心とする1辺2.5mの正方形とした。Fig. 5では曲線が滑らかではないが、これはEKFの状態量推定誤差や、地形モデルのラスタリングの際に生じる誤差が原因であると考えられる。Fig. 6に補正後の目標物の像の位置を示す。Fig. 4と比較す

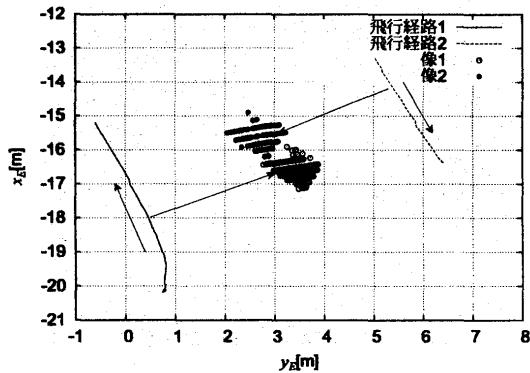


Figure 4: Flight Path and Sampled Area

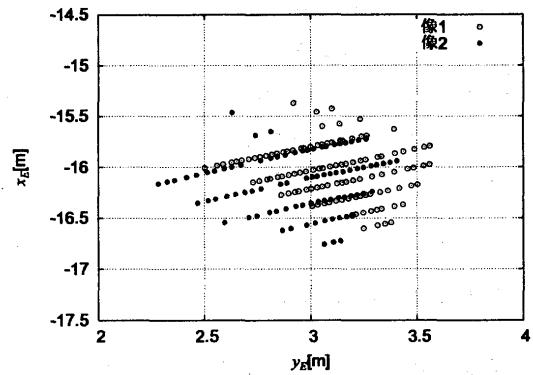


Figure 6: After Correction of Magnet Deviation

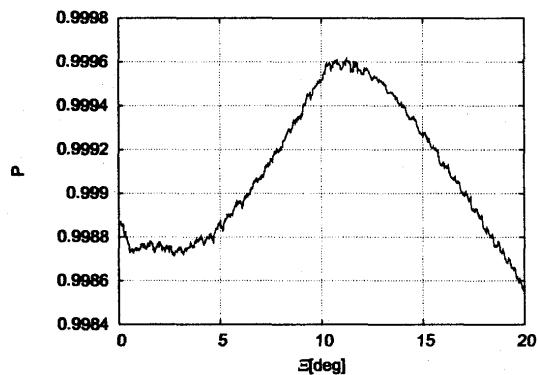


Figure 5: Correlation between Sampled Data1 and Sampled Data2

ると Fig. 6 からは測定データの回転によるずれが補正されていることが分かる。しかし、データのずれには平行成分も存在することが分かる。このずれの平行成分は主として GPS 水平位置測定誤差によるものと思われる。また、国土地理院の京都地方の磁気偏角は 7 度であり本実験の推定結果とは差が大きいように思われる。真値との比較は今後の課題である。

## 6 おわりに

飛行型レスキュー ロボットによる 3 次元地形測量の誤差の低減方法について述べた。実験では測距センサとして LMS を用いた例を示したが、本稿で述べた方法はスレオカメラなど他の測距センサを用いる場合であっても有効な一般的なものである。しかし、地磁気偏角推定についてはまだ不十分な結果であり、地磁気偏角と緯度経度の近似関係式を利用する場合と同程度の推定精度しか得られていないと考えられる。4.3 節で説明した以外

の地磁気推定法としては GPS 観測データから推定した慣性加速度と加速度計による加速度観測値を比較することにより推定する方法が考えられる。しかし、この方法を行うためには GPS 観測サンプリング周期が十分ではないことあるいは GPS 観測に存在するむだ時間が問題になる可能性がある。また、本稿で示した方法は地磁気偏角をリアルタイムで推定することはできず、測定活動が完了後にデータに後処理をかけるものである。地磁気偏角の簡易かつ高精度推定法、またリアルタイム推定法の開発は今後の課題といえる。

## 参考文献

- [1] J.Ryan Miller: A 3D Color Terrain Modeling System for Small Autonomous Helicopters, CMU-RI-TR-02-07, 2002
- [2] A. Ollero et al: Multiple Eyes in the Skies, IEEE Robotics and Automation Magazine, June, pp. 46-57, 2005
- [3] 坂東, 吉永, 中西, 佐藤, 井上: 防災用インテリジェントエアロロボットの開発, 第 47 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 239-240, 2003
- [4] 川谷, 中西, 井上: エアロロボットを用いた防災用 3 次元地形情報収集システム, 第 48 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 569-570, 2004
- [5] Bernard Etkin: Dynamics of Atmospheric Flight, John Wiley & Sons, Inc. (1972)
- [6] <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/>