

## 産業用無人ヘリコプタを用いた農地情報の リモートセンシングシステム (第1報)

— 畑空間データのGISマッピング —

杉浦 綾\*<sup>1</sup>・野口 伸\*<sup>1</sup>・石井一暢\*<sup>1</sup>・寺尾日出男\*<sup>1</sup>

### 要 旨

本研究の目標は、無人ヘリコプタに搭載されたマシンビジョンやレーザー測距器などのセンサから収集・抽出された作物情報を地理情報システム (Geographic Information System ; GIS) を用いてマッピングできるシステムの開発にある。本研究で用いたヘリコプタには慣性航法センサ及び地磁気方位センサ (Geomagnetic direction sensor ; GDS) が搭載されており、機体のロール角、ピッチ角および絶対方位が計測できる。さらに、ポジショニングセンサとしてRTK-GPSを採用し、絶対座標の計測が可能である。本報ではヘリコプタにイメージングセンサを装備したが、センサによって画像を取得する場合、機体姿勢によって画像に外部歪が生じる。その歪を取り除くために画像座標系を絶対座標系へ変換する必要がある。精度の高いマッピングにはヘリコプタの姿勢角センサの精度向上が不可欠である。本報はGDSと姿勢角センサのバイアス同定法を考案し座標変換精度の向上を目指した。高度30mから70mの範囲で撮影した画像を最大誤差で41cmの精度で絶対座標系に変換できた。

【キーワード】 無人ヘリコプタ, リモートセンシング, GDS, マッピング

## Development of Remote Sensing System using an Unmanned Helicopter (Part 1)

— GIS Mapping for Agricultural Land Information —

Ryo SUGIURA\*<sup>1</sup>, Noboru NOGUCHI\*<sup>1</sup>, Kazunobu ISHII\*<sup>1</sup>, Hideo TERAO\*<sup>1</sup>

### Abstract

The objective of this study is to develop a system that can generate a map regarding crop status obtained by an imaging sensor mounted on an unmanned helicopter. As for the unmanned helicopter used in this research, an RTK-GPS was adopted as a positioning sensor, and an inertial sensor that provides posture (roll and pitch angles) was installed in the helicopter. Moreover, a geomagnetic direction sensor (GDS) that outputs an absolute direction is also equipped with the helicopter. When obtaining the image by the imaging sensor on the helicopter, some distortions caused by change of helicopter's posture arise in the image. In order to remove this distortion, geometric correction by converting from image coordinate to global coordinate is badly needed. But there are errors in posture data. Particularly, large GDS error was caused by warp of geomagnetism surrounding the helicopter. Therefore the method of correction of GDS errors was developed in the study. As the result, it was possible to generate a map including maximum error of 41 cm using the image taken from the helicopter.

[Keywords] Unmanned helicopter, Remote sensing, GDS, Mapping

\*1 会員, 北海道大学大学院農学研究科 (〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目 TEL 011-706-2568)  
Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Kita-9, Nishi-9, Kita-ku, Sapporo, 060-8589, Japan

## I 緒 論

現在、産業用無人ヘリコプタの農業利用については主に防除作業に用いられており、大規模農家、コントラクターなどで普及しつつある。その作業効率は1フライト、20分ほどで2haの農薬散布が可能であり、1日5時間稼働すれば、20~30haを散布することができる(Agriculture, forestry, fishery and aviation association, 2001)。また、ヘリコプタのダウンウォッシュによって薬剤が分散し、作物に均一に付着することで高い散布精度が実現されており、従来法である地上散布と同等の精度であることもわかっている(Agriculture, forestry, fishery and aviation association, 2001)。このように産業用無人ヘリコプタは防除作業においては非常に効率的であるといえる。しかし、ヘリコプタのコストを考えると、1年の農作業を通して農薬散布時期のみの使用では効率的であるとはいえず、より多目的、多機能化が求められる。そこで、本研究では産業用無人ヘリコプタを精密農法(Precision Farming; PF)に導入し、作物情報センシングのプラットフォームとしての新しい農業への利用法を提案する。PFとは従来行われている空間的に均一なほ場管理とは違い、細かく分割された区画ごとにほ場情報を取得し、その区画ごとに除草剤や肥料の投入量を決定するという技術である。この技術を導入することでほ場管理の低コスト化、効率化が実現でき、さらには、薬剤の過剰投入をおさえることができるので、農地環境の保全に寄与することができる(Inoue, 1998)。PF技術は大きく分けて、作物情報センシング、診断と意思決定、可変投入の3つのカテゴリに分類できる。この中で本研究では主として、作物情報センシングに焦点を当てて議論する。

これまでにPF技術における作物情報センシング手法として、衛星画像を用いたもの(Inoue, 1997)、車両に搭載させたセンサを用いたもの(Lee and Searcy, 1999)などが挙げられるが、衛星画像では広域の情報を得られるが、空間分解能が低く、雲がある場合可視領域のデータ取得が不可能となる。さらに、センシングした情報を取得するまでに大きな時差があり、即時性が要求されるほ場管理において障害となる。一方、車両搭載型センサを用いた場合、ほ場の状態、特に雨上がりのぬかるんだ土壌やトウモロコシなど草丈の高い作物におけるセンシングは困難である。ここでヘリコプタによる低空センシングを考えると、これらの欠点を克服することができ、極めて有効な手段といえる。また、固定翼機とは違い、その独特の飛行原理によって垂直離着陸、空中停止、全方向への自在飛行が可能であり(Kato and Imanaga, 1985)、その特徴は農作業などに十分に活用できる。

本研究の目標は、ヘリコプタから作物の画像を取得することによって作物情報をGISとしてリアルタイムでマッピングできる技術を開発することにある。従来写真

測量の分野では、地上に外部評定点を設置し、これをもとに空撮画像を地表面へマッピングする手法が行われている。しかし、広大なほ場にこのような外部評定点をいくつか設置する作業は負担が大きく、PFへの応用は困難である。また、ヘリコプタを一定の姿勢、高度に保ち、一定の距離間隔で撮影した画像を用いれば正確なマッピングが可能と考えられる。しかし、ヘリコプタをそのように操縦するには高い技術を要するため、操縦の未熟さを許容できるシステムでなければ実用的でない。したがって、本研究ではヘリコプタの位置、姿勢データを外部評定要素として用いて、画像データのマッピングを試みた。ヘリコプタに搭載されたイメージングセンサによって取得した画像には姿勢変化による外部歪が含まれているが、姿勢と位置との幾何学的関係から、画像の各ピクセルについて3次元の回転変換及び地表面への透視変換を行うことによって補正することができる(Gonzalez and Woods, 1993)。しかし、そのためには正確な位置及び姿勢データが必要となる。そこで本研究ではポジショニングセンサとしてRTK-GPSを採用し、さらに供試ヘリコプタに搭載されている慣性センサ及び地磁気方位センサ(GDS)から出力されるロール角、ピッチ角、方位角を姿勢データとして用いた。事前に行った飛行試験によって、機体のロール角、ピッチ角及び位置情報については高精度に計測が可能であることがわかった。しかしながら、地磁気を検知し絶対方位を出力するGDSについてはシステム自体の磁気環境によってそのデータに大きな誤差が生じる(Yukumoto and Matsuo, 1996)。本報では新しいGDS誤差補正法を考案した。また、ヘリコプタにより地表面に設置したマーカーを空中撮影し、実際のマーカー位置と画像から算出されたマーカー位置を比較することで座標変換精度を評価した。最後にトウモロコシほ場の合成画像を作成することで開発したシステムの有効性を実証した。

## II センシングシステム

図1に供試装置の概観を示す。供試ヘリコプタは(株)ヤンマー製YH300であり、総排気量248ml、質量63kg、全長4m、最大出力15.8kW、実用ペイロード300Nである。操縦は専用の無線操縦機(プロポ)によって遠隔操作を行うことができる。YH300は防除作業用に開発され市販されているヘリコプタであるが、薬剤タンクやアトマイザなど農薬散布用の装備を取り外し、機体下にイメージングセンサの取り付けのために雲台を取り付けた。雲台はヘリコプタ操縦用とは別のプロポによって操作でき、イメージングセンサをピッチ方向とヨー方向に回転させることができる。しかし、本報の実験では雲台の操作は行わず、イメージングセンサは常に機体下方を向いた状態に固定した。機体内部には光ファイバを用いた慣性センサ及びGDSが搭載されており、ロール角、ピッチ角及び絶対方位が10Hzで出力される。これら既

に内蔵されているセンサは、(株)ヤンマーが開発したハイシステム (Hybrid Inertial Navigation ; HIN) の一部であり、本来は姿勢安定制御など操作性向上のために使用されているものである。また、測位システムについては RTK-GPS として、公称精度 2cm である Trimble 社製 MS750 を採用し、テールブーム上にアンテナを、テールブーム下に受信機を取り付けた。これらの装備によりヘリコプタの経度、緯度及び高度データが取得できる。本研究では GPS によって得られた経度、緯度データを UTM 変換 (DMA, 1989) によって m 単位に変換したものを位置データとして用いた。

イメージングセンサとして DancanTech 社製 MS 2100 を採用し、機体下に搭載した。MS2100 は 3 チャンネルの光学バンドパスフィルタを内蔵しており、Red (660 nm 付近), Green (550 nm 付近) 及び NIR (800 nm 付近) の波長領域の反射光強度が検出できる。その画像解像度は 640×480 ピクセル, 焦点距離, 画角が一定の単焦点カメラであり、内部歪が極めて小さい狭角レンズを装備している。また、NTSC 方式により画像データをアナログ転送し、ビデオキャプチャカードによって A/D 変換されたデータをコンピュータに取り込むことができる。さらに、MS2100 はコンピュータから RS-232 C を介して送信されるコマンドによって画像取得に加え、露光時間、CCD ゲイン、オフセットが調整可能となっている。本研究では 5 秒周期で画像取得コマンドを送り、ゲイン、オフセットは一定とした。また、前回取得した画像、つまり 5 秒前に撮影された画像の露光時間と全ピクセルの平均輝度値をフィードバックさせて、平均輝度値が常に一定となるように露光時間を制御し、広いダイナミックレンジを確保した。コンピュータから画像取得コマンドが送られると、位置データ、姿勢角データを同時に取得することができ、それぞれのデータは RS-232C を介してテールブーム上に設置したノート型パソコンに保存される。図 2 にシステムの概略を示す。最大積載量 200N である YH300 に新たに搭載した GPS アンテナ、GPS 受信機、ノート型パソコン、イメージングセンサの総重量はおよそ 60N であった。

### III 地上座標系への座標変換法

#### 1. 位置データ補正

図 3 に示すようにヘリコプタ座標系として機体右方向を x 軸、機体前方を y 軸、機体上方を z 軸とした直交右手系 (xyz) を定義し、各軸回りの回転角をロール角  $\phi$ 、ピッチ角  $\theta$ 、ヨー角  $\psi$  とした。そして航空機の航法技術として採用されているオイラー角の定義 (Kato et al., 1982) にしたがって、ヘリコプタの姿勢を記述した。また、絶対座標系として北方向を Y 軸とした直交右手系 (XYZ) を定義する。

ヘリコプタの姿勢変化に伴い、GPS による位置データを GPS アンテナ位置からイメージングセンサの

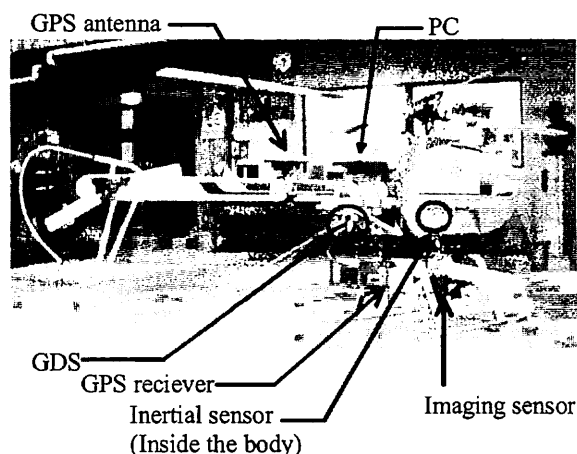


図 1 供試ヘリコプタの概観  
Fig. 1 Configuration of a test helicopter

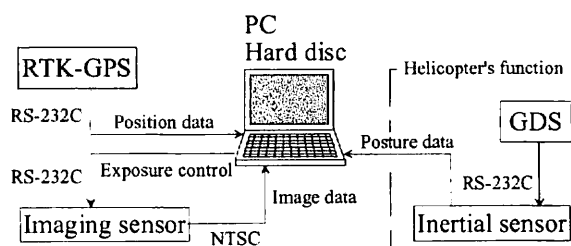


図 2 センシングシステムの概略図  
Fig. 2 Schematic diagram of the sensing system

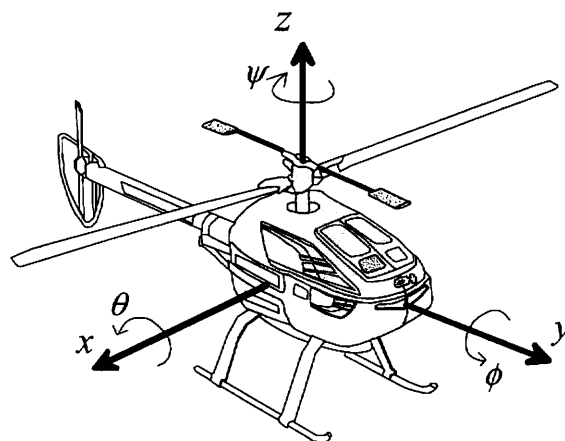


図 3 ヘリコプタの運動座標系  
Fig. 3 Coordinate system of a helicopter

光学中心へと補正する必要がある。ヘリコプタ座標系における各軸回りの回転変換行列  $R_1$ ,  $R_2$  及び  $R_3$  は以下のようになる。

$$R_1(\phi) = \begin{pmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{pmatrix}$$

$$R_2(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$R_3(\Psi) = \begin{pmatrix} \cos\Psi & \sin\Psi & 0 \\ -\sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここでGPSアンテナ位置からイメージングセンサの光学中心へのベクトルを  $(a, b, c)$  とすると補正量  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  は以下のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = R_3(\Psi) \cdot R_2(\theta) \cdot R_1(\phi) \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (2)$$

よって、GPSによって取得した位置を  $(X_{gps}, Y_{gps}, Z_{gps})$  とすれば、絶対座標系におけるイメージングセンサの光学中心位置  $(X_{heli}, Y_{heli}, Z_{heli})$  は式(3)によって得られる。

$$\begin{pmatrix} X_{heli} \\ Y_{heli} \\ Z_{heli} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{gps} \\ Y_{gps} \\ Z_{gps} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (3)$$

## 2. 画像座標系から地上座標系への変換

画像座標系  $(u, v)$  を図4(a)のように定義し、これを  $m$  単位系の3次元空間で扱うため、式(4)のようにヘリコプタ座標系における位置ベクトル  $p(x, y, z)$  へ変換する(図4(b))。点  $p$  はヘリコプタ座標系で表される  $z = -\sqrt{320^2 + 240^2} / \tan(\mu/2)$  の平面上の点であり、イメージングセンサの光学中心を原点としている。また、この平面はイメージングセンサの光軸を法線としていることから、イメージングセンサの仮想的な投影面と見なすことができる。

$$\begin{cases} x = u - 320 \\ y = 240 - v \\ z = -\sqrt{320^2 + 240^2} / \tan(\mu/2) \end{cases} \quad (4)$$

ここに  $\mu$  はイメージングセンサの対角線画角であり、キャリブレーションを行って  $\mu = 26.510[^\circ]$  を求めた。つまり、水平画角  $21.344^\circ$ 、垂直画角  $16.208^\circ$  となり、高度  $30\text{ m}$  で鉛直下方を撮影すれば、およそ  $11.3\text{ m} \times 8.5\text{ m}$  の範囲を、高度  $70\text{ m}$  では、およそ  $26.4\text{ m} \times 19.8\text{ m}$  の範囲を撮影できる。

次に図4(c)に示すようにイメージングセンサの光学中心を原点とし、 $X'$  軸は東向きを、 $Y'$  軸は北向きを、 $Z'$  軸は鉛直上方を正方向とした直交右手系  $(X'Y'Z')$  を新たに定義する。 $X'-Y'-Z'$  系で表される回転変換後の位置ベクトル  $p'(x', y', z')$  は式(5)によって示される。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R_3(\Psi) \cdot R_2(\theta) \cdot R_1(\phi) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここで地表面からのヘリコプタの高度を  $h$  とし、 $Z' = -h$  平面への透視変換を行うと、 $X'-Y'-Z'$  系で表される位置ベクトル  $P'(X', Y', Z')$  は式(6)で示される。さらに絶対座標系におけるヘリコプタへの位置ベクトル  $(X_{heli}, Y_{heli}, Z_{heli})$  を考慮すれば、画像データに対応する絶対位置  $P(X, Y, Z)$  は式(7)によって得ることができる。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \frac{h}{-z'} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{heli} \\ Y_{heli} \\ Z_{heli} \end{pmatrix} \quad (7)$$

さらに、イメージングセンサの傾きによって生じる画素の歪について考える。図5は高度  $h$  のイメージングセンサにロール角  $\phi$  が生じたときの、光軸を通る横方向走査線の画像分解能を示している。その最大値を  $L_1$ 、最小値を  $L_2$  とする。 $\alpha$  はイメージングセンサの水平画角であり、上述の通り  $\alpha = 21.344 [^\circ]$  となる。画像分解能の歪を  $L_1$  と  $L_2$  の差で表すと、上述の  $z$  を用いて、式(2)となる。

$$L_2 - L_1 = \frac{h}{-z} \left\{ \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2} + \phi\right)} - \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2} - \phi\right)} \right\} \cos\frac{\alpha}{2} \quad (8)$$

ここでイメージングセンサの高度を  $70\text{ m}$ 、つまり、 $h = 70 [m]$  とすると、ロール角  $\phi$  による分解能の歪  $L_2 - L_1$  は図6のように推移する。イメージングセンサの傾きが  $10^\circ$  以下であれば分解能の歪は  $2.8\text{ mm}$  以下と非常に小さいことがわかる。実際の無人ヘリコプタによるセンシングを考えると、その姿勢が  $10^\circ$  以上傾くことはなく、また、地表面の凹凸を考慮すれば、この各画素が捉える面積の歪による輝度値への影響は無視できる。

以上の方法を用いて実際に空中撮影実験を行い、画像データの地表面への変換を試みた。実験は北海道大学付属北方圏フィールド科学センター生物生産研究農場牧草刈り後地(傾斜のない平地)で行った。まず、座標変換の精度評価のための参照データ取得のため、トプコン社製トータルステーション AP-L1 を用いて、地上に25個のマーカーを正確に  $5\text{ m}$  間隔で設置した。さらに、RTK-GPSによってすべてのマーカーの絶対位置を WGS84 座標系で測位した。AP-L1 は測量機として開発されたトータルステーションであり、測量地点となるコーナーキューブプリズムの3次元位置を  $1\text{ cm}$  の精度で計測できる。次に、ヘリコプタからそのマーカーを撮影し、画像データ及び機体の位置データ、姿勢角データを同時に取得した。図7(a)は実際に撮影された外部歪を含んだ元画像であり、図7(b)は実際のマーカー位置と、ヘリコプタの位置及び姿勢角データから算出されたマーカー

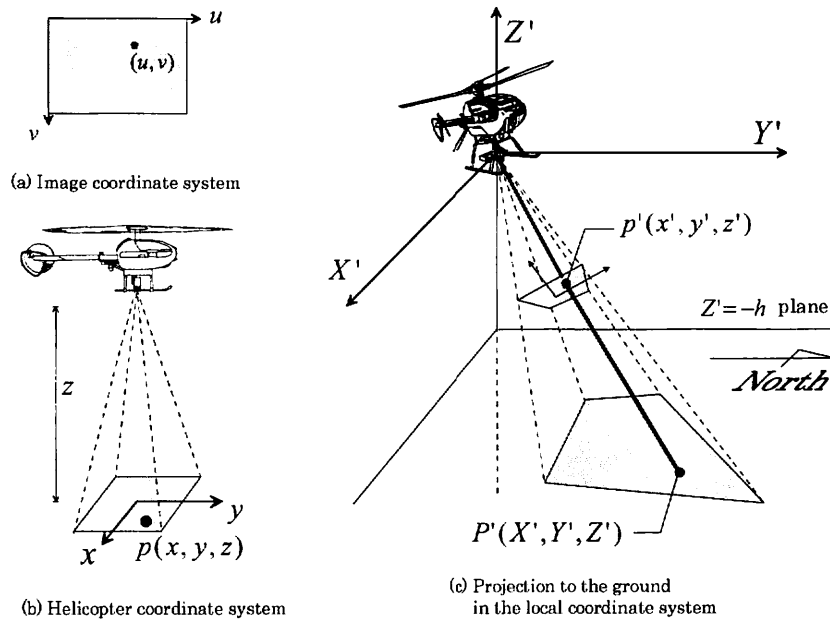


図 4 画像座標から絶対座標への変換  
Fig. 4 Transformation of image coordinate to global coordinate

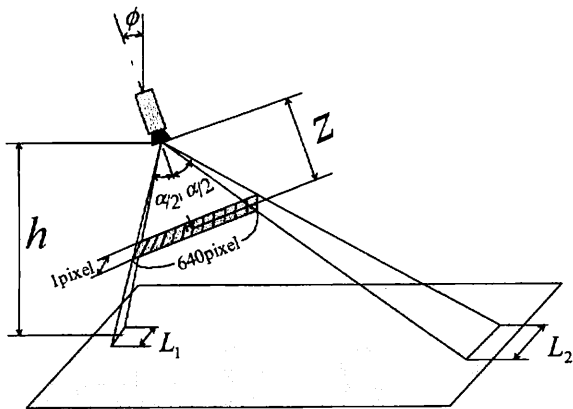


図 5 イメージングセンサの姿勢による画像分解能の歪  
Fig. 5 Distortion of resolution caused by posture of imaging sensor

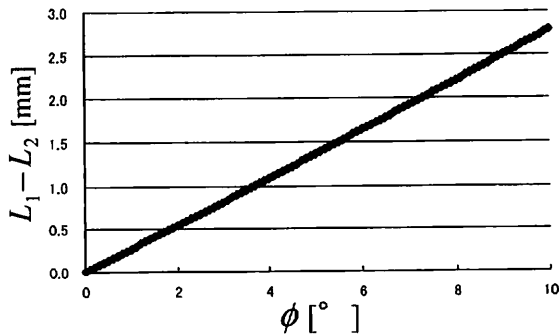


図 6 ロール角変化による分解能歪の推移  
Fig. 6 Transition of resolution distortion by change of roll angle

位置を示している。さらに、その他4枚の画像について同様の処理を行い、それぞれの画像におけるマーカー位置の平均誤差を算出した(表1)。これらの座標変換及び誤差算出は全てオフライン作業で行い、本節で示した画像座標  $u-v$  系におけるマーカー位置はマニュアル作業によって決定した。図7(b)を見ると、算出したマーカー位置は実際のマーカー位置から大きくずれていることが確認できる。また、その平均誤差も最大で2m以上であり、式(9)で示されるイメージングセンサの光学原点から被写体までの距離による画像分解能は、高度70mでは約0.04mと計算されるので、この実験結果は変換精度に問題がある。

$$L = 0.589 \times 10^{-3} h \tag{9}$$

ここに  $L$  [m] は画像分解能であり、 $h$  [m] はイメージングセンサの光学原点から被写体までの距離である。

このような大きな誤差を生じさせる原因として考えられるのは、まず、地磁気のゆがみによるGDSの方位誤差である。また、カメラ姿勢が必ずしも慣性センサで検知した機体の姿勢と一致していなかったことも誤差の一因と考えられる。したがって、取得した方位データ、ロール角データ、ピッチ角データ及び高度データについて適正に補正を行う必要があると判定された。

### 3. 姿勢データ及び高度データ補正

GDSデータ補正法を考案するための実験を行った。実験ではGDSによる方位データの精度評価のため、ヘリコプタの機体後部に日本航空電子(株)製慣性姿勢計測装置(Inertial Measurement Unit; IMU) JCS-7401Aを設置した。IMUは3軸の光ファイバによってロール角、ピッチ角、ヨー角(相対方位)が高精度に計測で

きるセンサであり、時間ドリフトは2°/分である。ヘリコプタを半径約10mの円を描くように飛行させ、GDSデータ及びIMUデータを計測周期10Hzで同時に計測した。このときヘリコプタ座標系のy軸が常に進行方向を向いており、飛行速度は約2m/sであった。式(10)における $\omega_{IMU(i)}$ はIMUによる相対方位であり、初期値を計測開始時のGDS出力値とした。 $\Psi_{GDS(i)}$ はGDSデータであることから、 $\varepsilon_i$ は2つのデータの偏差となる。すなわち、 $\varepsilon_i$ はGDSの誤差とみなすことができる。 $\Psi_{GDS(i)}$ による $\varepsilon_i$ の推移を図8に示す。図8より、本システムの磁気環境下においてGDS出力に、およそ±15°の変動誤差を

有していることが確認できた。図中の曲線 $f(\Psi_{GDS})$ は $\varepsilon_i$ の近似曲線を示しており、式(11)のように次数5までのフーリエ級数展開によって求めた。さらにバイアス値 $\alpha$ を導入すれば、真の絶対方位 $\Psi_{True}$ は式(12)のように求められる。このバイアス値 $\alpha$ はIMUの初期値に含まれるバイアスである。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{IMU(i)} - \Psi_{GDS(i)} \tag{10}$$

$$f(\Psi_{GDS}) = a_0 + \sum_{k=1}^5 a_k \cos(k \cdot \Psi_{GDS}) + \sum_{k=1}^5 b_k \sin(k \cdot \Psi_{GDS}) \tag{11}$$

$$\Psi_{True} = (\Psi_{GDS}) - \alpha \tag{12}$$

ここで式(11)におけるフーリエ係数の次数は、ARモデル(Auto Regressive)の次数決定に用いられる最終予測誤差規範(Final Prediction Error; FPE)(Nakamizo, 1988)に基づいて決定した。FPE値は式(13)によって算出され、FPE値が最小となる次数がそのモデルに最適であると判断される。図9に $f(\Psi_{GDS})$ におけるフーリエ係数の次数とFPE値の変化を示す。図9より方位データの誤差変動の近似式として表すフーリエ級数展開の次数は5が最適であると判断できる。

$$FPE = \frac{N+2n}{N-2n} \sigma^2 \tag{13}$$

ここに $N$ は総データ数、 $n$ は次数、 $\sigma^2$ は予測誤差の分散である。

また、高度 $H$ 、ピッチ角 $\theta$ 及びロール角 $\phi$ の誤差補正について、それぞれのバイアス値を $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ とすれば、真の値 $H_{True}$ 、 $\theta_{True}$ 及び $\phi_{True}$ は式(14)のように表すことができる。 $\beta$ は離陸した水平面とマーカーが含まれる水平面との高度差となり、 $\gamma$ 、 $\delta$ は機体の姿勢とイメージングセンサの姿勢との偏差となる。

$$\begin{cases} H_{True} = H + \beta \\ \theta_{True} = \theta + \gamma \\ \phi_{True} = \phi + \delta \end{cases} \tag{14}$$

$\gamma$ と $\delta$ の補正は、イメージングセンサ取り付けのための雲台を正確に水平、垂直に調整することが困難であることに基づき、このようなリモートセンシングシステムを開発する上で、必須のキャリブレーションである。また、 $\beta$ の補正は、離陸地点と撮影空間が同一高度でないことに起因し、中山間地などで使用する場合、地表面高さを別センサで測定する必要がある。この問題は次報で取り扱う。

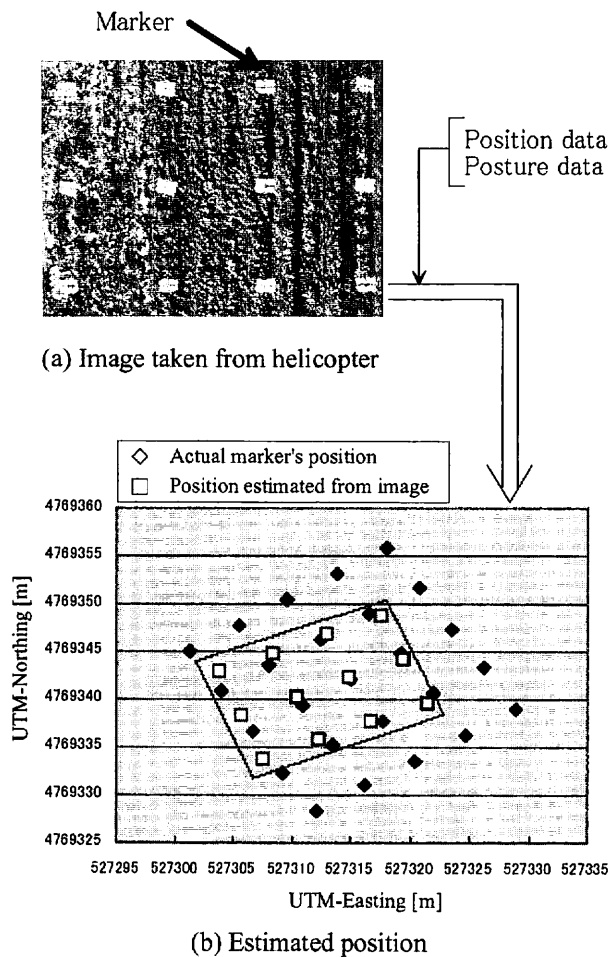


図7 空中撮影による画像と算出したマーカー位置  
Fig.7 Raw image taken from the helicopter and estimated marker's position

表1 実際のマーカー位置に対する算出したマーカー位置の誤差平均及び取得した位置、姿勢データ

Table 1 Mean error of estimated marker position with actual position and obtained data of position and posture

	Mean error [m]	Height [m]	Yaw angle [°]	Roll angle [°]	Pitch angle [°]	Marker's number
Image 1	1.26	46.78	-22.170	2.269	0.417	12
Image 2	2.38	65.93	-33.025	-4.801	0.516	10
Image 3	1.26	39.52	-21.578	-3.812	1.395	6
Image 4	1.65	63.36	-29.832	0.983	0.247	18
Image 5	1.65	70.75	-17.512	3.812	2.043	16

ここで  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  及び  $\delta$  を同時に変化させ、前節で用いた5枚の画像中の総マーカー数62点について、実際のマーカー位置と算出されたマーカー位置との誤差が最小となるような  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  及び  $\delta$  の最適な組み合わせを見つけ出した。その結果  $\alpha = -2.110[^\circ]$ ,  $\beta = 0.285[M]$ ,  $\gamma = -0.520[^\circ]$ ,  $\delta = -0.175[^\circ]$  と決定することができた。

#### IV 結果と考察

##### 1. データ補正後の座標変換

図10は前章第3節で示した補正法(式(12), (14))を用いて、再度座標変換を行ったときのマーカー位置を示している。5枚の画像におけるマーカー位置の平均誤差を表2に示した。図10をみると補正データを用いて算出した

マーカー位置は実際のマーカー位置とほぼ一致していることがわかる。データ補正前の結果(表1)と比べ、かなりの精度向上が認められる。5枚の画像について、マーカー位置計測の平均誤差は29cm以下であり、80%以上、最大で88%の改善がみられた。したがって、前章で考案したデータ補正法が有効であったといえる。ここで、GDS誤差補正法の効果を検証するために、式(12)で示した補正法のみを用いて座標変換を行った。その結果を表3に示した。その平均誤差は70cm以下であり、生データを用いた場合と比較して、58%以上、最大で77%の改善がみられた。これはGDSによる誤差が変換精度を劣化させる最大の要因であったことを示している。

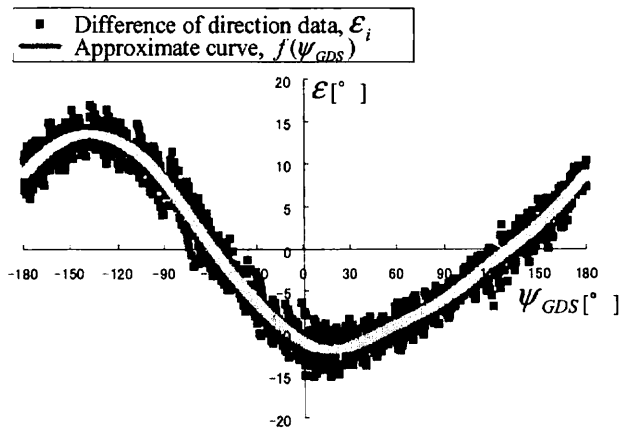


図8 方位データ誤差の変動

Fig. 8 Fluctuation of the direction error measured by GDS

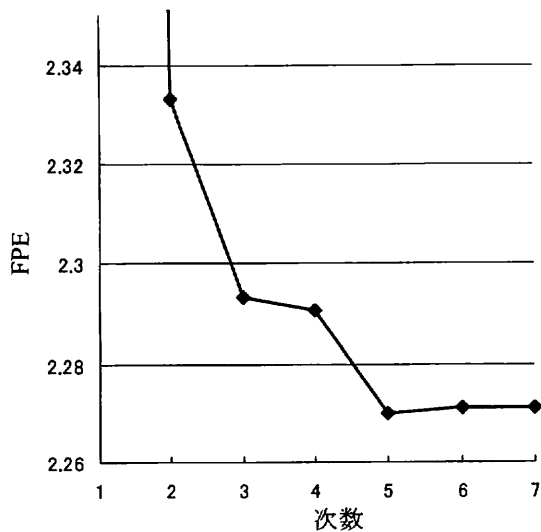


図9 フーリエ級数の次数によるFPEの変化

Fig. 9 FPE transition by the number of Fourier coefficients

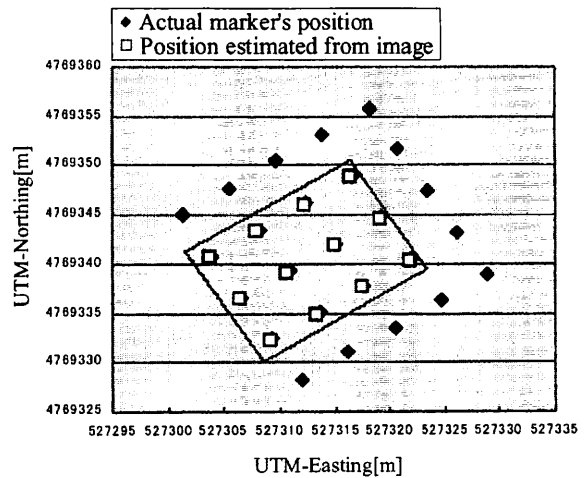


図10 補正データを用いた座標変換

Fig. 10 Positioning accuracy improvement using corrected data

表2 補正データを用いたマーカー位置の誤差平均  
Table 2 Mean error of marker's position with corrected data

	Mean error [m]
Image 1	0.25
Image 2	0.29
Image 3	0.19
Image 4	0.18
Image 5	0.23

表3 GDSデータのみ補正した場合のマーカー位置の誤差平均  
Table 3 Mean error of marker's position with corrected GDS data

	Mean error [m]
Image 1	0.51
Image 2	0.54
Image 3	0.35
Image 4	0.42
Image 5	0.70

## 2. データ補正法の汎用性

前節までに用いた5枚の画像はバイアス誤差取得のための教師データである。そこで、さらに別の4枚の画像をテストデータとして、補正法(式(12), (14))の妥当性を検証した。表4に補正前及び補正後の平均誤差を示す。補正前後を比較すると、80%以上、最大で92%の改善がみられ、データ補正法が適切であることが確認された。また、補正後の誤差は41 cm以内であった。これはリモートセンシングにおいて作物情報を取得するに十分な精度である。

## 3. ほ場マップ作成

ヘリコプタ画像を用いて、実際のは場マップを生成するため、北海道大学附属北方圏フィールド科学センター生物生産研究農場のトウモロコシほ場でセンシングを行った。ほ場の面積は91m×21mであり、この上空約5.5mをヘリコプタで6往復し、111枚の画像を得た。それら全ての画像について絶対座標への変換を行い、図11に示すように自作のGISソフトによって合成画像を作成した。高度データ補正におけるバイアス値は、地面からのトウモロコシ草丈を考慮して $\beta = -2.250[\text{m}]$ とした。また、教師データ取得時と同一のシステム環境であったのでGDSデータ補正は式(12)をそのまま用いた。今回は得られた画像のRed, Green, NIRの輝度値を作物情報としてマッピングを行った。図11の実線で示した矩形はほ場区画であり、事前にRTK-GPSによって正確に測量したものである。トウモロコシの作物列はほぼ平行に並んでおり、このことからGDSによる方位データの補正が効果的であったと判断できる。また、変換された画像のトウモロコシ部分がほ場区画にほぼ収まっており、高精度にマッピングされていることがうかがえる。このほ場センシングに要した時間はおよそ10分であり、グランドベースセンシングよりもはるかに高効率である。図11では、センシングむらを確認できるが、センシング状況をオンラインでモニタできる装置を地上に設置し、センシングむらをオペレータが逐次確認しながら作業することで解決できる。

今回行ったほ場マッピングは、画像データを一様に水平な地表面へ座標変換したが、山間部や傾斜地でのセンシングでは大きな誤差が生じることが予想される。解決法として高度データをレーザー測距器などを用いて計測する必要があり、この問題は次報で検討する。最終的には作物の生育状況や草丈などをGISデータとして取得

し、これらヘリコプタからの情報と、より広域の情報をカバーできる衛星データや航空写真などの情報とをシームレスに連結させ、互いの欠点を補完できるシステムの開発を目指す。

## V 摘 要

本研究は、無人ヘリコプタに搭載されたイメージングセンサから画像を取得し、それをもとに作物情報をGISとしてマッピングできるシステムを開発することを目標とした。

1) 機体のロール角、ピッチ角、ヨー角の計測には、供試ヘリコプタに内蔵されている慣性センサ及びGDSを用

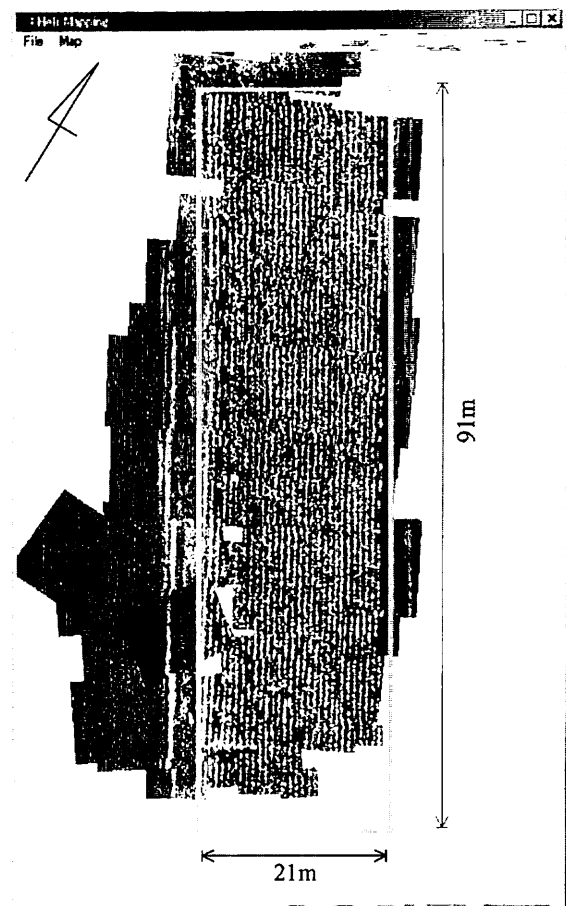


図11 トウモロコシほ場のマッピング  
Fig. 11 Composite image of test corn field

表4 テストデータにおけるマーカー位置の誤差平均及び取得した位置、姿勢データ  
Table 4 Mean error of marker's position in testing data and obtained data of position and posture

	Mean error [m] before correction	Mean error [m] after correction	Height [m]	Yaw angle [°]	Roll angle [°]	Pitch angle [°]	Marker's number
Image 6	2.50	0.19	67.61	-19.511	1.713	2.960	16
Image 7	1.03	0.20	31.88	-18.012	1.719	2.010	6
Image 8	1.49	0.18	69.80	-19.627	-3.098	1.274	12
Image 9	2.37	0.41	67.88	-25.488	2.944	0.730	20



いた。ポジショニングセンサとしてRTK-GPSを採用し、画像取得のためにイメージングセンサを機体下に搭載した。

2) ヘリコプタの姿勢変化に伴い、画像に外部歪が生じるが、3次元の回転変換及び地表面への透視変換による座標変換を行うことで解決できる。また、システムの磁気環境の影響でGDSによる方位データに大きな誤差が生じるが、GDSとIMUによる方位データを解析することによって新しい誤差補正法を考案した。

3) 考案したGDS補正法を用いて画像データを座標変換し、マッピング精度を評価した。GDS補正を適用しなかった場合は誤差平均で2m以上であったが、GDS補正を行った場合、80%以上の精度の改善がみられ、その誤差は41cm以内であった。これは作物情報をセンシングする上で十分な測位精度と判断できる。

### 謝 辞

本研究は農林水産省「未来型軽労化農業技術確立のための基盤技術開発に関する総合研究」の1課題として実施したものであり、その研究助成に謝意を表す。また、ヤンマー農機(株)中央研究所にはヘリコプタの改造など多大な支援をいただいた。さらに、一連の実験に際して、ヘリコプタのオペレータとして御協力いただいたホクトヤンマー株式会社樋口広樹氏、江岸正利氏に深く感謝する。

### References

Agriculture, forestry, fishery and aviation association, 2001. Agriculture, forestry, fishery and aviation technical rationalization examination results document (in Japanese). Agriculture, forestry, fishery and aviation association, Tokyo, 45.  
Agriculture, forestry, fishery and aviation association, 2001. Industrial unmanned helicopter new field development

examination results document(in Japanese). Agriculture, forestry, fishery and aviation association, Tokyo, 10-29.  
Defense Mapping Agency (DMA), 1989. The Universal grids : Universal Transverse Mercator (UTM) and Universal Polar Stereographic (UPS), DMA Technical Manual, DMATM8358. 2.  
Gonzalez, R., Woods, R., 1993. Digital Image Processing (Third Edition). Addison-Wesley Publishing Company New York, 51-68.  
Inoue, Y., 1998. Application of remote sensing to Information-based precision farm management (Part 2). Journal of JSAM, 60(2), 139-146.  
Inoue, Y., 1997. Remote sensing of crop and vegetative environment(Part 2). Journal of Japan remote sensing society, 17(4),57-67.  
Kato, K., Oya, A., Karasawa, K., 1982. Introduction of Aerodynamics (in Japanese).University of Tokyo Press,Tokyo, 1-22.  
Kato, K., Imanaga, I., 1985. Introduction of Helicopter (in Japanese). University of Tokyo Press, Tokyo, 49-51.  
Lee, W., Searcy, S., 1999. Multispectral sensor for detecting nitrogen in corn plants, ASAE Paper No. 001010.  
Mizushima, A., Noguchi, N., Ishii, K., Terao, H., 2000. Correction of GPS positioning by vehicle inclinations for agricultural vehicle guidance. Journal of JSAM, 62(4), 146-153.  
Nakamizo, T., 1988. Signal Analysis and System Identification (in Japanese), Corona Co., Tokyo, 195-201.  
Sasama, H., 2001. Analysis and generation of pictures through imaginary planes. Journal of Tokyo University of Information Sciences, 4(2), 167-179.  
Xu, F., Li, S., 2000. 3D Positioning techniques in airborne laser-ranging and multi-spectral imaging mapping system. Journal of Surveying and Mapping, 29(2), 137-141.  
Yao, H., Noguchi, N., 2001. Hyperspectral Imaging System Optimization and image Processing, ASAE Meeting, Paper No. 011105.  
Yukumoto, O., Matsuo, Y., 1996. Measurement of magnetic field. Journal of JSAM, 58(5), 93-98.  
(原稿受理：2002年2月12日・質問期限：2003年3月31日)