HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	産業用無人ヘリコプタを用いたフィールド情報のリモートセンシングシステム
Author(s)	杉浦, 綾; SUGIURA, Ryo
Citation	北海道大学大学院農学研究院邦文紀要, 28(2), 133-201
Issue Date	2007-02-16
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18645
Type	departmental bulletin paper
File Information	28-133.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北大農研邦文紀要 28(2)：133～201，2007

産業用無人ヘリコプタを用いたフィールド情報のリモートセンシングシステム*

杉　浦　　綾
(北海道大学農学研究科生物資源生産学専攻生物生産工学講座農用車両システム工学分野)**

Remote Sensing System for Field Information Using an Unmanned Helicopter*

Ryo SUGIURA
(Laboratory of Agricultural Vehicle Systems Engineering, Research Group of Bioproduction Engineering, Division of Bioresources and Product Science, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University)

目　　次

Ⅰ．緒　　論 ……134
A．研究の背景 ……134
　a．産業用無人ヘリコプタの農業利用 …134
　b．精密農法（PF）の概要……135
B．既往の研究 ……136
　a．衛星ベースリモートセンシング ……136
　b．航空機ベースリモートセンシング …137
　c．車両ベースリモートセンシング ……137
　d．地理情報システム（GIS）……138
C．無人ヘリコプタのリモートセンシングへの適用 ……139
D．研究の目的及び範囲 ……139
Ⅱ．ヘリコプタベースリモートセンシングシステムの開発 ……141
A．はじめに ……141
B．センシングシステムの構成 ……142
　a．センシングプラットフォーム ……142
　b．ナビゲーションセンサ ……142
　c．マルチスペクトルイメージングセンサ ……143
　d．環境光量センサ ……144
　e．センシングシステムの概要 ……144
C．画像データの座標変換 ……145
　a．GPS オフセットの補正……145
　b．画像座標系から絶対座標系への変換 ……146
　c．座標変換の空間精度 ……147
D．座標変換誤差の補正法 ……148
　a．地磁気方位センサの誤差補正 ……148
　b．座標変換精度の改善 ……150
　c．作物生育の GIS マップ生成 ……151
E．モニタリングシステムによる作業支援 ……152
　a．無線通信によるデータ伝送 ……152
　b．モニタリングソフトウェアの実装 …154
F．ま　と　め ……155
Ⅲ．地形センシングと空間情報の 3 次元マッピング ……156
A．はじめに ……156
B．レーザ距離計による地形センシング …157
　a．レーザ距離計の設置 ……157
　b．距離データからの地形マップ生成 …157
　c．地形マップの精度評価 ……158
C．地形データの簡略化手法 ……159
　a．地形データからのポリゴン生成 ……159
　b．簡略化アルゴリズム ……160
　c．簡略化による誤差の評価 ……162
D．地形データと画像データの統合アルゴリズム ……162
E．3 次元 GIS マップの精度評価とマップ生成 ……164

*北海道大学博士論文（2006）
*Doctoral thesis submitted to the Graduate School of Agriculture, Hokkaido University (2006)
**現在の所属：独立行政法人　農業・食品産業技術総合研究機構

F．ま　と　め ……166
Ⅳ．マルチスペクトルイメージングセンサ
による小麦の生育診断 ……166
A．はじめに ……166
B．生育推定のための画像処理法 ……168
a．正規化反射率の導出 ……168
b．露光時間，CCD ゲインの制御……168
c．防除畝の認識・除去 ……169
C．小麦の生育推定 ……170
a．実験概要 ……170
b．推定精度及びマップ生成 ……170
D．リモートセンシング作業の効率化 ……172
a．広角レンズの適用 ……172
b．可動式雲台を利用した広域撮影 ……174
E．生育推定とマップ生成 ……175
F．ま　と　め ……176
Ⅴ．サーモトレーサによる土壌水分状態の
モニタリング ……177
A．はじめに ……177
B．サーモトレーサによる温度計測 ……177
a．供試サーモトレーサの仕様 ……177
b．熱画像の計測原理 ……178
C．実験概要及び撮影方法 ……179
a．試験ほ場とグランドトゥルースの設
置 ……179
b．撮影方法および撮影画像 ……180
D．熱画像の補正法 ……180
a．透過率の決定 ……180
b．熱画像の補正モデル ……182
c．補正法の検証 ……184
E．土壌含水率の推定 ……185
F．ま　と　め ……187
Ⅵ．総　　括 ……188
A．はじめに ……188
B．ヘリコプタベースリモートセンシング
システムの開発（第Ⅱ章要旨）……189
C．地形センシングと空間情報の 3 次元
マッピング（第Ⅲ章要旨）……189
D．マルチスペクトルイメージングセンサ
による小麦の生育診断（第Ⅳ章要旨）…189
E．サーモトレーサによる土壌水分状態の
モニタリング（第Ⅴ章要旨）……190
謝　　辞 ……190
量記号一覧 ……191
引用文献 ……193
Summary ……199

Ⅰ．緒　　論

A．研究の背景

a．産業用無人ヘリコプタの農業利用

1970 年代から現在に至るまで，我が国の食料・農業・農村は，食料自給率の低下，担い手の減少と高齢化の進展など困難な問題が生じている一方，食料の安定供給に対する要請や多面的機能の発揮に対する期待が高まってきた。こうした状況に対応する一つの解決手段として位置づけられているのが，農作業における有人ヘリコプタの利用である。この提案がなされた当初，有人ヘリコプタの病害虫防除や水稲直播への利用は，病害虫防除コストの低減，労働力の軽減，いもち病など地域全体で発生する病害虫の一斉防除の推進に寄与する技術として，重要性を増すものと考えられた。そして，従来の水稲栽培法を見直し，播種，除草剤散布，追肥，病虫害防除などの作業に有人ヘリコプタを導入し，省力化，低コスト化を目指した水稲生産技術を確立しようという試みが 1983 年から始まった[1)]。

これまでに，有人ヘリコプタは日本の農業分野において水稲栽培作業，森林の防除，治山，緑化としての種子，肥料散布に用いられていられてきたが，そのほとんどが水稲栽培における防除作業である。有人ヘリコプタでの水稲防除は一般的に市町村ごとで一日に数百～千数百ヘクタールを，3～6 機で一斉に行い，時間的効率の面では従来法である地上散布をはるかに上回る成果を発揮している。上空から一斉に防除作業を行うことで，低コスト化，省力化を図ることができ，毎年 5 月から 11 月にかけて約 200 機が稼動するに至った。しかし，実際の作業では，作業基地となるヘリポートの確保や作業全体のコーディネート，作業中の交通整理など，大掛かりな準備を必要とする。また，山間部などのほ場では有人ヘリコプタの作業ができないことや，空中散布された農薬がドリフトによって民家へ飛散するなどの問題がある。さらに，

環境保全に対する社会的関心の高まり，農村部における住宅地域の拡大，栽培様式の多様化など，作業環境の変化が生じており，有人ヘリコプタによって広域を一様に散布する方法ではこのような問題に対応できない。中山間地帯を例にとると，水田の区画ブロックが小さいこと，農住混在であることなどから，ブロックサイズが効率化の要件である有人ヘリコプタによる防除は馴染まない。そこで，さらにきめの細かい作業ができ，有人ヘリコプタでカバーできない部分を補完する機材として産業用無人ヘリコプタが開発され，1987 年，世界で初めて実用化された[2]。開発当初行われた水稲の病虫害防除試験の結果，防虫効果は十分であったが，作業を行う上で操作性が悪く，機体の性能とオペレータの技術水準の確保が重要であることが判明した。しかし，現在では機体に位置センサや姿勢センサなどが組み込まれ，姿勢安定制御が施されていることから，円滑かつ安全に利用することができる。小型で無線誘導できる無人ヘリコプタは小回りがきき，低空からの散布作業であるため薬剤の飛散による環境への影響が少なく，周辺住民の理解を得ることができる。また，離着陸地点として農道などのスペースがあれば十分であり，有人ヘリコプタのような大掛かりな準備を必要としない。現在，農薬散布用の無人ヘリコプタは大規模農家，コントラクタなどで普及しつつあり，水稲栽培に限らず，畑作や果樹，松林への防除作業など，用途は拡大している。その作業効率は 1 フライト，20 分ほどで 1.5〜 2 ha の農薬散布が可能であり， 1 日 5 時間稼動すれば，20〜30 ha を散布することができる[3]。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期待できる。農林水産航空協会が実施した防除精度試験の結果では有人ヘリコプタによる作業精度を上回り，従来法である地上散布と同等の精度であることがわかっている[4]。高い防除効果と作業効率によって日本全国で稼動する無人ヘリコプタの機体数は図 1.1 に示すように 1997 年には 992 台であったのに対し 2004 年では 2,005 台と急増している。機体の増加に伴い，全国の無人ヘリコプタによる水稲防除面積は，図 1.2 のように，1997 年は 189,121 ha であったが，2003 年には有人ヘリコプタの防除面積を上回り，2004 年には 533,300 ha まで拡大した[5]。これは全国の水稲作付面積の 31％に相当する。

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効果的であり，高い評価を得ている。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防除作業のみの使用では経済的であるとはいえず，他作業への利活用が必要である[6]。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，リモートセンシングのプラットフォームとして，農業への新しい利用法を提案する。

b．精密農法（PF）の概要

20 世紀の農業技術は生産性向上を目指して，機械を導入・大型化し，化学肥料や薬剤を大量に消費するといった投入エネルギを増大することを基盤として発展してきた[7]。しかし，作業効

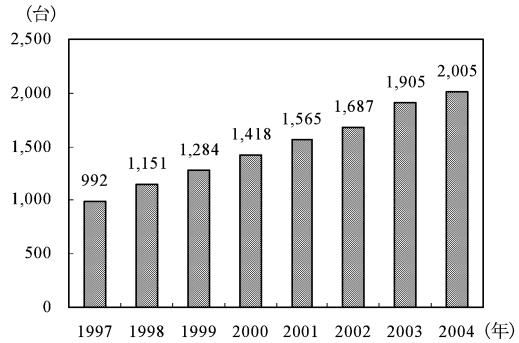


図 1.1　産業用無人ヘリコプタの機体登録台数の推移

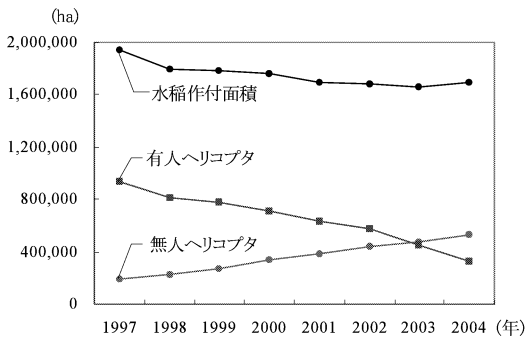


図 1.2　無人ヘリコプタと有人ヘリコプタの水稲防除面積の比較

率や生産性が向上したものの，農地やその周辺に与える負荷も大きく，環境を犠牲にする結果となった。一方で，環境保全，食品の安全性を目指した農法として有機農法，無農薬農法が注目されているが，生産性の向上に応えることはできない。今日の農業生産現場には生産性と環境の両面への配慮が求められており，これらの問題を一括して解決する農法として 1990 年頃，PF という技術概念が提唱された[8]。その後も，農業に対する環境保全の強力な圧力があり，短期間のうちに国際的な注目を集めた[9]。現在では 21 世紀の安定した食料供給，環境保全を実現する生産技術として脚光を浴び，世界中で研究が行われている。

従来のほ場管理は図 1.3（a）に示すように，１つのほ場における作物の生育状態を空間的に一様であるとみなし，均一に薬剤，化学肥料を投入するというものである。その結果，薬剤，化学肥料の過剰投入や農地への残留を引き起こし，環境に与える影響が社会問題となっている。一方，実際のほ場を見ると図 1.3（b）のように１つのほ場における作物の生育状態にはばらつきが存在する。PF とはほ場の環境や状態を空間的に均一と捉えずに，作物の生育状態のばらつきを認識，対処することで作物生産を最適化する技術である。細かく分割された区画ごとになんらかの方法によって作物体内の窒素栄養分，水分状態などを認識し，栄養ストレス，水分ストレスの度合いによってその区画の資源投入量を調節するといったことが PF の基本概念となる。その作業行程は大きく分けて，生育状態及び環境センシング，診断と意思決定，可変投入の 3 基盤技術に分類できる。この一連の技術が確立されれば，ほ場管理の低コスト化，資材投入の効率化が実現でき，生産性は確実に向上する。また，薬剤の過剰投入を抑えることができるので，食品の安全性，農地環境の保全に寄与できる[10]。PF にはほ場環境や作物生産の情報化という側面も存在する。センシングされた作物情報は客観データとして保存・蓄積できる。これらの情報はほ場管理に活用することができ，さらに，市場に出された農作物がどのような過程で栽培されたかを生産履歴として開示することもできるので，消費者に安心感を与えることができる。現在では，IC タグやバーコードによって農産物の認証を行い，品質や生産過程などの情報をインターネットで参照できるシステムが開発されている[11]。

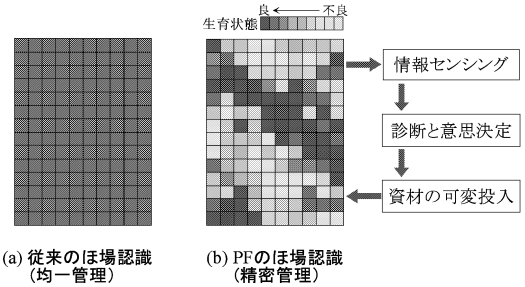


図 1.3　精密農法（PF）の基本概念

本来 PF の基本概念は，図 1.3 のとおり，生育の良・不良を認識し，最終的に資材の可変投入によって生育のばらつきを是正するものであった。しかし，作物の生育状態は，１つの要因だけでは説明できず，土壌の腐植や水分状態，さらにほ場地形も生育に影響を及ぼすことが知られている。従って，図 1.3 における診断・意志決定技術では，このようなほ場空間情報を総合的に考慮する必要がある[12]。それにともない，情報の収集も，生育の良・不良だけではなく，より具体的で多次元の情報センシングが望まれる。また，その作業効率を考えると非接触・非破壊方式であるリモートセンシングが有効と考えられる。本研究では，PF の作業フローの中で，センシング技術に焦点を当て，フィールド情報を効率的に収集できるシステムの確立を目指す。

B．既往の研究

a．衛星ベースリモートセンシング

民生分野における衛星画像利用の歴史は 1972 年の Landsat-1 の打ち上げに始まり，現在でも，人工衛星をプラットフォームとするセンシング技術は広域リモートセンシングの代表として，世界中で盛んに研究が行われている。人工衛星に搭載されたセンサは一般に，可視領域（0.4〜0.7 μm）から近赤外線（0.8 μm 付近）あるいは，熱赤外線（14.0 μm 付近）を含むマルチスペクトルセンサであり，中には可視領域

から赤外までを220バンドで提供する高スペクトル分解能のセンサもある[13]。衛星画像は広域を瞬時にカバーできる反面，空間分解能が低いという欠点を持っている。しかし，現在では高性能，高解像度化が進み，世界最高の商用衛星であるQuickBirdを例にとると，PAN画像（0.4〜0.9 μm）で0.61 m，4バンドのマルチスペクトル画像で2.44 mの空間分解能を持つ[14]。

衛星ベースリモートセンシングを用いた研究として，バイオマスの推定[15]や地質調査[16]，水質調査[17]などの環境モニタリングが挙げられる。また，複数の時系列画像を用いたステレオ立体視により地表面形状を抽出し，数値標高モデル（Digital Elevation Model; DEM）を生成する技術もある[18][19]。農業分野でも衛星画像は用いられ，特に精密農法における生育状態のセンシング手法として国内では主流となっている。リモートセンシングによる作物の生育診断にはマルチスペクトル画像が極めて有利であり，衛星画像に限らず，後述の航空機ベースや車両ベースリモートセンシングにも広く用いられている。これは，葉緑素の吸収帯である赤色で反射が弱く，緑色や近赤外の反射が強いという植物体の光物性に基づき，作物の反射強度からクロロフィルや葉身窒素量を推定できることが既に示されている[20][21][22]。また，これらのバンドから算出されるNDVI（Normalized Vegetation Index）やGNDVI（Green NDVI）などが植生指標として用いられ[23]，小麦や稲のタンパク含有率や子実収量，窒素吸収率が推定できることが知られている[24]。さらに，土壌のセンシング情報から有効土層の深度を推定し，作物生育との関係を調べた研究もある[25]。作物体積の大きさの指標となる葉面積[26][27]も生育情報として扱われるが，空間分解能の点から衛星画像では取得できない。そのため，衛星画像の1ピクセルに複数の物質が含まれている場合，そのピクセルの濃度値を各スペクトルに分解し，エンドメンバの占有率を逆算できるミクセル分解と呼ばれるアルゴリズムが開発されている[28][29]。

衛星画像は広域をマルチバンドの情報としてセンシングできることから，情報抽出の潜在能力は高く，アプリケーションの幅が広い。今後も高解像度化，高性能化が進むことが予想され，衛星画像の利用技術は地球観測の分野で中心的な役割を担うことが期待されている。

b．航空機ベースリモートセンシング

航空機ベースリモートセンシングは衛星画像より高精細な情報が得られるため，都市空間モニタリングや農地，山間部の地形データ収集を行うシステムとして発展してきた。航空機に搭載されるセンサの技術的トレンドは，高空間分解能，高スペクトル分解能，3次元画像化に加え，レーザやマイクロ波などの能動的センサの利用である[30]。一般に，レーザスキャナによる距離センサ[31]やマイクロ波を利用した合成開口レーダ[32]を航空機や有人ヘリコプタに搭載し，GPSや姿勢センサとの情報を統合することで地形図を作成している。航空測量分野では高精度のレーザプロファイラを用いた地形データ収集システム[33][34]が開発されている。また，光学センサを用いたものには，航空写真のステレオビジョン[35]から地表高度を抽出する研究例もある。航空機ベースの3次元空間都市モデル生成システムでは光学センサのステレオビジョンとレーザを併用し，高精度に都市空間の鳥瞰図を作成する手法[36]が実用段階に達している。これらの方法は広範囲の情報を細密にセンシングできることから，森林や山間地全域の地形図及び都市空間の鳥瞰図作成に有効である。一方，PFにおいても，航空機搭載型のマルチスペクトルセンサから作物の生育状態を推定し，ほ場マップを生成する研究が数多く行われている[37][38][39][40]。航空機ベースリモートセンシングは低空からの近接撮影となることから衛星画像よりも精細なデータが得られる。その空間分解能は一般に1〜2 mとされてきたが，現在ではマルチスペクトル画像で20 cmの空間分解能を持つシステム[41]が登場した。従って，衛星画像では困難であったほ場スケールでの空間変動の認識が可能であり，空間分解能の点では，PFに十分適用できる。

c．車両ベースリモートセンシング

トラクタに搭載したセンサを用いる車両ベースリモートセンシング[42]は国際的に研究が進

められており，PF におけるもっとも一般的な手法である。対象物である作物を近距離で撮影できることから，得られる画像は高精細で，画像中の作物部，土壌部を細かく識別できるほどの空間分解能を持つ。画像処理によって作物と土壌，雑草をリアルタイムで分離し，植被率や雑草の繁茂度合いを計測できるアルゴリズムについても既に多くの研究がある[43)44)45)]。また，トラクタに搭載したマルチスペクトルセンサから，作物の窒素ストレスや水分ストレスが推定できることは広く知られている[46)47)]。ステレオビジョンシステム[48)]や超音波センサ[49)]を用いれば，作物体の大きさを示す草丈を検出できる。さらに，GPS などで位置計測もあわせて行えば，センシングされた情報のマップが生成できる。このように車両ベースセンシングは，センサの取り付け，取り替えが比較的容易で，システムを構成しやすいため，多くの情報を収集できるメリットがある。また，この方式は即時性に優れるため，センシングによって得られた情報をその場で解析し，農薬や肥料をリアルタイムで可変施用する技術も開発されている[50)51)]。

ｄ．地理情報システム（GIS）

地理情報システム（Geographic Information System; GIS）は地理的位置を手がかりに，位置に関する情報を持った多次元の空間データを総合的に管理・加工，視覚的に表示し，高度な分析や迅速な判断を可能にする技術である。GIS における空間情報はデジタルマップとしてデータベース化されるため，空間解析を支援する有効なシステムといえる。この技術は測量や環境調査，都市計画，災害対策などに応用され，社会的に広く用いられている。現在では，GPS の普及により位置情報が得やすくなり，GIS の実用性が飛躍的に向上した。

GIS で扱われる空間データは，実世界を抽象化したものであり，その表現方法はベクタ型とラスタ型に分類される。ベクタ型データは，点や線または多角形の外郭を座標値の羅列で記述するものであり，特に，GPS などのスポット計測による地理データはこれに分類される。一方，ラスタ型データは空間をメッシュに区切り，単位メッシュ毎に数値情報を持たせたものである。データがメッシュ状に並ぶラスタデータはコンピュータ表示に限らず様々な処理においてアルゴリズムが確立されているというメリットを持つ[52)]。その並びを利用すれば，比較的容易にワイヤーフレームやポリゴンが生成できる。また，マップ演算やデータ検索などの空間情報処理に有利であり，サーフェイス解析や他の情報とのオーバーレイが素早く実行できる[53)]。リモートセンシングによる画像データは一種のラスタ型データであり，本研究でも，ヘリコプタから得られた画像データは全てラスタ型のマップに変換して扱った。リモートセンシングと GIS は共に地表面に関する多岐の情報を扱うことで共通しており，GIS の概念が導入されると同時に，両者の関係は急速に接近した。センサの高性能化，高解像度化に伴い，前述したプラットフォームから提供される空間データは複雑で膨大なものとなった。その一方で，プロセッサの高速化やソフトウェア技術の発展もあり，リモートセンシングで得られたデータを効果的に活用するために GIS は欠かせないものとなった。リモートセンシングは特定の空間情報をマクロな視点で収集し，GIS はその空間情報の解析，管理を行う有効な手段として位置づけられる。リモートセンシングと GIS を統合する概念は既に提案されており，双方を複合的に扱うことの有効性が示されている[54)55)]。地表面の起伏データを既存の地図情報から取得して，衛星画像と重ね合わせることで鳥瞰図を作成できる技術[56)]や，地図情報と航空機画像を組み合わせて都市部の環境評価を行った研究[57)]など，リモートセンシングデータと既存の地理情報，双方を GIS により組み合わせた解析事例は数多い。

これまでの GIS は 2 次元データを主体としており，その利用法は平面地図に限られてきた。しかし，実用性を考えると実体を忠実に再現でき，空間を直感的に表現，把握できる GIS が望まれる。一方，リモートセンシングにおけるセンサ技術やデータの解析・処理能力は進歩し，画像に加えて地形や建造物の形状などが得られるようになった。このような中で，従来の 2 次元情報に高さ情報を加えた 3 次元 GIS[58)59)60)61)]

が注目されるようになった。

局所管理を前提とするPFにおいてもGISは極めて重要な役割を担う[62]。ほ場をグリッドによって細分化し，各グリッドの属性として，葉身窒素量，水分量，草丈などの生育状態を当てはめる。このように農地情報をGISとしてマップ化することで，作物生育の空間的な変動を把握することができ，精密なほ場管理に活用できる。空間的なばらつきに応じて可変施肥・可変農薬散布を行う研究は盛んに行われているが，そのほとんどがGISによるマップをベースとしたものである[63)64)65)]。このようにGISは，ほ場の空間変動を局所的に把握し，可変投入を最終目的とした一連のPF技術の中で中核をなすツールとなっている。

リモートセンシングデータのこれまでの解析手法は，前記した各種プラットフォームからの情報をそれぞれ独立して扱うものであった。そのため，そのプラットフォームが持つ欠点を克服できず，情報抽出の精度あるいは効率性などに限界があった。しかし，近年，異なるプラットフォームからのデータをGISにより統一的に扱い，互いの欠点を補完することで，より高度なシステムを構築する試みがなされている[66)67)]。この場合，それぞれの手法で得たデータが解像度や精度，記録方式の点で統一されていないことが問題となる。そのため，このような多様化した空間データを円滑に運用できるよう，GISのデータ形式を標準化する取り組みが国際的に進められている。

C．無人ヘリコプタのリモートセンシングへの適用

前節で紹介したリモートセンシングプラットフォームにはそれぞれ特有のメリット・デメリットがある。衛星ベースリモートセンシングは広域を瞬時に撮影できるが，他のプラットフォームと比較して空間分解能が劣る。北海道を除く日本のほ場面積を考えると，衛星画像の空間分解能では，ほ場内の空間変動を細密に捉えることが難しい。また，衛星画像は撮像範囲が雲で覆われた場合，可視領域のデータ取得が不可能となる。可視領域のデータが欠落すれば，作物の生育モニタリングは極めて困難になる。さらに，撮影されてからデータがユーザに届くまでに大きなタイムラグがあり，時々刻々成長する作物の管理には大きな障害となる。航空機ベースリモートセンシングは，衛星画像と比較して高精細なデータが得られるが，データ取得にコストがかかることや，衛星画像と同様にデータ取得に時差があるなどの問題点がある。一方，車両ベースリモートセンシングは，撮像範囲が狭いため，ほ場全体をカバーするには多くの画像を取得しなければならない。また，トラクタの走行速度を考えると作業能率は期待できない。さらに，ぬかるんだほ場には車両自体進入できないことや，とうもろこしなど高草丈の作物のセンシングが困難なため，プラットフォームとしての汎用性が低い。ここで，リモートセンシングのプラットフォームとして産業用無人ヘリコプタを導入すると，これらの問題を一括して解決でき，有効な手段となる。無人ヘリコプタは固定翼機とは違い，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[68)]，その特徴はリモートセンシングに十分活用できる。ヘリコプタは飛行体であることから作物や土壌状態を選ばず，センシングすべき場所へ即座に移動できるので，車両ベースのシステムと比べ作業効率が高い。センシング作業はユーザ自身が機体を操作して行うため，取得したデータをその場で提供でき，リアルタイム性に優れる。さらに，低空センシングであることからほ場の空間変動を捉えるには十分な空間分解能を維持できる（図1.4）。このように，産業用無人ヘリコプタはリモートセンシングにおいて，十分な可能性を持ち，大きな成果が期待できる[69)]。

D．研究の目的及び範囲

本研究では，産業用無人ヘリコプタをベースとしたリモートセンシングシステムの開発を目標とした。無線操縦と低空飛行を特徴とする無人ヘリコプタから，作物の生育やほ場状態を効率よくセンシングし，GISマップを生成できるシステムの開発を行った。まず，リモートセンシングシステムのプロトタイプを構成し，GISマップを自動生成するための方法論を確立した。また，開発したシステムのアプリケーショ

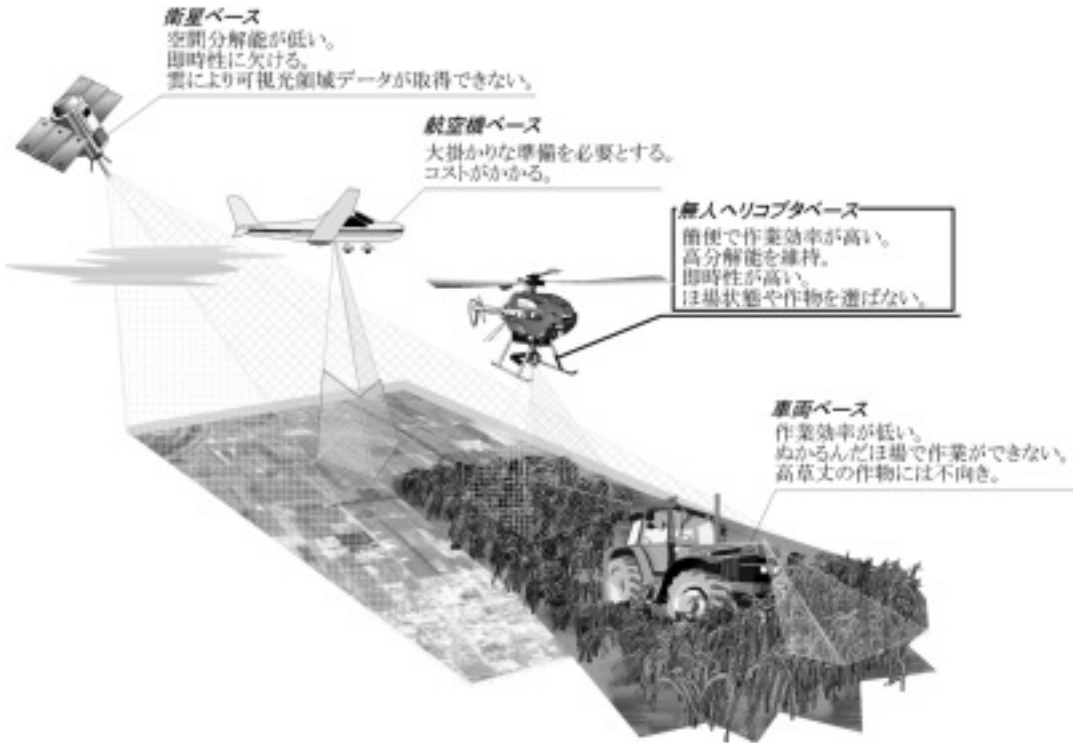


図 1.4　リモートセンシングプラットフォームの比較

ンとして，作物やほ場の状態をセンシングし，その性能や実用性の評価を行った。本論文は 6 章で構成し，本研究のシステム開発の過程や得られた結果を各章に分けて以下のように述べた。

第Ⅱ章では，まず，産業用無人ヘリコプタをベースにしたリモートセンシングシステムの全体構成を説明した。ヘリコプタに搭載したイメージングセンサからの画像を自動的に絶対座標系へ変換するためには機体の位置と姿勢情報が不可欠である。これを実現するために使用した GPS や姿勢角センサなど，システムを構成する全てのデバイスについて，その仕様を記述した。次いで，画像データを絶対座標系へ変換できる手法について述べ，その空間精度について考察した。このとき，座標変換の空間精度を向上させるために姿勢データの補正を行った。そして，本システムの実用性を示すため，ほ場センシングで得られた画像データから，GIS マップを自動生成した。ここでは，リモートセンシングの作業支援としてヘリコプタの飛行状態や作業状況をリアルタイムでモニタリングできるシステムについても扱った。

第Ⅲ章では，システムに新たにレーザ距離計を組み込み，画像に加え地形データも収集できるようシステムを発展させた。地形データは本システムのアウトプットの一つであり，3 次元マップ生成の基礎データとなる。まず，地形データ単独の処理として，精度を維持しながらデータを簡略化できる手法について述べた。次に，ヘリコプタから得られる画像データと地形データを統合することで，3 次元 GIS マップを自動生成できるアルゴリズムを開発し，その空間精度を評価した。また，実際に高低差のあるほ場をセンシングし，開発したアルゴリズムによって 3 次元マップを生成した。

以上のように，第Ⅱ章，第Ⅲ章ではヘリコプタ画像から GIS マップを生成する方法を中心に解説したが，第Ⅳ章，第Ⅴ章では開発したシステムのアプリケーションとして，具体的な作物の生育，ほ場状態のセンシングについて扱った。

第Ⅳ章では小麦をセンシング対象とし，マルチスペクトルイメージングセンサを用いた生育状態の推定について議論した。供試イメージングセンサは緑色，赤色及び近赤外の画像が得られ，イメージングセンサの制御パラメータとして，CCD ゲインや露光時間を調節できる。屋外環境でセンシングを行う場合，太陽光などの環境光量変動の影響を無視できない。そのため，カメラの制御パラメータと環境光量について画像濃度値を正規化し，絶対量として扱える反射率に変換する必要がある。また，小麦ほ場には防除畝が存在し，マップを生成する場合，画像に写しこまれた防除畝の領域を植生の無いものと誤認する。ここでは，このような問題を解決するための画像処理法について説明した。小麦の生育状態推定には，画像データから算出される植生指標を用いて重回帰分析を行い，推定モデルの作成とその精度を議論した。さらに，センシング作業の一層の効率化を目指し，低空からでもより広域をカバーできるような撮影方法についても議論した。

第Ⅴ章ではサーモトレーサによる土壌含水率の推定について扱った。サーモトレーサは熱赤外線の放射エネルギを検知することで，温度測定を可能にするセンサである。まず，供試サーモトレーサの仕様について述べ，実際にヘリコプタから得られた熱画像を示した。物体から放射される熱赤外線エネルギはセンサに到達するまでに減衰し，温度測定の誤差となる。これは，被写体とセンサの間に存在する大気の影響によるもので，ヘリコプタから得られた熱画像に補正を施す必要がある。ここではサーモトレーサの特性を理解するため，温度測定の原理から熱画像の補正モデルを構築し，基礎実験によってその妥当性を検証した。最後に，熱画像温度と土壌含水率との関係を調べ，裸地状態の水田ほ場の含水率マップを作成した。

第Ⅵ章は本論文の総括である。本研究ではリモートセンシングのアウトプットとして，地形，作物の生育状態及び土壌含水率を扱った。いずれの項目も，高精度，高効率を念頭に置き実用性の高いシステムを目指して開発を行った。また，各項目について行った実験の結果から，本研究の目的が十分達成されたと判断した。

II．ヘリコプタベースリモートセンシングシステムの開発

A．はじめに

本研究ではセンシングのプラットフォームとして産業用無人ヘリコプタを採用した。前章で述べたとおり，ヘリコプタはセンシングすべき場所へ即座に移動でき，リモートセンシングのプラットフォームとして十分活用できる。供試ヘリコプタは本来農薬散布用として開発されたものであるが，農薬散布に必要な機材を取り外し，センサマウントとして可動式雲台を設置した。作物画像取得に際し，3 バンド（Green-Red-NIR）のマルチスペクトルイメージングセンサを採用した。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，センサの姿勢と位置に基づいた幾何学的関係から，画像の各ピクセルについて補正することができる[70]。そのためには正確な位置及び姿勢角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（Real Time Kinematic Global Positioning System）を採用し，供試ヘリコプタに搭載されている慣性航法センサ（Inertial Navigation Sensor; INS）及び地磁気方位センサ（Geomagnetic Direction Sensor; GDS）でロール角，ピッチ角，方位角を姿勢角データとして計測した。さらに，可動式雲台の回転角をロータリエンコーダによって得た。これらのセンサで計測されるパラメータを用いれば，ヘリコプタから得た画像を絶対座標系へ変換できる。本章ではシステムを構成するセンサの仕様や性能について述べ，次に，画像の座標変換手法とその変換精度について述べた。また，リモートセンシングの作業支援として，作業状態を地上でモニタリングできるシステムについて説明した。機体に新たに無線装置を搭載し，作業中，機体と地上局の間で通信を行えるようシステムを改良した。このような遠隔操縦によるプラットフォームを用いる場合，作業状態のモニタリングは必須の課題である[71]。

表 2.1　供試ヘリコプタの主要諸元

機体寸法	全長	2960	[mm]
	全長 (メインロータ装着時)	3950	[mm]
	全高	1150	[mm]
	メインロータ径	3380	[mm]
	テールロータ径	600	[mm]
エンジン	型式	TY-250AS	
	種類	強制空冷 2 サイクル 2 気筒 水平対向式ガソリン	
	最大出力	15.8	[kW]
	排気量	248	[ml]
	発電容量	240	[W]
	燃料タンク容量	5	[l]
	始動方式	セルスタータ	
	質量	63	[kg]
	実用ペイロード	294	[N]
	最大積載量	20	[kg]

図 2.1　供試ヘリコプタの外観

表 2.2　供試ロータリエンコーダの主要諸元

形式		光学インクリメンタル形	
分解能		6000	[P/R]
応答周波数		200	[kHz]
出力形式		電圧出力	
電源電圧		5	[V]
外見寸法	外径	50	[mm]
	奥行き	86	[mm]
質量		320	[g]

B．センシングシステムの構成

a．センシングプラットフォーム

本研究で用いた産業用無人ヘリコプタの主要諸元を表 2.1 に示す。供試ヘリコプタはヤンマー農機㈱製 YH 300 であり，総排気量 248 ml，質量 63 kg，全長 4 m，最大出力 15.8 kW，実用ペイロード 294 N である。操縦は専用の無線操縦機によって地上から行い，5 ℓのガソリンを給油すれば 30 分程度のフライトが可能である。図 2.1 に供試ヘリコプタの外観を示す。この無人ヘリコプタは防除作業用に開発され市販されているものであるが，本研究では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，イメージングセンサ取り付けのために可動式雲台を取り付けた。この雲台は専用の無線操縦機によって地上から制御でき，ここに設置したイメージングセンサをパン方向とチルト方向に回転できる。各回転角は分解能 0.06° のロータリエンコーダで計測した。表 2.2 に供試したロータリエンコーダの主要諸元を示す。

b．ナビゲーションセンサ

機体内部には INS 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角が 10 Hz で出力される。これら既に内蔵されているセンサは，ヤンマー農機㈱が開発したシステムの一部であり，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，位置計測に関し，Trimble 社製 RTK-GPS，MS 750 を採用し，テールブーム上にアンテナを，機体後部に受信機を取り付けた。これにより 2 cm の精度で機体位置を測位できる。この

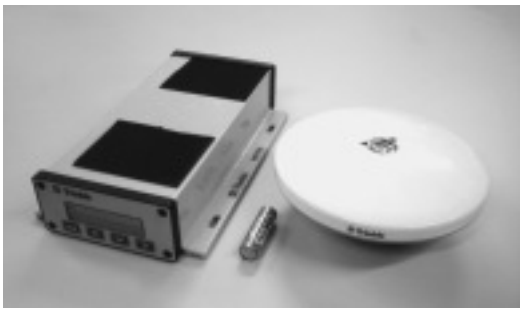


図 2.2　供試 GPS の外観(受信機：左，アンテナ：右)

図 2.3　供試イメージングセンサの外観

測位精度を実現するためには搬送波位相等の補正データを移動局へ伝送する必要があるが[72]，本研究ではこの補正データを仮想基準局（Virtual Reference Station; VRS）方式[73]によって受信した。この方式は，国土地理院が管理運用する電子基準点ネットワークを利用し，ユーザに対してその近傍に実基準局があれば出力される補正データを，仮想的なものとして作成し，提供するものである。国内では既に普及段階にあり，㈱GPS データサービスが配信業務を行っている。また，この補正データは市販の携帯電話で受信できる。本研究では GPS によって得られた経度，緯度データを UTM（Universal Transverse Mercator）変換[74]によってメートル単位に変換したものを絶対座標として用いた。供試 GPS の外観を図 2.2 に，主要諸元を表 2.3 に示す。

c．マルチスペクトルイメージングセンサ

作物画像取得のためのセンシングデバイスとして DancanTech 社製マルチスペクトルイメージングセンサ，MS 2100 を採用し，機体下の可動式雲台に設置した。図 2.3 に供試イメージングセンサの外観を示す。MS 2100 は図 2.4 のように，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，緑色(Green，中心波長 540 nm)，赤色（Red，中心波長 660 nm）及び近赤外線（Near Infrared; NIR，中心波長 810 nm）の波長領域の反射光強度が検出できる。各バンドの半値幅は，Green が 65 nm，Red が 57 nm，NIR が 155 nm である。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，市販のキャプチャデバイスによって 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。本研究では，各バンドの濃度値を 8 ビットの分解能（256 階調）で取得した。さらに，このイメージングセンサ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，CCD ゲイン，露光時間，オフセットが調整可能となっている。

表 2.3　供試 GPS の主要諸元

計測周期		50	[ms]
精度	水平	20	[mm]
	垂直	30	[mm]
通信速度		115,200	[baud]
電源電圧		12	[V]
外形寸法		145×51×239	[mm]
質量		1	[kg]

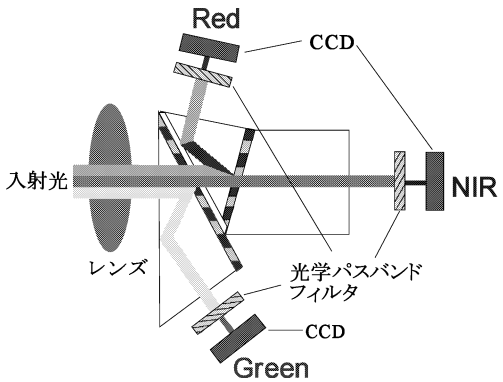


図 2.4　マルチスペクトルイメージングセンサの内部構造

表 2.4　供試イメージングセンサの主要諸元

総解像度		659×494	[pixel]
有効解像度		640×480	[pixel]
計測波長帯(半値幅)	Green	540(65)	[nm]
	Red	660(57)	[nm]
	NIR	810(155)	[nm]
制御項目		CCD ゲイン 露光時間 オフセット	
インターフェース	画像データ	NTSC	
	制御コマンド	RS-232C	
外形寸法		89×97×149	[mm]
質量		1.6	[kg]
電源電圧		12	[V]

表 2.4 に供試イメージングセンサの主要諸元を示す。

d．環境光量センサ

イメージングセンサによって得られた画像から反射率を導出するためには撮影時の環境光量が不可欠である。本研究では，図 2.5 に示す Skye 社製環境光量センサ（Ambient illumination sensor; AI sensor)，SKR 1850 を採用した。この AI センサの受光バンドとその中心波長は緑色 (550 nm)，赤色 (670 nm)，近赤外線 (900 nm) であり，供試イメージングセンサのフィルタ特性とほぼ一致する。AI センサからの環境光量データはバンド毎にアナログ出力される。本研究ではヘリコプタのテールブームに AI センサを設置し，16 ビットの A/D 変換器を介してデータを計測した。

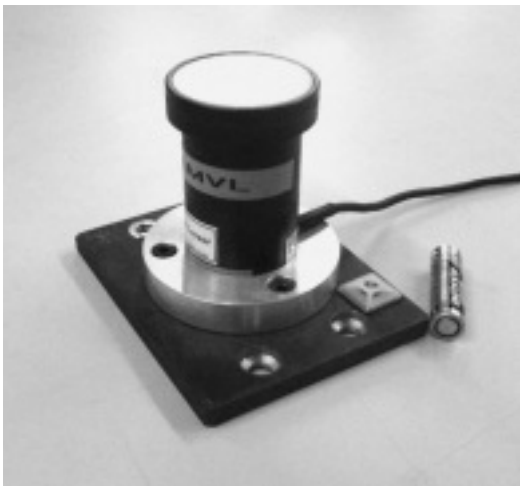


図 2.5　AI センサの外観

e．センシングシステムの概要

図 2.6 にシステムの概要及びデータ計測のインタフェースを示す。ヘリコプタに搭載したコンピュータは，センサからのデータを保存するために用いた。このコンピュータでは 5 秒周期でイメージングセンサの画像がキャプチャされる。コンピュータが画像をキャプチャすると，20 Hz で更新される位置データ，10 Hz で更新される姿勢角データ及び可動式雲台の回転角を

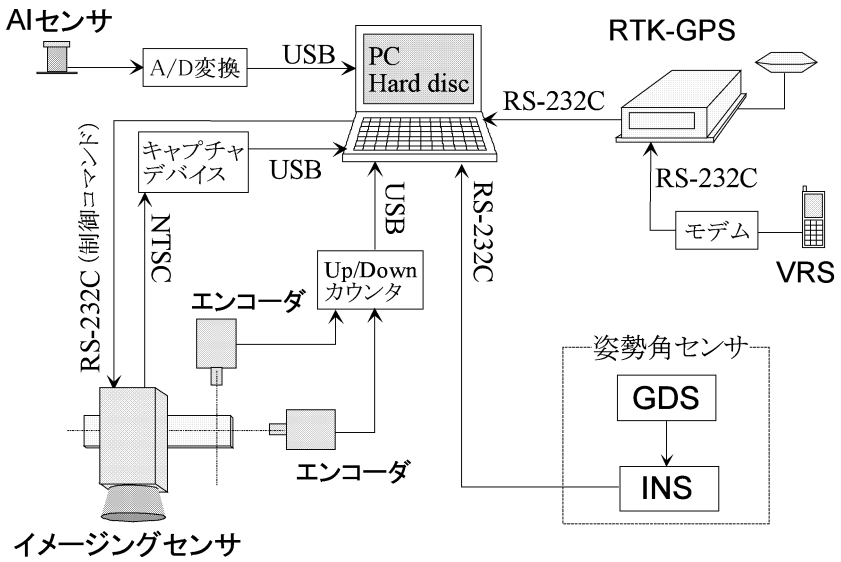


図 2.6　システムの概要及び計測インタフェース

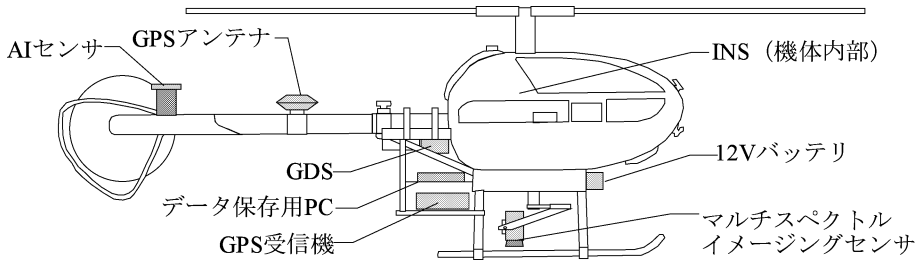


図 2.7　リモートセンシングシステムの構成

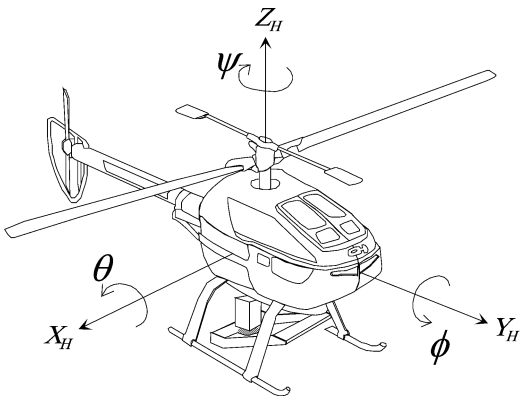


図 2.8　ヘリコプタ座標系と姿勢角の定義

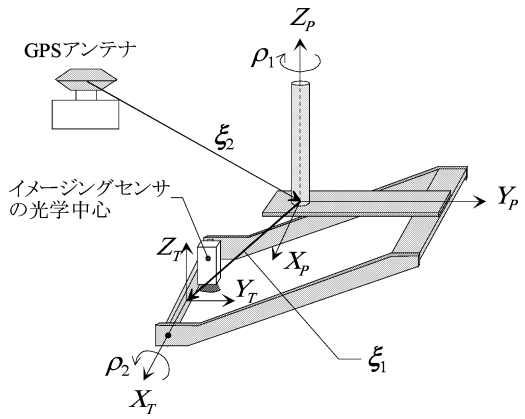


図 2.9　雲台座標系の定義とセンサ位置の座標変換

同時に取得する。AI センサによるデータは，画像計測と独立して 1 Hz で計測した。GPS 受信機やイメージングセンサ，ロータリエンコーダ及び AI センサの電源は，機体前方に設置したバッテリから供給した。図 2.7 に開発したリモートセンシングシステムのセンサ配置を示す。本システムを構成する際，機体のつりあいを保つため，センサ，バッテリ，コンピュータをバランスよく配置し，また，パソコン，GPS 受信機設置台の軽量化に努めた。

C．画像データの座標変換

a．GPS オフセットの補正

図 2.8 に示すように，ヘリコプタ座標系として機体右向きを X_H 軸，機体前向きを Y_H 軸，機体上向きを Z_H 軸とした直交右手系($X_HY_HZ_H$)を定義し，各軸回りの回転角をロール角 ϕ，ピッチ角 θ，ヨー角 ψ 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に従い，ヘリコプタの姿勢を記述した。また，絶対座標系として東向きを X 軸，北向きを 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 $\boldsymbol{R}_1$，$\boldsymbol{R}_2$ 及び $\boldsymbol{R}_3$ は式 (2.1) のようになる。

$$\boldsymbol{R}_1(\phi)=\begin{bmatrix}\cos\phi & 0 & \sin\phi\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_2(\theta)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta\\ 0 & \sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_3(\psi)=\begin{bmatrix}\cos\psi & \sin\psi & 0\\ -\sin\psi & \cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \qquad (2.1)$$

一方，可動式雲台について 2 つの座標系を定義した。図 2.9 に示すように，パン方向の回転軸を Z_P 軸とした直交右手系($X_PY_PZ_P$)を定義し，Z_P 軸まわりの回転，つまり，パン方向回転角を ρ_1 とした。また，チルト方向の回転軸を X_T

とした直交右手系を $X_T-Y_T-Z_T$ 系とし，その回転角，つまり，チルト方向回転角を ρ_2 とした。従って，雲台の回転角 ρ_1，ρ_2 による回転変換行列 $\boldsymbol{Q}_1$，$\boldsymbol{Q}_2$ は以下で示される。

$$\boldsymbol{Q}_1(\rho_1)=\begin{bmatrix}\cos\rho_1 & \sin\rho_1 & 0\\ -\sin\rho_1 & \cos\rho_1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Q}_2(\rho_2)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\rho_2 & -\sin\rho_2\\ 0 & \sin\rho_2 & \cos\rho_2\end{bmatrix} \qquad (2.2)$$

ここで，$X_P-Y_P-Z_P$ 系から $X_T-Y_T-Z_T$ 系へのベクトルを $\boldsymbol{\xi}_1$ とし，GPS アンテナから $X_P-Y_P-Z_P$ 系へのベクトルを $\boldsymbol{\xi}_2$ とする。$X_T-Y_T-Z_T$ 系で表されるイメージングセンサの光学中心の位置ベクトルを $[x_c \quad y_c \quad z_c]^T$ とすると，絶対座標系で表される補正量のベクトル $[\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]^T$ は式 (2.3) のように算出できる。

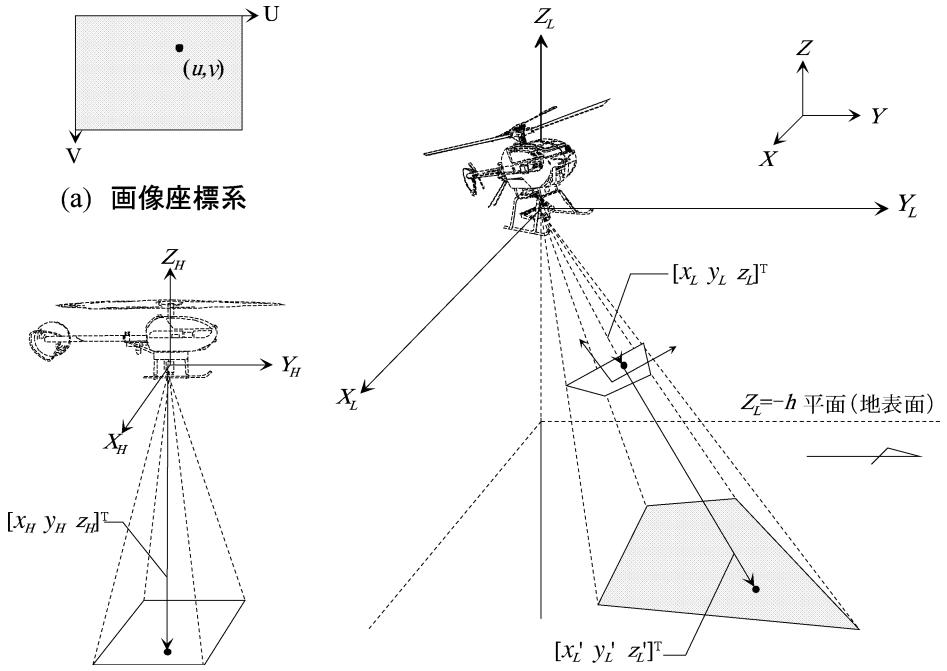
$$\begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta y\\ \Delta z\end{bmatrix}=\boldsymbol{R}_3(\psi)\boldsymbol{R}_2(\theta)\boldsymbol{R}_1(\phi)\left[\begin{array}{c|c}\boldsymbol{Q}_1(\rho_1) & \boldsymbol{\xi}_2\end{array}\right]\left[\begin{array}{c|c}\boldsymbol{Q}_2(\rho_2) & \boldsymbol{\xi}_1\\ \hline 0\ \ 0\ \ 0 & 1\end{array}\right]\begin{bmatrix}x_c\\ y_c\\ z_c\\ 1\end{bmatrix} \qquad (2.3)$$

よって，GPS の計測値を $[x_{GPS} \quad y_{GPS} \quad z_{GPS}]^T$ 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 $[x_S \quad y_S \quad z_S]^T$ は式 (2.4) によって得られる。

$$\begin{bmatrix}x_S\\ y_S\\ z_S\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_{GPS}\\ y_{GPS}\\ z_{GPS}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta y\\ \Delta z\end{bmatrix} \qquad (2.4)$$

b．画像座標系から絶対座標系への変換

画像座標系 (UV) 図 2.10 (a) のように定義し，$U-V$ 系で表される画像データの座標を (u, v) とする。これをメートル単位系の 3 次元空間で



(a) 画像座標系

(b) ヘリコプタ座標系における画像データの位置ベクトル

(c) 画像データの地表面へのマッピング

図 2.10　画像座標から絶対座標への変換方法

扱うため，式 (2.5) のようにヘリコプタ座標系における位置ベクトル$[x_H \quad y_H \quad z_H]^T$へ変換する（図 2.10 (b)）。

$$\begin{cases} x_H = u - 320 \\ y_H = 240 - v \\ z_H = -\sqrt{320^2+240^2}/\tan(\mu/2) \end{cases} \tag{2.5}$$

ここに，μ 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 $\mu = 26.51^\circ$ と決定した。つまり，水平画角 21.34°，垂直画角 16.21° となり，高度 30 m で鉛直下方を撮影すれば，およそ 11.3 m×8.5 m の範囲を，高度 70 m では，およそ 26.4 m×19.8 m の範囲を撮影できる。$[x_H \quad y_H \quad z_H]^T$ はヘリコプタ座標系で表される $Z_H = -\sqrt{320^2+240^2}/\tan(\mu/2)$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，仮想的な CCD 投影面と見なすことができる。

次に図 2.10 (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_L 軸は東向きを，Y_L 軸は北向きを，Z_L 軸は鉛直上向きを正方向とした直交右手系$(X_L Y_L Z_L)$を新たに定義する。$X_L - Y_L - Z_L$ 系で表される回転変換後の位置ベクトル$[x_L \quad y_L \quad z_L]^T$ は式 (2.6) によって示される。

$$\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}_3(\psi)\cdot\boldsymbol{R}_2(\theta)\cdot\boldsymbol{R}_1(\phi)\cdot\boldsymbol{Q}_1(\rho_1)\cdot\boldsymbol{Q}_2(\rho_2)\begin{bmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

ここで，センサ中心の対地高度を h とし，$Z_L = -h$ 平面への透視変換を式 (2.7) のように行うと，$X_L - Y_L - Z_L$ 系で表される点$[x_L' \quad y_L' \quad z_L']^T$ が得られる。

$$\begin{bmatrix} x_L' \\ y_L' \\ z_L' \end{bmatrix} = \frac{-h}{z_L}\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

ただし，次節で述べるセンシング試験では，飛行高度 h は離陸地点の GPS 高度を基準にした。さらに，絶対座標系におけるセンサの光学中心位置$[x_S \quad y_S \quad z_S]^T$ を考慮すれば，地表面へマッピングされた画像データの絶対座標$[x_M \quad y_M \quad z_M]^T$ は式 (2.8) によって得られる。

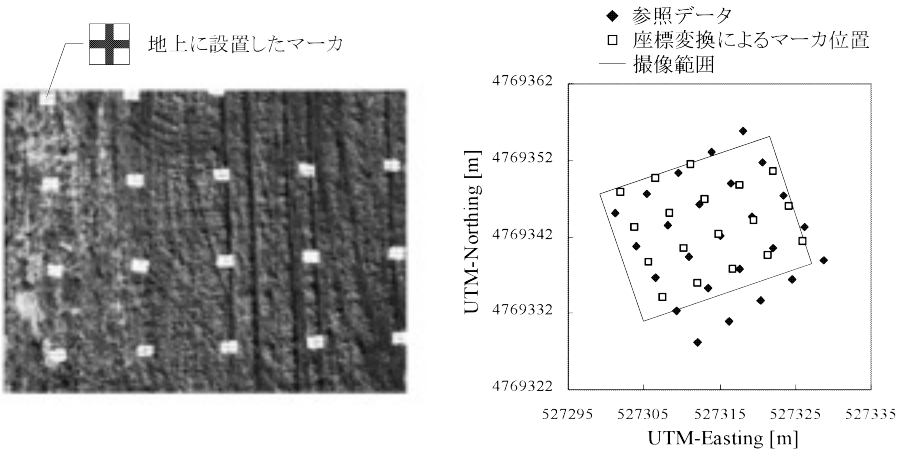
$$\begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_L' \\ y_L' \\ z_L' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

c．座標変換の空間精度

画像データの座標変換精度を評価するため，空中撮影によりヘリコプタからの画像を得た。実験は，北海道大学付属北方圏フィールド科学研究センター生物生産研究農場牧草刈り後地で行った。試験区は傾斜や凹凸が無く，ほぼ水平な場所を選んだ。まず，地上に 25 個のマーカを正確に 5 m 間隔で設置した。さらに，RTK-GPS によって全てのマーカの絶対位置を WGS 84（World Geodetic System of 1984）座標系で測位し，これを座標変換の精度評価用参照データとした。次に，ヘリコプタからそのマーカを撮影し，画像データと機体の位置データや姿勢角データを同時に取得した。この時，イメージングセンサを機体座標系に対し下向きに設置し，雲台の回転角 ρ_1，ρ_2 を 0 とした。図 2.11 (a) は撮影された外部歪を含んだ原画像であり，図 2.11 (b) は実際のマーカ位置と，座標変換によって算出されたマーカ位置を示している。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位置の平均誤差を算出した（表 2.5）。表 2.5 の画像番号 1 は図 2.11 (a) に対応する。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系(UV)におけるマーカ位置はマニュアル作業によって決定した。図 2.11 (b) を見ると，算出したマーカ位置は実際のマーカ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 2 m 以上であり，式 (2.9) で算出される画像分解能 L_{res}[m]は，高度 70 m では約 0.04 m と計算されるので，この変換精度は問題がある。

$$L_{res} = 0.589\times10^{-3}h \tag{2.9}$$

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，機体周辺磁界により



(a)　マーカ撮影画像（画像番号 1）　　(b)　座標変換結果

図 2.11　マーカ撮影画像と座標変換結果

表 2.5　座標変換誤差と機体パラメータ

画像番号	平均誤差[m]	高度[m]	ロール角[deg]	ピッチ角[deg]	ヨー角[deg]	マーカ数
1	1.65	63.36	0.98	0.25	−29.83	18
2	2.38	65.93	−4.80	0.52	−33.03	10
3	1.26	39.52	−3.81	1.40	−21.58	6
4	1.26	46.78	2.27	0.42	−22.17	12
5	1.65	70.75	3.81	2.04	17.51	16

生じる地磁気のゆがみに基づく GDS の方位誤差である。また，センサの姿勢が必ずしも INS で検知した機体の姿勢と一致していなかったことや，透視変換のための地表面高度が正確ではなかったことも誤差の一因と考えられる。従って，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補正を行う必要があると判定された。

D．座標変換誤差の補正法

a．地磁気方位センサの誤差補正

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㈱日本航空電子製慣性姿勢計測装置（Inertial Measurement Unit; IMU），JCS-7401 A を設置した。IMU は，3 軸の光ファイバジャイロスコープによってロール角，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る。図 2.12 に IMU の外観を，表 2.6 に主要諸元を示す。ヘリコプタを半径約 10 m 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 10 Hz で同時に計測した。このとき，ヘリコプタ座標系の Y_H 軸が常に進行方向を向いており，飛行速度は約 2 m/s であった。式（2.10）における ω_{IMU} 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

図 2.12　供試 IMU の外観

表 2.6　供試 IMU の主要諸元

ロール角, ピッチ角計測範囲	−45〜45	[deg]
ヨー角計測範囲	−180〜180	[deg]
角度分解能	0.01	[deg]
水平整定精度	0.2	[deg]
ヨー角ドリフト	2	[deg/min]
出力形態	デジタル	
インターフェース	RS-232C	
電源電圧	12	[V]
外形寸法	170×170×137	[mm]
質量	1.4	[kg]

した。ψ_{GDS} は GDS データであることから，e_{yaw} は 2 つのデータの偏差となり，GDS の誤差とみなすことができる。ψ_{GDS} による e_{yaw} の推移を図 2.13 に示す。図 2.13 より，本システムの磁気環境下において，GDS 出力は，およそ±15° の周期的変動誤差を有していることが確認できた。図 2.13 の曲線 $f(\psi_{GDS})$は e_{yaw} の近似曲線を示しており，式（2.11）に示すように次数 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 $\Delta\psi$ を導入すれば，補正後の絶対方位 ψ_T は式 (2.12) のように求められる。このバイアス値 $\Delta\psi$ は IMU の初期値に含まれるオフセットである。

$$e_{yaw} = \omega_{IMU} - \psi_{GDS} \tag{2.10}$$

$$f(\psi_{GDS}) = a_0 + \sum_{k=1}^{5} a_k \cos(k \cdot \psi_{GDS}) + \sum_{k=1}^{5} b_k \sin(k \cdot \psi_{GDS}) \tag{2.11}$$

$$\psi_T = \psi_{GDS} + f(\psi_{GDS}) + \Delta\psi \tag{2.12}$$

ここで，式（2.11）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）に基づいて決定した。フーリエ級数の次数 n_f による FPE 値 e_{FPE} は総データ N_f，予測誤差の分散 σ^2 を用いて式（2.13）のように算出され，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 2.14 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 2.14 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

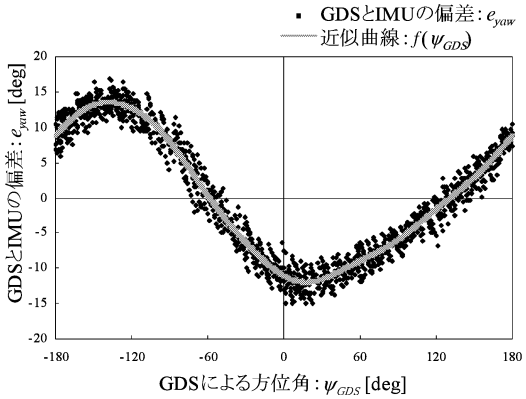


図 2.13　GDS 誤差の周期的変動

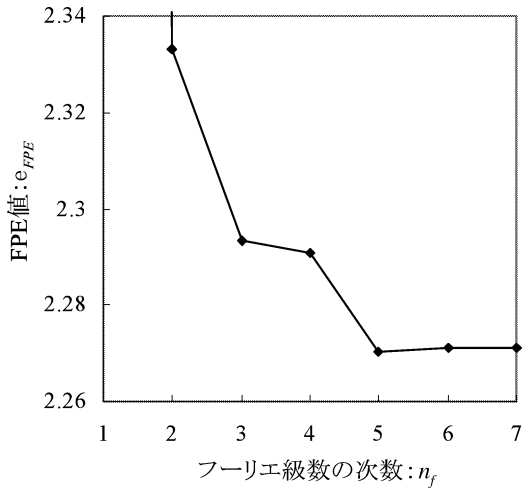


図 2.14　フーリエ級数の次数による FPE 値の推移

級数展開の次数は 5 が最適であると判断できる。

$$e_{FPE} = \frac{N_f + 2n_f}{N_f - 2n_f}\sigma \tag{2.13}$$

さらに，高度 h，ピッチ角 θ 及びロール角 ϕ の誤差補正について，それぞれのバイアス値を Δh，$\Delta\theta$，$\Delta\phi$ とすれば，補正後の値 h_T，θ_T 及び ϕ_T は式（2.14）のように表すことができる。

$$\begin{cases} h_T = h + \Delta h \\ \theta_T = \theta + \Delta\theta \\ \phi_T = \phi + \Delta\phi \end{cases} \tag{2.14}$$

Δh 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，傾斜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。この問題は次章で取り扱う。また，$\Delta\theta$ と $\Delta\phi$ の補正は，イメージングセンサを機軸に対し正確に水平，垂直に取り付けることが困難であるためで，このようなシステム開発には必須のキャリブレーションである。

ここで，$\Delta\psi$，Δh，$\Delta\theta$ 及び $\Delta\phi$ を同時に微小変化させ，前節で用いた 5 枚の画像中の総マーカ数 62 点について，実際のマーカ位置と算出されたマーカ位置との誤差が最小となるような値を見つけ出した。

b．座標変換精度の改善

図 2.15 は式 (2.12)，(2.14) で示した補正法を用いて，再度座標変換を行ったときのマーカ位置である。また， 5 枚の画像におけるマーカ位置の平均誤差を表 2.7 に示す。図 2.15 を見ると，補正データを用いて算出したマーカ位置は実際のマーカ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 2.5)と比べると，大きな精度向上が認められる。 5 枚の画像について，座標変換誤差は 29 cm 以下であり，補正前の誤差との割合で 80%から 88%の改善がみられた。従って，前節で考案したデータ補正法は有効であると考えられる。ここで，GDS 誤差補正法の効果を検証するために，式 (2.12) で示した補正法のみを用いて座標変換を行った。

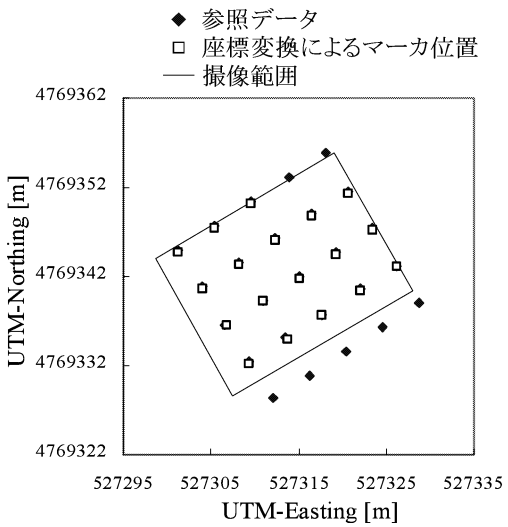


図 2.15　補正後の座標変結果

その結果を表 2.8 に示す。平均誤差は 70 cm 以下であり，補正前の誤差との割合で，58%から 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。

これまで扱った 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 3 枚の画像をテストデータとして，補正法の妥当性を検証した。表 2.9 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，81%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 20 cm 以内であり，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。

上記の座標変換精度は，イメージングセンサを下向きに固定して撮影された画像に限定したものである。次に，可動式雲台を制御し，イメージングセンサに俯角を持たせた状態で得られた画像について同様の処理を行った。図 2.16 は，得られた原画像と座標変換結果である。座標変換の結果，表 2.10 のように最大誤差 38 cm を得た。ここで扱った画像はチルト方向の回転角が 45° 程度のものもあり，表 2.7，表 2.9 と比較すると変換精度が劣化した。しかし，38 cm の誤差はほ場マップを生成して PF に適用する上で

表 2.7　補正後の座標変換精度

画像番号	平均誤差[m]
1	0.18
2	0.29
3	0.19
4	0.25
5	0.23

表 2.8　方位補正のみを用いた場合の座標変換精度

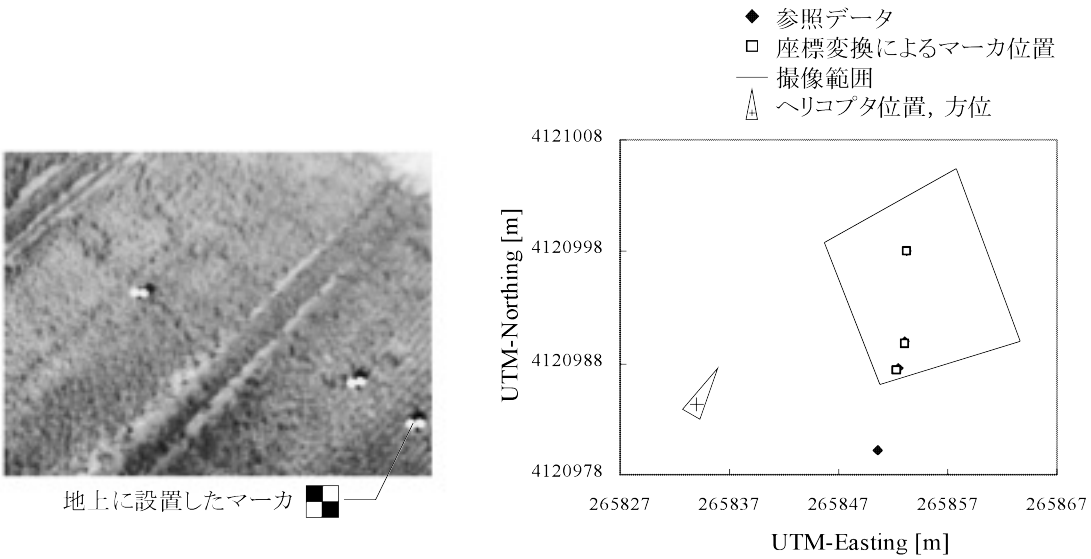
画像番号	平均誤差[m]
1	0.42
2	0.54
3	0.35
4	0.51
5	0.70

表 2.9　テストデータによる補正効果の検証

画像番号	平均誤差（補正前）[m]	平均誤差（補正後）[m]	高度 [m]	ロール角 [deg]	ピッチ角 [deg]	ヨー角 [deg]	マーカ数
6	2.50	0.19	67.61	1.71	2.96	−19.51	16
7	1.03	0.20	31.88	1.72	2.01	−18.01	6
8	1.49	0.18	69.80	−3.10	1.27	−19.63	12

表 2.10　センサに俯角を持たせた状態での座標変換精度

画像番号	平均誤差 [m]	高度 [m]	ロール角 [deg]	ピッチ角 [deg]	ヨー角 [deg]	パン方向回転角 [deg]	チルト方向回転角 [deg]	マーカ数
9	0.30	33.25	1.11	2.77	30.29	36.81	31.48	3
10	0.38	22.00	1.51	2.58	13.39	0.09	44.46	2
11	0.36	19.42	3.14	5.48	12.76	1.47	39.72	2
12	0.28	48.50	4.33	−1.46	18.52	46.11	−2.46	3
13	0.37	51.01	2.79	−0.79	13.15	50.11	−4.80	3



(a)　マーカ撮影画像（画像番号 9）　　(b)　座標変換結果

図 2.16　センサに俯角を持たせた状態で得られた画像と座標変換結果

許容できる精度であると判断した。

c．作物生育の GIS マップ生成

ヘリコプタ画像を用いて，実際のほ場マップを生成するため，北海道大学付属北方圏フィールド科学研究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 91 m×21 m であり，このほ場上空を図 2.17 のように往復飛行させ，111 枚の画像を得た。ヘリコプタからの画像は図 2.18 のように，作物列がはっきり認識でき，極めて高分解能であることがわかる。全ての画像を絶対座標へ変換し，図 2.19 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。これは，画像の Green, Red, NIR の濃度値をそのまま用いて絶対座標系へマッピングしたものである。図 2.19 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

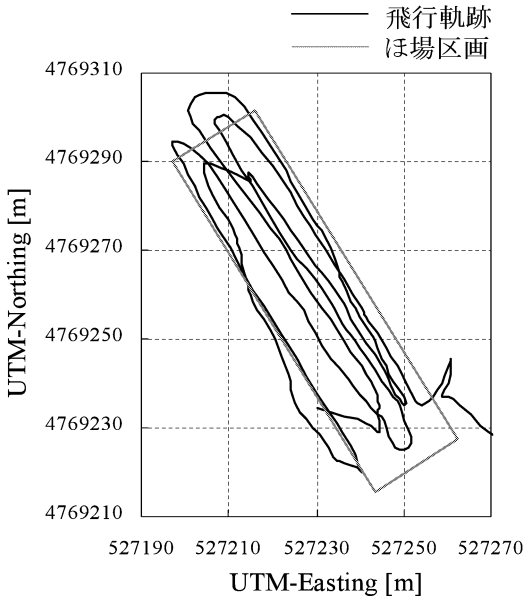


図 2.17　センシングの飛行軌跡

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能率である。また，飛行高度は最高で 30 m 程度であったが，このときの空間分解能は 1.7 cm/pixel と極めて小さく，作物の生育モニタリングには十分な精細さを有する。次に，マルチスペクトル画像の Red 及び NIR の濃度値から作物植生指数（Normalized vegetation index; NDVI）を式 (2.15) により算出し，図 2.20 のようにマップを生成した。

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \qquad (2.15)$$

本実験で生成したマップには，センシングにむらが確認できるが，センシング状況をオンラインでモニタできるシステムを地上に設置し，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。このシステム開発については次節で述べる。

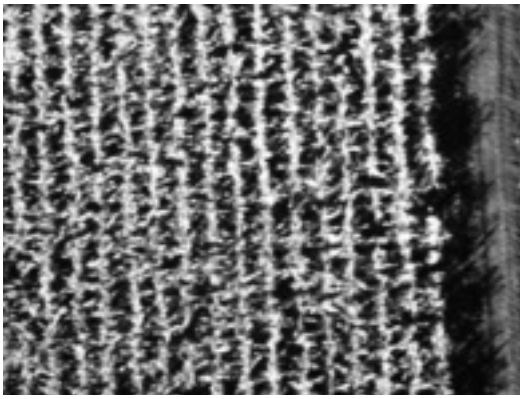


図 2.18　トウモロコシほ場のヘリコプタ画像

E．モニタリングシステムによる作業支援

a．無線通信によるデータ伝送

前節で扱ったほ場マップには，画像データが欠落している箇所があった。これは，飛行経路や速度が不明瞭である上に，ほ場のどの部分をセンシングしたかの判断をオペレータの経験と勘に委ねたことに起因する。そこで，本研究では無人ヘリコプタによるリモートセンシングの作業支援として，飛行状態や作業状況を地上で逐次確認できるモニタリングシステムの開発を行った。飛行中の機体位置や姿勢角などのデータを地上局に伝送できれば，センシングした領域を算出でき，リアルタイムで作業状況が確認できる。また，イメージングセンサの状態や RTK-GPS の補正信号が受信されているかなど，センシングシステム自体の稼働状況を把握でき，遠隔操縦によるプラットフォームを使用する場合有用なシステムとなる。本研究ではヘリコプタで得られるデータを地上局へ伝送させるため，㈱双葉電子工業製 SS 無線画像転送装置，NDT24S01（送信機）及び NDR24S01（受信機）を採用した。供試無線装置の主要諸元を表 2.11 に示す。この無線装置は周波数帯域として耐ノイズ性に優れる 2.4 GHz 帯のスペクトル拡散（Spread Spectrum; SS）方式を採用している。SS 方式は，デジタル変調の一種で，通常の方式よりも広い周波数帯域に拡散して送信する方式である。また，NTSC 方式で取り込んだ映像信号に加え，RS-232 C によって取り込んだデジタル信号を同時に送受信できる。本研

図 2.19　合成画像によるほ場マップ

表 2.11　供試無線装置の主要諸元

無線間	変調方式	スペクトル拡散方式	
	通信速度	5.5	[Mbps]
	無線周波数帯域	2.4GHz 帯	
	周波数チャンネル	3 チャンネル	
	ダイバシティ	2 系統アンテナダイバシティ方式	
	サービスエリア	1200	[m]
端末間	インターフェース	RS-232C	
	通信速度	9600	[baud]
画像	ビデオ信号形式	NTSC	
	圧縮方式	モーション JPEG	
	電源電圧	12	[V]
	外形寸法	145×200×55	[mm]
	質量	0.98	[kg]

究では，ヘリコプタから取得した画像データ及び位置，姿勢角データなどの機体パラメータを送信し，地上局で作業状態をモニタリングできるようシステムを改良した。送信機は図 2.21（a）のように機体に設置し，地上局は図 2.21（b）のように，受信機，ノートパソコン，

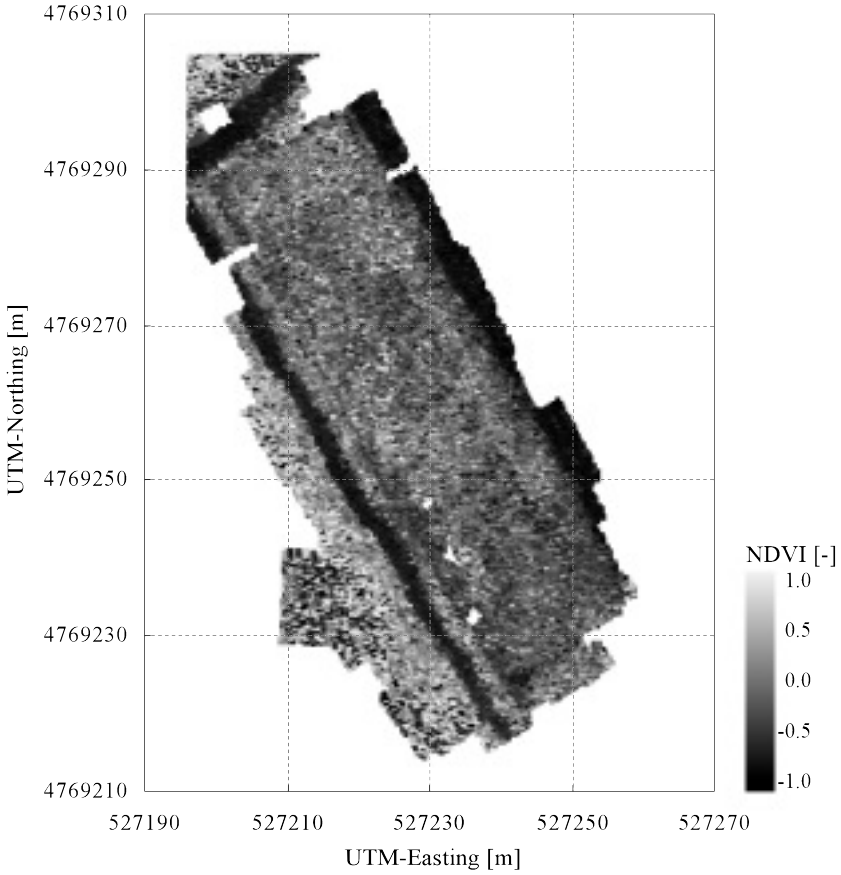
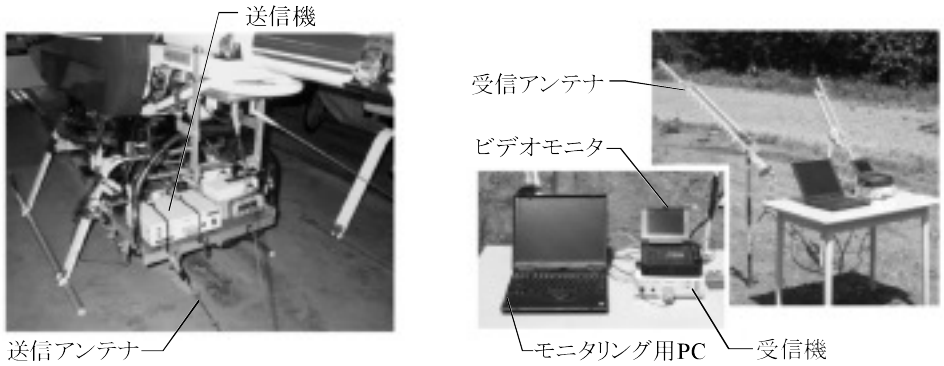


図 2.20　トウモロコシほ場の NDVI マップ



(a)　送信機の設置　　(b)　地上局の構成

図 2.21　無線によるリモートセンシングデータの伝送

ビデオモニタで構成した。地上局では受信した飛行ログを RS-232 C を介してノートパソコンに送り，開発したソフトウェアによって飛行状態を表示する。また，ビデオモニタではイメージングセンサの画像が表示される。

b．モニタリングソフトウェアの実装

図 2.22 にモニタリングシステムの流れ図を示す。本ソフトウェアは無人ヘリコプタによる

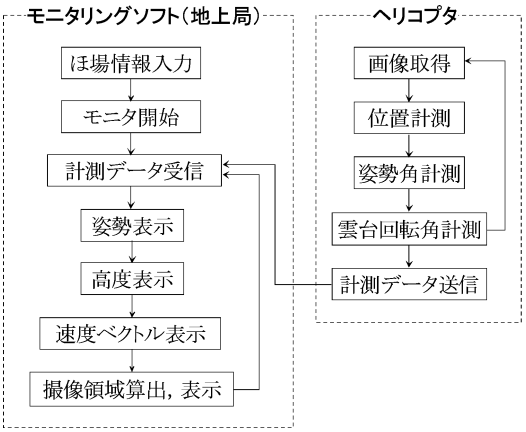


図 2.22　モニタリングシステムの流れ図

作業に有用な情報をオペレータに提供するものである。まず，作業を開始する前にソフトウェアにほ場区画を読み込む。ほ場区画は事前にほ場外周を測量することで取得する。また，防風林や建築物などの位置が分かっている場合，このようなほ場周辺環境の情報も読み込める。作業中のヘリコプタは位置，姿勢角などのデータを逐次送信する。地上局ではモニタリングを開始するとこれら機体から送信されるデータを受信し，機体の飛行状態や作業状況を図 2.23 のように表示する。ロール角，ピッチ角については計測された値をもとに機体の姿勢変化を表示し，飛行高度は地表面からの機体高度が表示される。また，GPS の NMEA-VTG メッセージから得られる機体の進行方位，速度に加え GDS による絶対方位から機体に対する速度ベクトルを算出し表示する。さらに，受信した機体の位置，姿勢角，雲台の回転角からセンシングされた領域が算出され，ソフトウェア上で塗りつぶされる。この一連の処理を繰り返すことでヘリコプタの状態や作業状況を作業中に逐次確認できる。開発したソフトウェアは 3 D グラフィックスにより，機体の飛行状態を表示させることができる。従って，図 2.24 のように，機体を任意の視点から捉えることができる。

F．ま　と　め

本章では，産業用無人ヘリコプタをベースとしたリモートセンシングシステムの開発を目標とした。作物画像取得に際し，マルチスペクトルイメージングセンサを採用しヘリコプタに搭載した。機体の位置計測には RTK-GPS を用い，INS と GDS によって 3 軸の姿勢角を計測

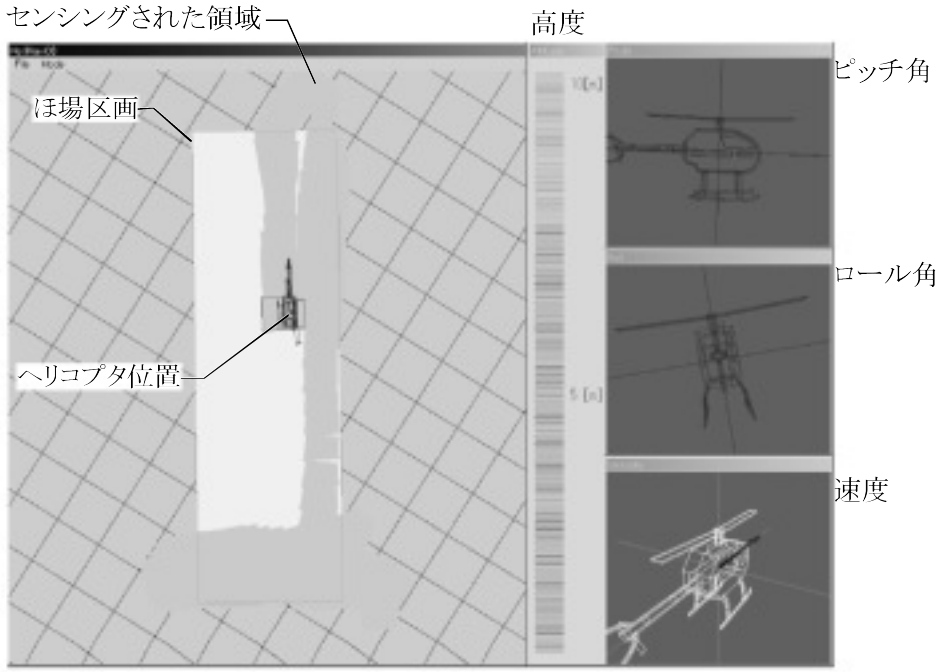


図 2.23　モニタリングソフトウェアの実装

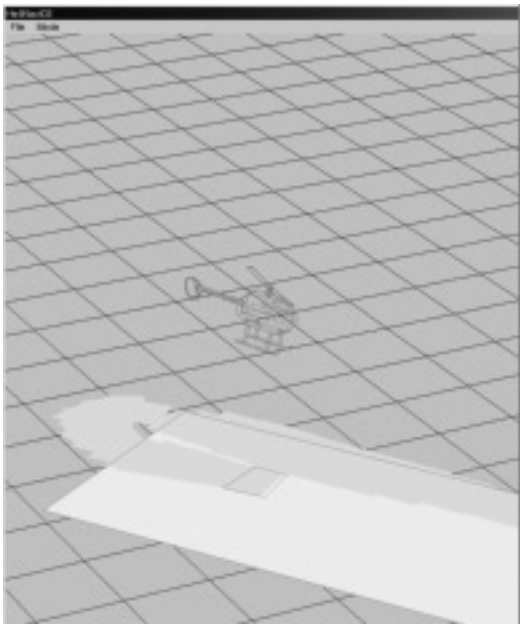


図 2.24　任意の視点からの飛行状態把握

した。また，イメージングセンサを設置した可動式雲台の回転角計測にロータリエンコーダを用いた。そして，これらの情報を用いて画像データを座標変換できる方法を考案した。ヘリコプタから得られた画像について，座標変換精度を調べた結果，2 m 以上の誤差が確認できた。そこで，姿勢角データと高度データについて補正が必要であると判断した。絶対方位角については，磁気環境のゆがみによる GDS 出力の誤差を特定し，ロール角，ピッチ角及び高度についてはバイアス値を考慮することで補正を行った。その結果，座標変換誤差を 29 cm 以内に抑えることができた。また，他の画像をテストデータとして用いた結果，座標変換誤差は 20 cm 以内であったことから，本補正法の妥当性が確認された。さらに，イメージングセンサに俯角を持たせた状態で得られた画像については，精度劣化が見られ，誤差は 38 cm であった。しかし，この精度はほ場マップを生成して PF に利用する上で十分許容できる誤差である。開発したシステムを用いて，トウモロコシほ場のセンシング試験を行った。生成されたマップは実際のほ場区画におさまっており，十分な変換精度であることがわかった。また，画像から得られる Red と NIR の濃度値を用いて，このほ場の NDVI マップを生成できた。ここで，生成されたほ場マップにはデータが欠落している部分があった。これは，センシングされた領域が作業中に確認できなかったためである。その解決法として，地上で作業状況をモニタリングできるシステムを開発した。機体と地上局を無線で通信し，飛行中のヘリコプタの位置や姿勢情報を地上局で確認できるものとした。地上局では開発したソフトウェアによって機体の位置や姿勢が描画され，センシングされた領域も確認できる。無人ヘリコプタのような遠隔操縦システムにとって，このようなモニタリングシステムは必須の機能である。

本章では扱った画像データは，地表面がフラットな場所で得られたものである。従って，センシングするほ場に傾斜や凹凸などの高低差がある場合，ここで示した精度は維持できない。従って，地形情報を考慮して画像データをマッピングする必要がある。この問題については地形測量システムも含めて次章で議論する。

III. 地形センシングと空間情報の 3 次元マッピング

A. はじめに

前章では，画像データを絶対座標系に変換し，その空間精度がほ場マップを生成する上で十分であることを確認した。しかし，傾斜や凹凸を含むほ場ではこの精度を維持できず，この問題解決には地形情報が不可欠である。機体の位置は RTK-GPS により計測できるため，機体から地表面までの距離が得られれば，地形データを算出できる。従って，これまでのシステムに新たにレーザ距離計を追加し，画像に加えて地形データも得られるようシステムを発展させた。本章ではまず，レーザによる距離データを地形データに変換できる手法について述べ，その地形情報の精度について議論した。本研究では，ヘリコプタから得られた地形データを，画像の 3 次元マッピングの基礎データとして用いたが，農地を高精度，高効率で測量できるシステムはそれ自体有効である。農地の地形情報はほ場の暗きょ，明きょ施工などの排水計画を立て

る上で重要な情報となる[75]。また，近年，ほ場の地形と作物の生育状態あるいは土壌の栄養状態との関係が示されている[76]。従って，画像から得られる作物情報と地形情報を統合することで，PF における作物管理に有用な情報抽出が期待できる。本章では，地形データの 1 つの処理法として，精度を維持しながらデータの簡略化を行えるアルゴリズムについて説明した。高精度レーザによる地形データは空間的に細密であれば精度も期待できるが，最終的に必要とされる精度やデータサイズは，その用途や処理を行うコンピュータの性能から判断すべきである。ここで扱うアルゴリズムはラスタ変換[77][78][79]による簡略化とは違い，精度に最も影響が無いデータ，つまり，形状表現に無駄なデータを検索し削除できるアルゴリズムである。

さらに，本研究ではヘリコプタから得られる画像と地形の情報を統合し，3 次元マップを生成できるアルゴリズムを開発した。開発したアルゴリズムを用いて，画像を地形にマッピングし，空間精度を評価した。最後に，ほ場の 3 次元 GIS マップを生成し，システムの有効性を検討した。

B．レーザ距離計による地形センシング

a．レーザ距離計の設置

地形測量には，㈱ライカ製レーザ距離計 DISTO を採用した。図 3.1 に供試レーザ距離計の外観を，表 3.1 に主要諸元を示す。供試レーザ距離計は反射板やプリズムなどのターゲットを必要とせず，非接触で本体から対象物までの距離を精度± 2 mm で計測できる。本体から出力されるクラス II のレーザと対象物で反射した光との位相差原理によって距離を計測する。距離を認識すると RS-232 C によりデータを出力し，コンピュータに取り込まれる。本研究では，イメージングセンサと隣り合うように可動式雲台にレーザ距離計を取り付けた（図 3.2）。ヘリコプタから地表面までの距離が計測されると RTK-GPS による機体位置，INS，GDS による機体姿勢角及びロータリエンコーダによる雲台回転角を同時計測する。これと同様に，イメージングセンサによる画像データについても，姿勢角などの機体パラメータを計測する必要がある。距離と画像を同期して計測することはそれぞれのセンサの性能上不可能であったので，本システムでは，距離情報と画像情報，そして，これらのデータに付随する位置，姿勢角データを独立して計測するように構成した。

b．距離データからの地形マップ生成

面積約 23,000 m²，高低差約 10 m の小麦ほ場を試験区として地形測量を行った。図 3.3 は試

表 3.1　供試レーザ距離計の主要諸元

計測精度	2	[mm]
計測分解能	1	[mm]
計測範囲	0.3〜100	[m]
計測周期	0.16〜1	[s]
ビーム広がり角	0.034	[deg]
レーザ周波数	635	[nm]
レーザ強度	クラス II	
外形寸法	188×70×47	[mm]
質量	440	[g]

図 3.1　供試レーザ距離計の外観

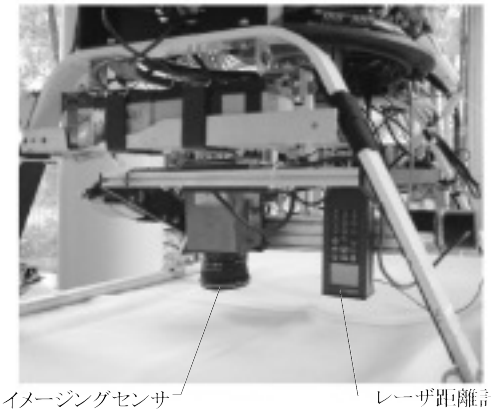


図 3.2　レーザ距離計の設置

験ほ場の区画とヘリコプタの飛行軌跡を示している。上空約 30 m を平均速度 3 m/s でほ場全体を網羅するように飛行し，レーザによる距離データを 1,371 点取得した。このとき画像データも同時に取得したが，ここでは距離データの処理について述べ，画像データについては本章 D 節で扱う。前章で定義した $X_T-Y_T-Z_T$ 系で表されるレーザ出力点の位置ベクトルを $[x_d \quad y_d \quad z_d]^T$ とし，レーザによって計測された距離を L_d とすれば，レーザ照射点の絶対位置，つまり，地形データ $[x_E \quad y_E \quad z_E]^T$ は以下の座標変換式で得られる。

$$\begin{bmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c:c} \boldsymbol{R} & \begin{matrix} x_{GPS} \\ y_{GPS} \\ z_{GPS} \end{matrix} \\ \hdashline \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \end{matrix} & 1 \end{array}\right] \left[\begin{array}{c:c} \boldsymbol{Q}_1(\rho_1) & \xi_2 \\ \hdashline \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \end{matrix} & 1 \end{array}\right] \left[\begin{array}{c:c} \boldsymbol{Q}_2(\rho_2) & \xi_1 \\ \hdashline \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \end{matrix} & 1 \end{array}\right] \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d - L_d \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

ただし，$\boldsymbol{R}$ は以下で算出される 3 × 3 の回転行列である。

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}_3(\psi) \cdot \boldsymbol{R}_2(\theta) \cdot \boldsymbol{R}_1(\phi) \tag{3.2}$$

c．地形マップの精度評価

精度評価用の参照データを得るため，㈱トプコン製トータルステーション AP-L1A を用いてほ場全体の地上測量を行い，地形データを 6,223 点収集した。本研究ではこれを UTM 座標系に変換したものを精度評価用参照データとした。使用したトータルステーションは，レーザによってプリズムの 3 次元位置を精度 2 cm で連続計測できる。本研究では，このトータルステーションによる地上測量を従来法として位置づけ，作業能率の比較対象としても扱った。トータルステーションとヘリコプタ，両手法で得られた地形データの分布は図 3.4 のようにほ場全体をカバーしていることがわかる。また，トータルステーションによる地形データは高密度であり，参照用として十分なデータ量である

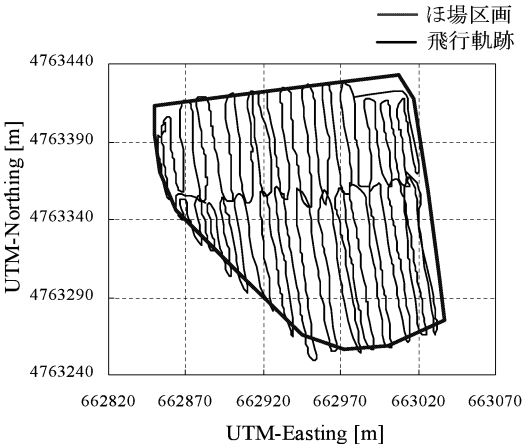


図 3.3　試験ほ場の区画と地形センシングの飛行軌跡

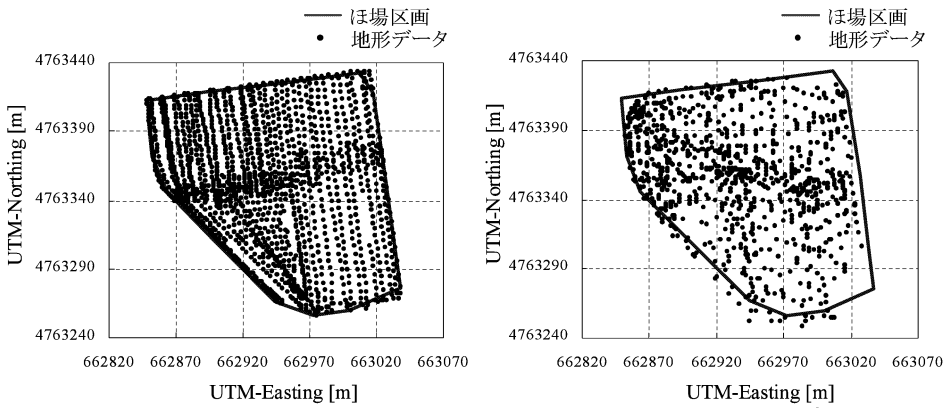


図 3.4　トータルステーションとヘリコプタから得られた地形データの分布

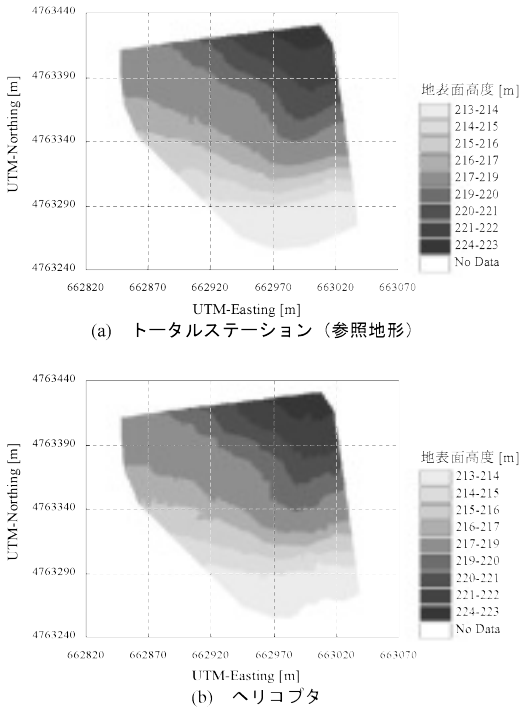


図 3.5　トータルステーションとヘリコプタによる地形マップの比較

と判断できる。両手法で取得した地形データそれぞれについて，逆距離加重法（Inverse Distance Weighted; IDW）を用いて図 3.5 のように地形マップを作成した。IDW は補間点からサンプル点までの水平距離の逆数の二乗を重みとした平均であり，以下の式で得られる。

$$\hat{z}=\frac{\sum_{i=1}^{n_{IDW}}\frac{z_{E(i)}}{{d_{H(i)}}^2}}{\sum_{i=1}^{n_{IDW}}\frac{1}{{d_{H(i)}}^2}} \tag{3.3}$$

ここに，$\hat{z}$ は補間点における推定地表高度である。また，d_H は補間点からサンプル点までの水平距離であり，補間点から近傍 n_{IDW} 点をサンプル点としたものである。図 3.5 (a) の参照地形の傾向が，図 3.5 (b) のヘリコプタによる地形マップにも確認できる。参照データをもとにヘリコプタから取得した地形データの精度評価を行った結果，R. M. S. 誤差で 9 cm，最大誤差が 15 cm であった。これはほ場地形を測量する上で十分な精度といえる。また，従来法であるトータルステーションによる地上測量には 3 時間以上要したのに対し，ヘリコプタでは約 35 分であったことから，開発した測量システムは高能率な地形測量が可能といえる。この地形測量データは後述する 3 次元画像マッピングの基礎データとして使用した。

C．地形データの簡略化手法

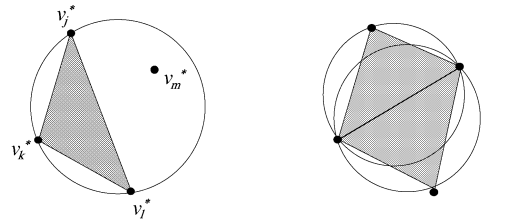
a．地形データからのポリゴン生成

ここでは，得られた地形データの簡略化手法について述べる。3 次元の点群から立体を形成し，効果的に表現する手法はコンピュータグラフィックスの分野で発展している[80)81)82)]。本研究では，生成された立体の形状をできるだけ維持しながらデータ数を削減するアルゴリズムを，ヘリコプタから得られた地形データに適用する。まず，全測量地点から立体を自動生成するため，測量した各点を最適な三角形で結び，ポリゴンを形成する。点群からの三角形の組み合わせは点の個数によって無数に存在するが，組み合わせ方法は有限であるので最適な三角形の組み合わせを一意に決定できる[83)]。ここで最適な三角形とはそれぞれの三角形の最小内角が最大となるものとした。これにより，その点群で構成される立体形状を最適に表現できる。これは，構成した三角形の外接円内に他の点を含まないという条件で実現できる。

得られた N_E 個の測量点を式 (3.4) のように，$\boldsymbol{v}_i=[x_E \quad y_E \quad z_E]^{\mathrm{T}}$ を元とする 3 次元ユークリッド空間 E^3 の部分集合 V として定義した。

$$V=\{\boldsymbol{v}_i|\boldsymbol{v}_i\in E^3,\ 1\le i\le N_E\} \tag{3.4}$$

また，$\boldsymbol{v}_i$ の XY 平面への射影 $\boldsymbol{v}_i^*\in E^2$ を元とする集合を V^* とする。ここで，V^* 測量点群の 3 点 $\boldsymbol{v}_j^*$, $\boldsymbol{v}_k^*$, $\boldsymbol{v}_l^*$ を頂点とする三角形の外接円と他の点 $\boldsymbol{v}_m^*$ との位置関係を式 (3.5) のように O($\boldsymbol{v}_m^*$)と定義する。$\boldsymbol{v}_j^*$，$\boldsymbol{v}_k^*$，$\boldsymbol{v}_l^*$ について式(3.6)を満たせば，その 3 次元位置 $\boldsymbol{v}_j$，$\boldsymbol{v}_k$，$\boldsymbol{v}_l$ を頂点とした三角ポリゴン S を形成する。式 (3.6) は V^* の任意点 $\boldsymbol{v}_m^*$ が $\boldsymbol{v}_j^*$，$\boldsymbol{v}_k^*$，$\boldsymbol{v}_l^*$ で構成される三角形の外接円内に含まれないことを意味する。



(a)　三角ポリゴンの形成　　(b)　三角ポリゴンの再形成

図 3.6　三角ポリゴンの生成アルゴリズム

$$O(\boldsymbol{v}_m^*)=\begin{vmatrix} \boldsymbol{v}_j^{*\mathrm{T}} & \|\boldsymbol{v}_j^*\|^2 & 1 \\ \boldsymbol{v}_k^{*\mathrm{T}} & \|\boldsymbol{v}_k^*\|^2 & 1 \\ \boldsymbol{v}_l^{*\mathrm{T}} & \|\boldsymbol{v}_l^*\|^2 & 1 \\ \boldsymbol{v}_m^{*\mathrm{T}} & \|\boldsymbol{v}_m^*\|^2 & 1 \end{vmatrix},\ subject\ to$$
$$1\leq j,\ k,\ l,\ m\leq N_E$$
$$(j-k)(k-l)(l-j)\neq 0 \qquad (3.5)$$

$$O(\boldsymbol{v}_m^*)<0,\ subject\ to\quad \forall \boldsymbol{v}_m^*\in V^*$$
$$(j-m)(k-m)(l-m)\neq 0 \qquad (3.6)$$

ただし，$\|\cdot\|$はユークリッドノルムを示す。図 3.6（a）のように形成した三角形の外接円内に他の点が存在する時，図 3.6（b）のような三角形を再形成する。この処理を集合 V で考えられる全ての 3 点について行うと，最終的に三角ポリゴン S の集合 f_P が生成される。この f_P は互いに重なることのない最適な三角ポリゴンの集合で，地形を表す 3 次元立体を意味する。ここで，f_P の XY 平面への射影が凸包であるとすれば，凸包の境界を構成する点の個数を k_b として，$2N_E-2-k_b$ 個の三角形と $3N_E-3-k_b$ 個の辺が生成される。

ここで扱う地形データは前節で扱ったほ場でのフライト試験によるもので，データ数は 507 点であった。図 3.7 に測量地点の分布を示す。また，この地形データの点群から，上述の方法で三角ポリゴンの集合を図 3.8 のように生成した。507 の測量点をもとに 981 個の三角形で試験区内部を分割した。図 3.7 を見ると，測量点の位置が不規則であり，その結果，図 3.8 で示した三角形ポリゴンの面積にもばらつきが生じた。これは航空機ベース測量の特徴であり，特に本研究のように一軸レーザを用いた場合，測量点がランダムに散乱する。このような地形を表す空間データを扱う場合，地形が平坦な部分は比較的少ないデータで 3 次元形状を表現できる。つまり，平坦な部分のデータ密度が高ければ，マップ生成に無駄なデータが存在することになる。後述するアルゴリズムはそのような形状変化に影響の少ない点を検索し，削除できる方法である。

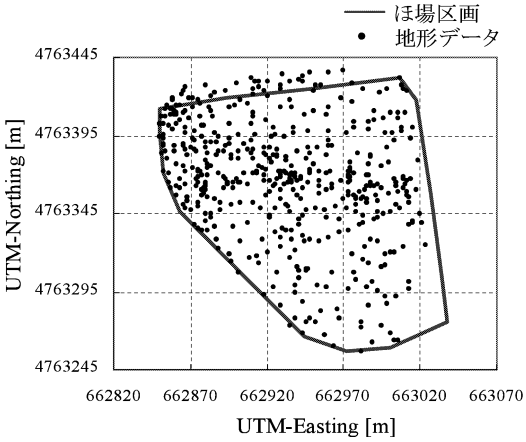


図 3.7　地形データの分布

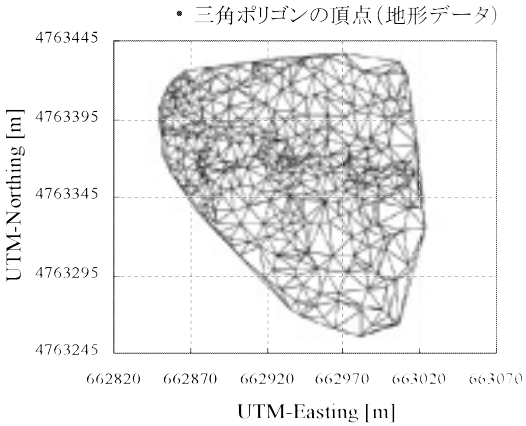


図 3.8　三角ポリゴンの自動生成

b．簡略化アルゴリズム

前章で得られた三角ポリゴンを用いて，測量点のデータ数削減を行った。全地形データからある 2 点を削除し，その形状変化を新たに追加する 1 点で補うことを考える。ただし，前節で述べたように，生成した三角ポリゴンの集合 f_P の XY 平面への射影は凸包であり，凸包の境界は k_b 個の測量点から構成される。図 3.9 に，地

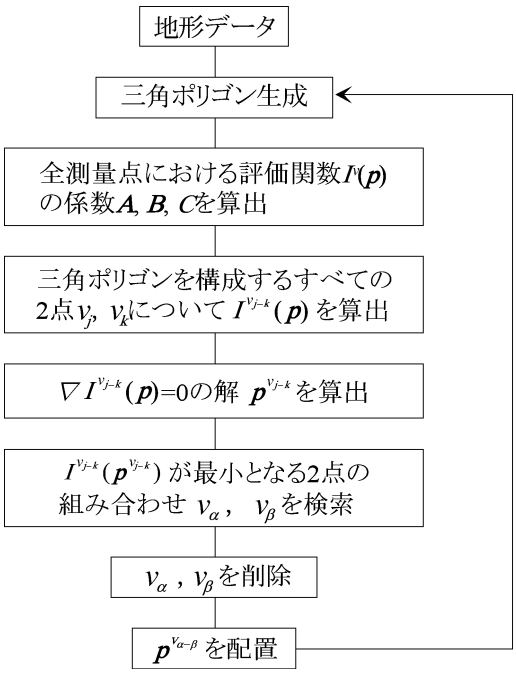


図 3.9　地形データ簡略化アルゴリズムの流れ図

形データ簡略化処理の流れを示す。図 3.10 のように，1 つの地形データ $\boldsymbol{v}_i$ を頂点とする三角ポリゴンを S_τ とする。S_τ の単位法線ベクトルを $\boldsymbol{n}_\tau=[n_{x(\tau)}\quad n_{y(\tau)}\quad n_{z(\tau)}]^{\mathrm{T}}$ とし，S_τ から原点への距離を d_τ とすれば，S_τ 平面上の点 $\boldsymbol{\chi}$ は $\boldsymbol{n}_\tau{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\chi}=d_\tau$ を満たす。すなわち，任意の点 $\boldsymbol{p}\in E^3$ から S_τ への距離は $|\boldsymbol{n}_\tau{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p}-d_\tau|$ となる。ここで，$\boldsymbol{v}_i$ について式 (3.7) のように $\boldsymbol{p}$ をパラメータとした 2 次形式のスカラー場 $I^{v_i}(\boldsymbol{p})$ を割り当てる。これは $\boldsymbol{p}$ から S_τ までの距離の二乗和を示す。

$$\begin{aligned} I^{v_i}(\boldsymbol{p}) &= \sum_\tau \bar{S}_\tau(\boldsymbol{n}_\tau{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p}-d_\tau)^2 \\ &= \boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{p}-2\boldsymbol{B}_i{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p}+C \end{aligned} \tag{3.7}$$

ただし，式 (3.7) の $\bar{S}_\tau$ は S_τ の面積を示し，ポリゴン面積のばらつきを考慮するための重みである。また，式 (3.8) のように $\boldsymbol{A}_i$ は 3×3 の対称行列，$\boldsymbol{B}_i$ は 3 次元列ベクトル，C_i はスカラーである。

$$\boldsymbol{A}_i=\begin{bmatrix} \sum_\tau \bar{S}_\tau n_{x(\tau)}{}^2 & \sum_\tau \bar{S}_\tau n_{x(\tau)}n_{y(\tau)} & \sum_\tau \bar{S}_\tau n_{z(\tau)}n_{x(\tau)} \\ \sum_\tau \bar{S}_\tau n_{x(\tau)}n_{y(\tau)} & \sum_\tau \bar{S}_\tau n_{y(\tau)}{}^2 & \sum_\tau \bar{S}_\tau n_{y(\tau)}n_{z(\tau)} \\ \sum_\tau \bar{S}_\tau n_{z(\tau)}n_{x(\tau)} & \sum_\tau \bar{S}_\tau n_{y(\tau)}n_{z(\tau)} & \sum_\tau \bar{S}_\tau n_{z(\tau)}{}^2 \end{bmatrix}$$

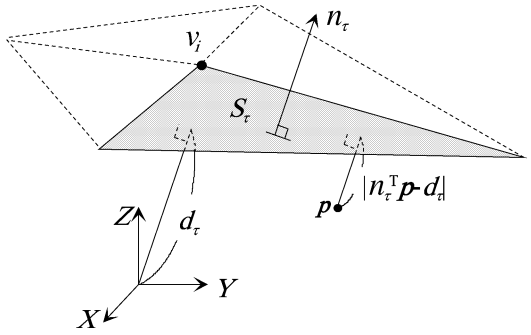
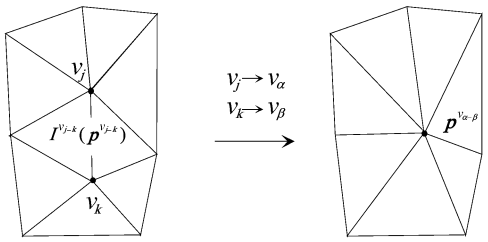


図 3.10　ポリゴン S_τ 平面と空間内任意点 p の関係



(a)　**誤差関数の割当て**　　(b)　**頂点の更新**

図 3.11　誤差関数の割当てと頂点の更新方法

$$\boldsymbol{B}_i=\begin{bmatrix} \sum_\tau \bar{S}_\tau d_\tau n_{x(\tau)} \\ \sum_\tau \bar{S}_\tau d_\tau n_{y(\tau)} \\ \sum_\tau \bar{S}_\tau d_\tau n_{z(\tau)} \end{bmatrix}$$

$$C_i=\sum_\tau \bar{S}_\tau d_\tau{}^2 \tag{3.8}$$

さらに，図 3.11 (a) のように，$2N_E-2-k_b$ 個の三角ポリゴンのうち，ある 1 つの三角ポリゴン S_τ を構成する 2 つの頂点 $\boldsymbol{v}_j$，$\boldsymbol{v}_k$ における I^{v_j}，I^{v_k} の和を $I^{v_{j-k}}$ とし，式 (3.9) のように表す。

$$\begin{aligned} I^{v_{j-k}}(\boldsymbol{p}) &= I^{v_j}(\boldsymbol{p})+I^{v_k}(\boldsymbol{p}) \\ &= \boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}_j+\boldsymbol{A}_k)\boldsymbol{p}-2(\boldsymbol{B}_j+\boldsymbol{B}_k)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p}+C_j+C_k \\ &\textit{subject to}\quad \boldsymbol{v}_j,\ \boldsymbol{v}_k\in V\quad \boldsymbol{v}_j,\ \boldsymbol{v}_k\in S_\tau \\ &(j-k)\neq 0\quad 1\le j,\ k\le N_E\quad 1\le\tau\le 2N_E-2-k_b \end{aligned} \tag{3.9}$$

この計算は，生成した三角ポリゴンの辺の個数である $3N-3-k_b$ 回行う。式 (3.9) の $I^{v_{j-k}}$ は $\boldsymbol{p}$ をパラメータとして，$\boldsymbol{v}_j$ 及び $\boldsymbol{v}_k$ を頂点とする全ての三角ポリゴンからの誤差関数とみな

せる。次に，式 (3.10) のように $I^{v_j-k}(\boldsymbol{p})$ の勾配 $\nabla I^{v_j-k}(\boldsymbol{p})$ をとり，その解 $\boldsymbol{p}^{v_j-k}$ を算出する（式 (3.11)）。

$$\nabla I^{v_j-k}(\boldsymbol{p})=2(\boldsymbol{A}_j+\boldsymbol{A}_k)p-2(\boldsymbol{B}_j+\boldsymbol{B}_k) \quad (3.10)$$

$$\nabla I^{v_j-k}(\boldsymbol{p})=0 \rightarrow \boldsymbol{p}^{v_j-k}=\boldsymbol{p} \quad (3.11)$$

式 (3.11) の $\boldsymbol{p}^{v_j-k}$ は，$\boldsymbol{v}_j$，$\boldsymbol{v}_k$ 周りの三角ポリゴンに対する距離の二乗和が最小となる点を意味する。この $I^{v_j-k}(p^{v_j-k})$ を式 (3.12) のように，全ての頂点の組み合わせについて算出し，$I^{v_j-k}(\boldsymbol{p}^{v_j-k})$ が最小となる 2 点 $\boldsymbol{v}_\alpha$，$\boldsymbol{v}_\beta$ を検索する。

$$\boldsymbol{v}_\alpha,\ \boldsymbol{v}_\beta=\{\boldsymbol{v}_j,\ \boldsymbol{v}_k|\min_{j,k}\{I^{v_j-k}(\boldsymbol{p}^{v_j-k})\}\} \quad (3.12)$$

最後に図 3.11 (b) のように $\boldsymbol{v}_\alpha$，$\boldsymbol{v}_\beta$ を削除し，新たに $\boldsymbol{p}^{v\alpha-\beta}$ を加えた N_E-1 個の点群から三角ポリゴンの集合を再構成する。これは，形状変化を抑えつつデータ数を 1 点減少させたことになる。形状への影響が最も少ない 2 点を削除し，それによる形状変化を新たに設置した 1 点で補うことで，データを簡略化することができる。この操作を繰り返すことで形状への影響が少ないものから連続的にデータ数を削減できる。

c．簡略化による誤差の評価

ヘリコプタベース測量システムで得られた 507 点の地形データを用いて，上述のデータ簡略化処理を行った。データ削減による三角ポリゴンの変化の様子を図 3.12 に示す。これは，1 点ずつデータを削減したときの，50 点削減ごとの形状変化を表したものである。507 点で構成される地形マップと 107 点のものを比較すると，三角ポリゴンの面積のばらつきが少なく，データが削減されていることが確認できる。データ削減過程で必ずしも面積の小さいポリゴンの頂点から削除されるわけではなく，削減される順は形状の複雑さも影響する。本手法は，三角形の面積が同じ場合，形状の複雑さが低い部分のデータから処理される。つまり，形状が複雑な部分のデータ密度は保たれ，平坦な部分は大きな面積の三角形でカバーされる。

さらに，データ削減によって生じる形状誤差を評価した。本研究では，得られた生の測量データ 507 点で構成される地形からの形状誤差 e_M を以下のように定義した。

$$e_M=\frac{1}{D}\iint_D|f_P^M(X,\ Y)-f_P^0(X,\ Y)|dXdY \quad (3.13)$$

ここに，D は試験区の面積であり，図 3.8 で示した凸包の内部領域の面積とした。また，上式 f_P の添え字 M 及び 0 は減少したデータ数を示す。つまり，生データで構成される地形 $f_P^0(X, Y)$ から M 個のデータを削減してできる地形 $f_P^M(X, Y)$ の体積変化を試験区領域で正規化した値を形状誤差とした。データ削減数による形状誤差の推移を図 3.13 に示す。生データの 79％である 400 点を削減しても生じる誤差は 0.12 m 以下であった。これは地形データ処理や形状表現などに十分許容できる誤差である。ここからさらにデータを削減すると，削減数 410 点（誤差 0.13 m）を境にして，誤差が急激に増加した。本研究で扱った試験区の地形データを本手法で簡略化する場合，削減数 410 点までが有効範囲であると判断できる。さらに，比較のため生データからランダムに 400 点削除した場合とラスタ形式に変換した場合の形状変化を調べた。ラスタ変換は，試験区を XY 平面について分解能 14.5 m のメッシュで分割し，生データを格子状に再配置した。ここで，地形データの X，Y 座標はメッシュの中央位置とし，高度を示す Z 座標はメッシュ内に存在する生データの平均とした。このようにして生成したラスタデータは，図 3.8 で示した凸包の内部領域に 110 点存在した。それぞれの地形データの $f_P^0(X, Y)$ からの形状誤差は，ランダムに削除した場合 1.35 m となり，ラスタ変換した場合は 0.88 m であった。従って，本手法は既存のデータ削減法と比較して，誤差を大幅に抑えることができ，極めて有効なデータ簡略化手法といえる。

D．地形データと画像データの統合アルゴリズム

図 3.14 に，地形データと画像データの統合アルゴリズムを流れ図として示す。ここでは，レーザ距離計により取得した全地形データ V 及び 1 枚の画像における 1 つのピクセル $(u,\ v)$ につ

• 三角ポリゴンの頂点（地形データ）

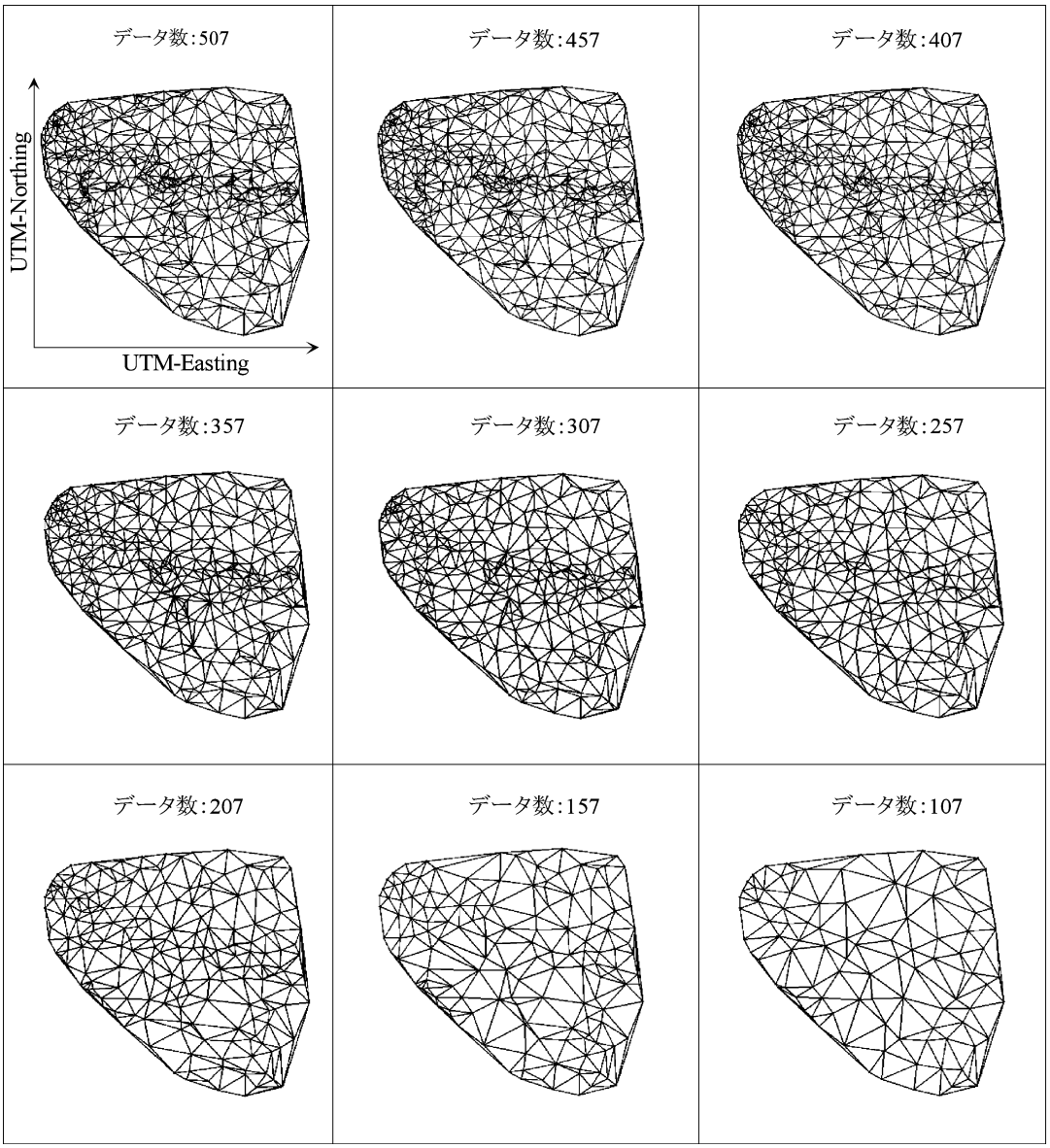


図 3.12　地形データ簡略化による形状変化の推移

いて考える。図 3.15 のようにイメージングセンサの絶対位置 $\boldsymbol{\eta}$，姿勢角及び画像座標系におけるピクセル位置$(u,\ v)$から，そのピクセルとイメージングセンサの光学中心を結ぶ直線を決定できる。この直線をピクセル投影直線 L とし，その方向余弦をピクセル投影ベクトル $\boldsymbol{d}_L$ とする。まず，全 $\boldsymbol{v}_i$ それぞれについて以下の式を満たすような $\boldsymbol{\zeta}_i$ を算出する。

$$(\boldsymbol{\zeta}_i - \boldsymbol{v}_i)\cdot \boldsymbol{d}_L = 0,\ subject\ to\ \boldsymbol{\zeta}_i \in L \qquad (3.14)$$

また，全ての $\boldsymbol{\zeta}_i$ から以下の式に従って $\boldsymbol{\zeta}_c$ を決定する。

$$\xi_c = \xi_i,\ subject\ to\ \min_{i=1}^{N_E}(\|\boldsymbol{\zeta}_i - \boldsymbol{v}_i\|) \qquad (3.15)$$

すると，式 (3.15) は，L から最も近い $\boldsymbol{v}_i$ から L に下ろした垂線の足が $\boldsymbol{\zeta}_c$ となることを意味

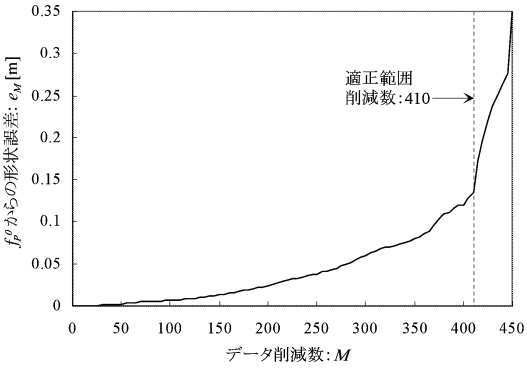


図 3.13　データ削減による形状誤差の推移

する。次に，v_i の中から ξ_c についての近傍 n_c 点を式 (3.16) のように抽出し，これを v_c を要素とする V の部分集合 V_c と定義する。

$$\boldsymbol{v}_{c(1)}=\boldsymbol{v}_i,\ subject\ to\ \min_{i=1}^{N_E}\|\boldsymbol{\xi}_c^*-\boldsymbol{v}_i^*\|$$

$$\boldsymbol{v}_{c(j)}=\boldsymbol{v}_i,\ subject\ to\ \min_{i=1}^{N_E}\|\boldsymbol{\xi}_c^*-\boldsymbol{v}_i^*\|$$

$$\prod_{k=1}^{j-1}(\boldsymbol{v}_{c(j)}-\boldsymbol{v}_{c(k)})\neq 0\quad 2\leq j\leq n_c$$

$$V_c=\{\boldsymbol{v}_c|\boldsymbol{v}_{c(j)}\in V,\ 1\leq j\leq n_c\}\qquad(3.16)$$

ここに，$\boldsymbol{v}_i^*$，$\boldsymbol{\xi}_c^*$ はそれぞれ $\boldsymbol{v}_i$，$\boldsymbol{\xi}_c$ の XY 平面への射影を意味する。なお，n_c は入力定数とする。次にパラメータ s を導入し，L 上の点への位置ベクトル $\boldsymbol{\Gamma}(s)$を以下のように表す。

$$\boldsymbol{\Gamma}(s)=\boldsymbol{d}_L\cdot s+\boldsymbol{\eta}\qquad(3.17)$$

$\boldsymbol{\Gamma}(s)$を XY 平面への射影 $\boldsymbol{\Gamma}^*(s)$と Z 方向成分 $\boldsymbol{\Gamma}^Z(s)$に分解すると，抽出した V_c による IDW の補間曲面 $F_{IDW}(s)$は以下のように表される。

$$F_{IDW}(s)=\frac{\sum_{j=1}^{n_c}\left\{\dfrac{v_{c(j)}^Z}{\|\boldsymbol{\Gamma}^*(s)-\boldsymbol{v}_{c(j)}^*\|^2}\right\}}{\sum_{j=1}^{n_c}\left\{\dfrac{1}{\|\boldsymbol{\Gamma}^*(s)-\boldsymbol{v}_{c(j)}^*\|^2}\right\}}\qquad(3.18)$$

ここに，$v_{c(j)}^Z$ は $\boldsymbol{v}_{c(j)}$ の Z 方向成分であり，$\boldsymbol{v}_{c(j)}^*$ は $\boldsymbol{v}_{c(j)}$ の XY 平面への射影である。上式の $F_{IDW}(s)$は水平位置 $\boldsymbol{\Gamma}^*(s)$おいて推定される地表高度を示す。さらに，$I_M(s)$を式 (3.19) のように定義し，$I_M(s)=0$ となる $s=s_M$ を求めることでそのピクセルが投影される点 $\boldsymbol{\Gamma}(s_M)$を決定できる。

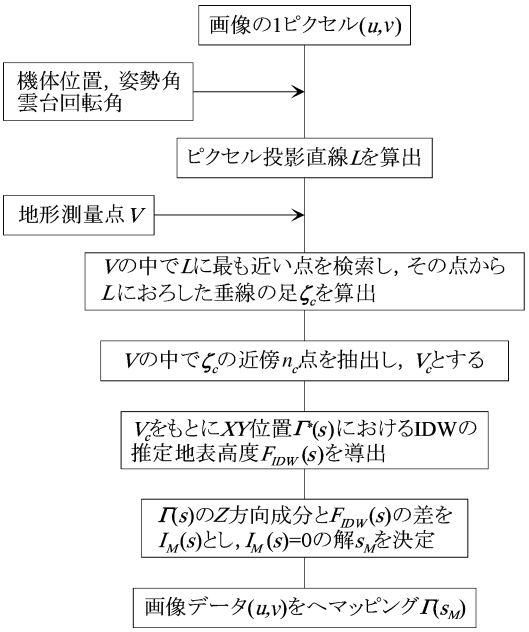


図 3.14　3 次元画像マッピングアルゴリズムの流れ図

$$I_M(s)=\Gamma^Z(s)-F_{IDW}(s)\qquad(3.19)$$

計測方法から考えるとピクセル投影ベクトル $\boldsymbol{d}_L$ の Z 方向成分は負，つまり下向きとなるため $I_M(s)=0$ の解は $s>0$ の条件を考慮した数値解として求められる。以上の方法により，機体の位置や姿勢角及び地形データをもとに，画像データをピクセルごとに自動的に 3 次元空間へマッピングできる。

E．3 次元 GIS マップの精度評価とマップ生成

上述の方法を用いて 3 次元空間マッピングの空間精度評価を行った。精度評価用参照データとして地表面にマーカを設置し，RTK-GPS を用いて正確な 3 次元絶対位置を計測した。図 3.16 (a) はマーカ上空約 50 m を通過させて取得した原画像である。また，図 3.16 (b) は画像中のマーカ位置を上述の方法で絶対座標系へ変換した結果である。画像から推定されるマーカ位置が実際のマーカ位置とほぼ一致しており，開発した方法が機能していることが分かる。同様に，その他 4 枚のマーカ画像を用いてマッピングの 3 次元空間誤差を算出した (表 3.2)。全ての画像において 3 次元の空間精度は 41 cm

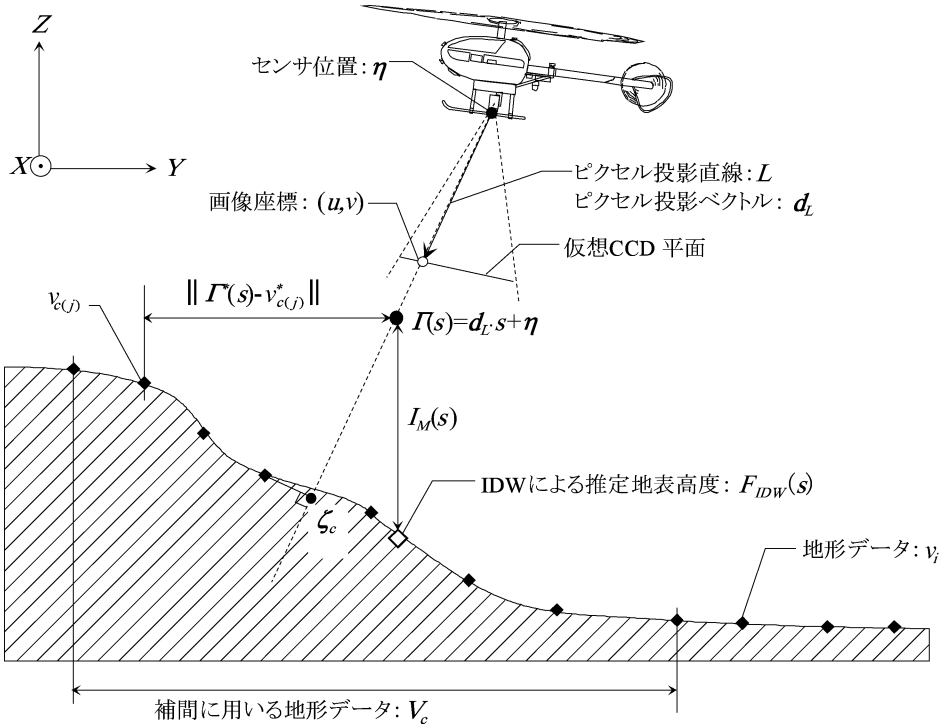
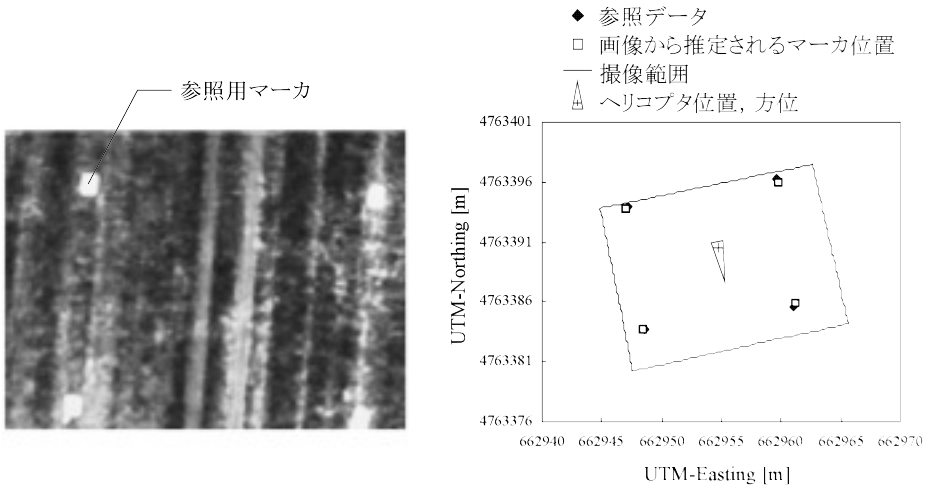


図 3.15　3 次元画像マッピングアルゴリズム



(a)　マーカ撮影画像（画像番号 14）　　(b)　3 次元マッピング結果

図 3.16　マーカ撮影画像と 3 次元マッピング結果

以下であった。ほ場の地形によらず 41 cm の誤差で作物情報をマッピングでき，ほ場マップ生成には十分な精度である。

さらに，開発したシステムを用いて実際のほ場マップを作成した。画像データは本章Ｂ節で述べた地形データ収集と同時に取得したものである。ヘリコプタをほ場全体に飛行させて 862 枚の画像を得た。取得した画像から NDVI を算

表 3.2　3 次元画像マッピングの空間誤差と機体パラメータ

画像番号	平均誤差 [m]	高度 [m]	ロール角 [deg]	ピッチ角 [deg]	ヨー角 [deg]	パン方向回転角 [deg]	チルト方向回転角 [deg]	マーカ数
14	0.35	49.19	0.33	−0.16	169.17	−4.56	0.72	4
15	0.34	47.52	3.84	2.37	169.00	−4.49	0.78	2
16	0.35	45.93	1.75	1.63	170.17	−4.15	−2.22	3
17	0.41	41.68	3.71	1.50	172.40	−4.15	−2.88	4
18	0.40	41.80	3.53	2.52	172.58	−4.15	−2.82	4

出し，3 次元マップを生成した。図 3.17 にその NDVI マップを示す。ここでは，得られた地形データ全て，つまり 1,371 点を用いたが，本章 C 節のアルゴリズムによって簡略化した地形データを使用することもできる。図 3.17 (a) は従来の 2 次元マップであり，図 3.17 (b) は 3 次元空間つまり地形を考慮した作物情報マップである。飛行高度は約 30 m と設定したが，取得した画像はそれぞれ異なる高度で取得したため空間分解能にばらつきが生じた。しかし，全画像において空間分解能は最大でも 2.6 cm であった。これは作物個体を認識することもできる分解能である。

F．ま と め

本章では，これまで開発したシステムにレーザ距離計を組み込み，地形情報を取得できるものとした。前章では，センシングする場所を傾斜や凹凸が無く，水平なほ場に限定しており，その地表面高度も場所ごとにキャリブレーションを必要としていた。しかし，ここで開発したシステムは地形データも同時に得られることから，水平面に限らず，どのようなほ場でも対応できる汎用的なものとなった。レーザ距離計による地形測量では，約 10 m の高低差があるほ場を 9 cm の精度で測量できた。また，試験ほ場の面積は 23,000 m² であり，作業時間は約 35 分であった。従来法として扱ったトータルステーションによる地上測量では 3 時間以上要したことを考えると，開発した地形測量システムは高精度，高能率であり，実用上有効なシステムである。また，本システムで得られた地形データの 1 つの処理法として，精度を維持しながらデータ数を削減できるアルゴリズムについて説明した。ここでは，全地形データ 507 点からデータ数を削減し，形状変化を調べた。その結果，生データの 79%である 400 点を削減しても，形状誤差を 12 cm に抑えることができた。

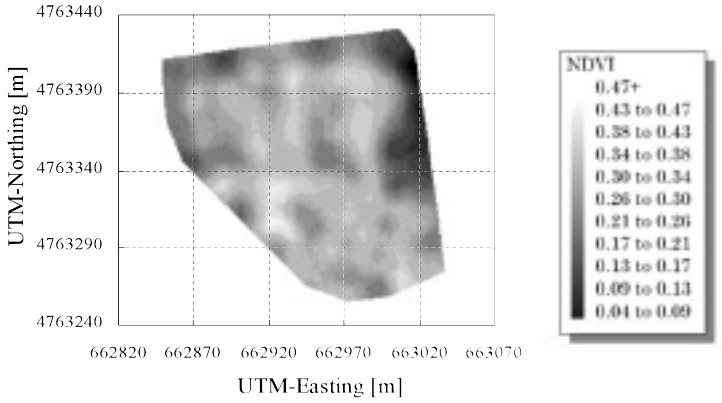
さらに，ヘリコプタから得られる地形データと画像データを統合し，3 次元 GIS マップを生成できるアルゴリズムを開発した。画像データを地形データに貼り合わせ，その空間精度を調べた結果，41 cm の誤差を確認した。ほ場地形によらず，41 cm でのマッピングは PF において十分な精度である。今後，衛星や航空機からの情報で細密な地形図が整備されれば，ヘリコプタ画像との融合に利用でき，ここで開発したアルゴリズムにそのまま適用できる。

第 II 章及び第 III 章では，産業用無人ヘリコプタをベースとしたリモートセンシングシステムを構成し，GIS マップ生成のための方法論について述べた。次章では，開発したシステムのアプリケーションとして，作物の具体的な生育推定に焦点を当て，その実用性を示す。

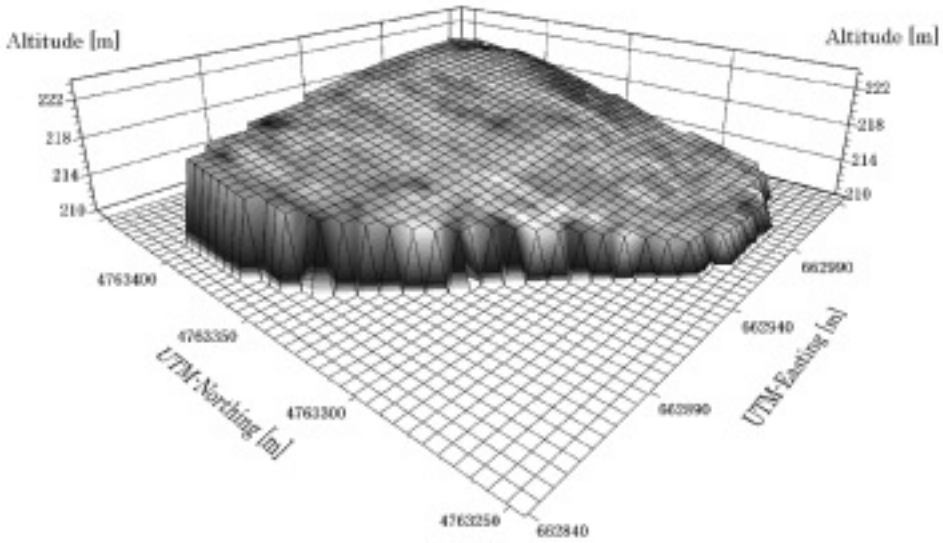
IV．マルチスペクトルイメージングセンサによる小麦の生育診断

A．は じ め に

前章までに，産業用無人ヘリコプタをベースとしたリモートセンシングの構成や，マップ生成の空間精度について説明した。本章では，開発したシステムを用いた作物の生育推定について議論する。これまで，生育状態のリモートセンシングに関する研究は，多くの作物を対象にして行われてきた[84)85)86)]。本研究ではセンシング対象を小麦とし，生育情報として穂水分と SPAD 値の推定を行った。これまでに示したほ場マップでは，生育情報として NDVI を扱ったが，これはマルチスペクトル画像の濃度値をそ



(a)　2 次元マップ



(b)　3 次元マップ

図 3.17　NDVI の 3 次元マップ

のまま用いて算出したものであった。しかし，生成されたほ場マップは複数の画像で構成されており，得られた濃度値をそのまま用いることは適切とはいえない。供試イメージングセンサで得られた画像の濃度値は撮影時の環境光量やイメージングセンサの露光時間，CCD ゲインによってコントロールされる。つまり，これらのパラメータで画像を正規化し，作物の反射特性を示す絶対量を得る必要がある。本システムでは画像取得と同時に環境光量を AI センサによって計測できるため，環境光量の影響を補正し，センサのパラメータで画像を正規化することで反射率を導出した。しかし，このパラメータの設定を誤れば，極端に高濃度あるいは低濃度の画像となり，CCD 素子感度の線形範囲から逸脱し，反射光量の計測が不可能となる。ここではセンシング開始直前に CCD ゲインを自動調整し，さらに，作業中は露光時間を制御できるようシステムを改良した。また，センシング対象を小麦としたことから，ほ場内に存在する

防除畝を画像から除去する必要があった。防除畝は人為的に作付けされていない領域であるため，生育状態推定には無効なデータとなる[87]。センシング時に防除畝を避けて飛行することは現実的ではないため，画像から防除畝領域を自動的に除去できるアルゴリズムを考案する必要があった。さらに，画像から得られる正規化反射率により生育状態を推定し，その推定精度を評価した。

本章C節までは，複数の画像を貼り合わせることでほ場全体の情報をセンシングする方法をとった。本システムは，高分解能で高精度なマップが生成でき，他のプラットフォームを上回る性能を持つ。ここでは，リモートセンシング作業のさらなる効率化を目指した。イメージングセンサに広角レンズを装着し，可動式雲台を利用することで，低空からでも 1 枚の画像で広域をカバーできるよう工夫した。これまで用いた狭角レンズではレンズ歪みは無視できるほど小さかったが，広角レンズの場合，画像中にはっきりとした歪みが確認できたため，画像データの座標変換の前処理として，レンズ歪みの補正を行った。また，この撮影方法による画像から生育状態の推定精度を評価した。

B．生育推定のための画像処理法

a．正規化反射率の導出

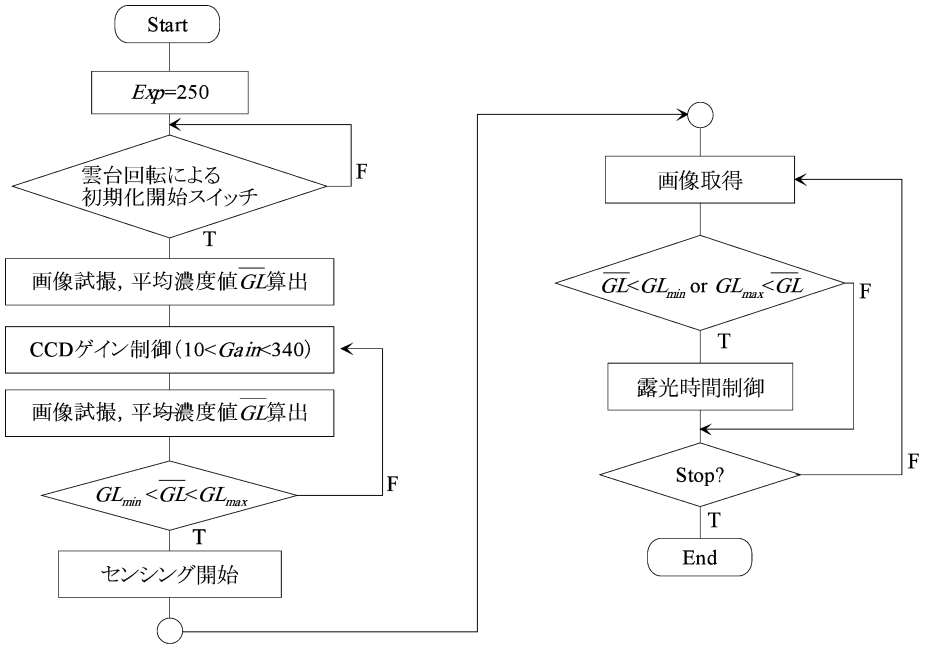
本システムのように屋外で画像を得る場合，環境光変動の影響を無視できない。この環境光量は，AI センサを用いて取得した。第II章で述べたとおり，AI センサは供試イメージングセンサの各フィルタ特性とほぼ等しいスペクトル領域の光量を測定できる。さらに，イメージングセンサの制御項目である露光時間（*Exp*），CCD ゲイン（*Gain*）を考慮し，式（4.1）のように，正規化のための補正式を導出した。

$$Ref = \frac{GL + C_0}{(AI + C_1)(Exp + C_2)(e^{C_3 Gain + C_4} + C_5)} \tag{4.1}$$

ここに，C_0〜C_5 はイメージングセンサの特性を示す係数であり，*Ref* は正規化反射率である。*AI* は AI センサの計測値である。C_0〜C_5 の決定には葉色カラースケールの撮影によるキャリブレーションを行った。*AI* の変動を生じさせるため，屋外で朝から夕方まで葉色カラースケールを一定時間ごとに撮影し，一度の撮影で *Exp*，*Gain* を変化させた。このようにして得られたデータから非線形最小二乗法により係数を決定した。その結果，算出された正規化反射率の R. M. S. 誤差は Red，Green，NIR 画像それぞれ 0.036，0.053，0.048 であった。

b．露光時間，CCD ゲインの制御

供試イメージングセンサは露光時間及び CCD ゲインをコンピュータから RS-232 C シリアル通信リンクを介して制御することができる。本研究では，センシング中にこれらのパラメータを動的に制御し，広いダイナミックレンジを持つシステムの開発を行った。考案したセンサパラメータ制御は 2 つの段階で行われ，変化する光環境下で最適な画像濃度を維持する。まず，センシング開始前に取得した作物画像から，その光環境や作物に最適な CCD ゲインを設定する。次に，設定した CCD ゲインを用いてセンシング作業を開始し，画像取得時に動的にパラメータ制御を行う。パラメータ制御の流れを図 4.1 に示す。センシング作業前に各チャンネルの露光時間（*Exp*）を可変範囲の中間値に設定する。第II章で述べたとおり，無人ヘリコプタにはカメラ取り付け用の可動式雲台が装備されており，イメージングセンサをパン方向，チルト方向に制御できる。雲台の回転角はロータリエンコーダによって計測できるため，この回転角をカメラ初期化開始のスイッチに利用した。センシング作業開始前にヘリコプタを作物の上空でホバリングさせ，雲台をチルト方向に回転させることで，カメラを下向きにする。カメラが下向きになると初期化を始める。ホバリング状態で作物画像を試撮し，全ピクセルの平均濃度値 $\overline{GL}$ をもとに，各バンドの CCD ゲイン（*Gain*）を最適値に決定する。これにより，その後の処理に活用できる画像濃度（$GL_{\min} < \overline{GL} < GL_{\max}$）を得る。次に，作業中もパラメータを制御し，濃度値を一定に保つ必要がある。露光時間と濃度値の変化は線形関係にあるが，CCD ゲインについて非線形変化となる。また，供試イメージングセンサは各バンドの CCD ゲ



(a)　CCD ゲインの初期化　　(b)　センシング中の露光時間制御

図 4.1　露光時間，CCD ゲイン制御の流れ図

インが相互に干渉し合う特性を持つため，センシング中にリアルタイムで CCD ゲインを制御することは困難となる。そこで，センシング中は露光時間のみを制御することにした。センシング中に前回取得した画像の露光時間と全ピクセルの平均濃度値をフィードバックさせて，平均濃度値が一定となるように露光時間を制御する。これにより，周辺環境光量や作物によらず，常に安定した画像が確実に得られる。

c．防除畝の認識・除去

小麦ほ場で取得した画像には図 4.2 に示すように防除畝領域が混入する。防除畝が画像に含まれていると，この領域を植生の無い領域と認識し，生育推定において大きな誤差となる。そこで，ヘリコプタ画像中の任意の位置に撮影される防除畝領域を自動識別・除去できるアルゴリズムを開発した。画像処理の流れを図 4.3(a) に示す。まず，処理速度を考慮し，画像を 1/5 に縮退したものを $F_R(u, v)$とする（図 4.3 (b)）。$F_R(u, v)$は画像座標(u, v)における濃度値を示す。次に，ガウスフィルタによる平滑化処理を行う。式 (4.2) に示す 2 次元ガウス関数 $G(i, j)$を式 (4.3) のように畳み込むことによって平滑化画像 $F_S(u, v)$を得る。これにより，防除畝領域を残しながら，作付け領域の土壌部と作物部の輝度偏差を平滑化できる。

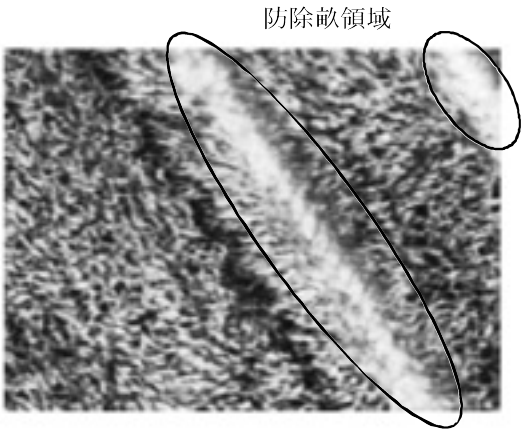
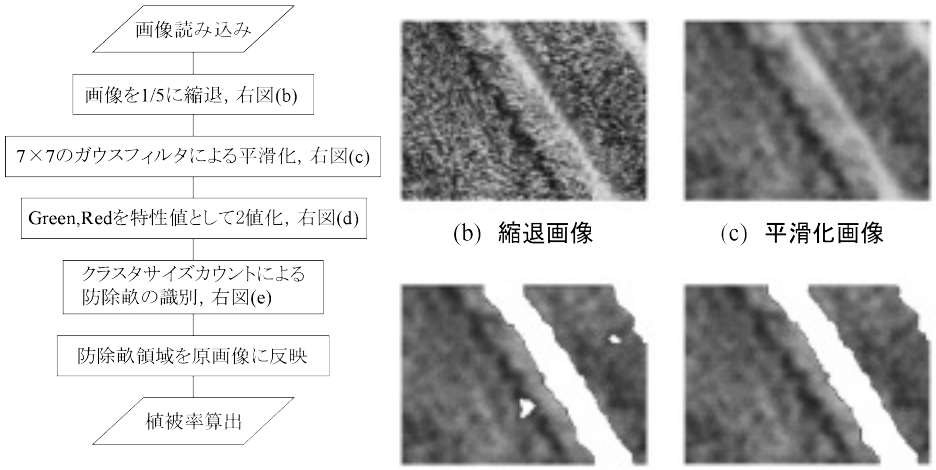


図 4.2　防除畝を含むヘリコプタ画像

$$G(i, j)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left[-\frac{i^2+j^2}{2\sigma^2}\right] \qquad (4.2)$$



(a) 防除畝認識アルゴリズムの流れ図　(b) 縮退画像　(c) 平滑化画像　(d) 2値化画像　(e) 防除畝領域抽出画像

図 4.3　画像処理による防除畝自動認識アルゴリズム

$$F_S(u,\ v)=\frac{\sum_i\sum_j G(i,\ j)F_R(i+u,\ j+v)w(i+u,\ j+v)}{\sum_i\sum_j G(i,\ j)w(i+u,\ j+v)} \tag{4.3}$$

本研究ではガウス関数として分散 1 の標準正規分布を採用した。また，フィルタのカーネルサイズは試行錯誤により 7 × 7 と設定した。つまり，$-3\leq i,\ j\leq 3$ となる。$w(i,\ j)$は式 (4.4) で表され，画像の定義域を示すマスクである。

$$w(i,\ j)=\begin{cases}1：\text{if } F_R(i,\ j) \text{ exists}\\ 0：\text{otherwise}\end{cases} \tag{4.4}$$

式 (4.3) で得られた平滑化画像 $F_S(u,\ v)$を図 4.3 (c) に示す。次に Green の濃度値を特性値として，この平滑化画像の判別分析からしきい値を決定し，図 4.3 (d) のように 2 値化した。2 値化画像には図 4.3 (d) に示すように，土壌領域と認識されたクラスタが生成される。このクラスタサイズを画素カウントして，しきい値 Θ 以上のクラスタを防除畝領域として認識した。なお，しきい値 Θ は経験的に決定したものであるが，飛行高度と防除畝の実際の幅によって画像中の防除畝のサイズが決まるため，ここで設定した Θ は幅 0.75 m の防除畝を飛行高度 20 m から 35 m で撮影した画像に対応したものとなる。この処理によって防除畝領域を除去した画像を図 4.3 (e) に示す。作付け領域に影響を与えずに，防除畝の領域が認識されている。さらに，縮退した画像中の防除畝領域を原画像にマスキングして，防除畝領域を除去した画像を得る。

C．小麦の生育推定

a．実験概要

リモートセンシング試験は 2004 年 7 月 15 日に北海道帯広市の小麦ほ場で行った。ほ場面積は 23,000 m² であり，作付け品種は「ホクシン」であった。ほ場内には生育推定のグランドトゥルースとして，19 点の調査地点を設置した。この調査地点は生育に差異があると判断した場所を選び，各調査地点の SPAD 値と穂水分を測定した。SPAD 値は葉緑素計で計測される値で，作物のクロロフィル含有率と相関があり，生育状態を把握するために有用なものとなる。また，穂水分は小麦の生育の早晩を判断するための指標となる。図 4.4 に試験ほ場の区画と調査地点を示す。ヘリコプタから調査地点の画像を取得し，式 (4.1) により正規化反射率を得た。また，ほ場マップ作成のため，ヘリコプタをほ場の長辺方向に往復飛行させ，ほ場全体の画像を収集した。この作業は 2 回のフライトに分けて行い，機材の準備や途中の給油作業を含めた総作業時間は約 1 時間であった。

b．推定精度及びマップ生成

上述の試験で得られた調査領域の画像とグラ

ンドトゥルースとの関係から重回帰分析によって推定モデルを生成した。画像からは各バンドの正規化反射率 Ref_R，Ref_G，Ref_{NIR} を求め，式（4.5），式(4.6)のように NDVI と GNDVI を算出した。前章までに扱った NDVI は画像の濃度値をそのまま用いたが，ここでは式 (4.5) のように，正規化反射率を用いたものとして再定義した。

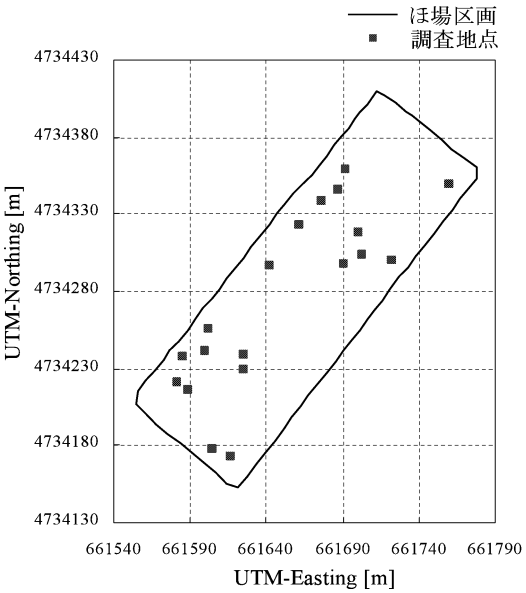


図 4.4　試験ほ場の区画と調査地点

$$X_{NDVI}=\frac{Ref_{NIR}-Ref_R}{Ref_{NIR}+Ref_R} \quad (4.5)$$

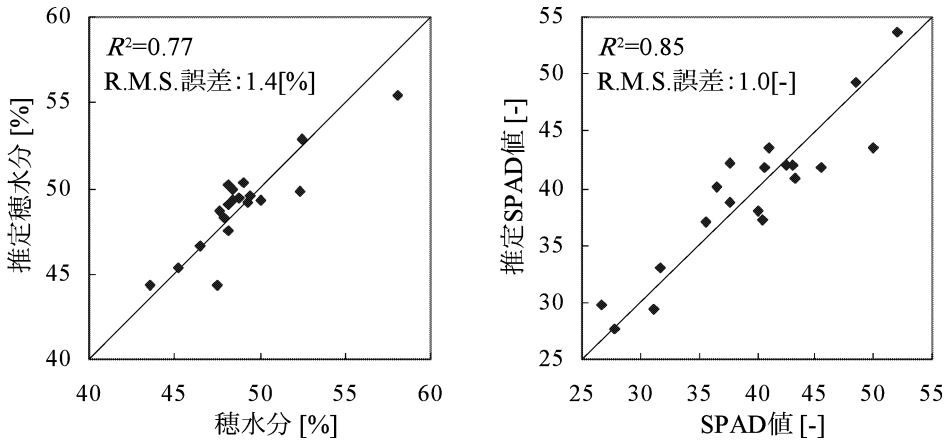
$$X_{GNDVI}=\frac{Ref_{NIR}-Ref_G}{Ref_{NIR}+Ref_G} \quad (4.6)$$

ここに，X_{NDVI}，X_{GNDVI} は NDVI と GNDVI である。この X_{NDVI}，X_{GNDVI} を説明変数とし，グランドトゥルースとの重回帰分析を行った。その結果，穂水分，SPAD 値それぞれの推定モデルは式（4.7），式（4.8）となった。

$$Y_{MOIS}=60.8X_{NDVI}-108.5X_{GNDVI}+8.9 \quad (4.7)$$

$$Y_{SPAD}=116.3X_{NDVI}-184.6X_{GNDVI}-24.6 \quad (4.8)$$

ここに，Y_{MOIS}，Y_{SPAD} は穂水分と SPAD 値の推定値である。図 4.5 (a) に穂水分の推定値と実測値との相関を示す。決定係数は 0.77 であり，R. M. S. 誤差は 1.4%と十分な精度であった。同様に，SPAD 値における推定結果を図 4.5(b) に示す。決定係数は 0.85 であり，R. M. S. 誤差は 1.0 と極めて高精度で推定できることがわかった。このモデルを用いて，ほ場全体の画像から穂水分，SPAD 値を推定し，マップを図 4.6，図 4.7 のように生成した。マップ生成に用いた画像は，前節で示したアルゴリズムにより防除畝領域のデータを除去して用いた。また，地形データもヘリコプタから収集したため，図



(a)　穂水分の推定精度　　(b)　SPAD 値の推定精度

図 4.5　重回帰分析による生育状態の推定結果

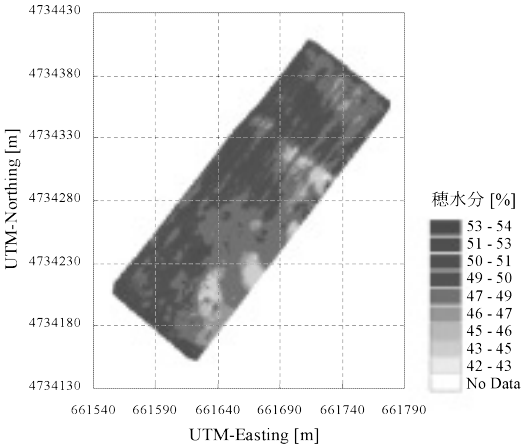


図 4.6　穂水分マップ

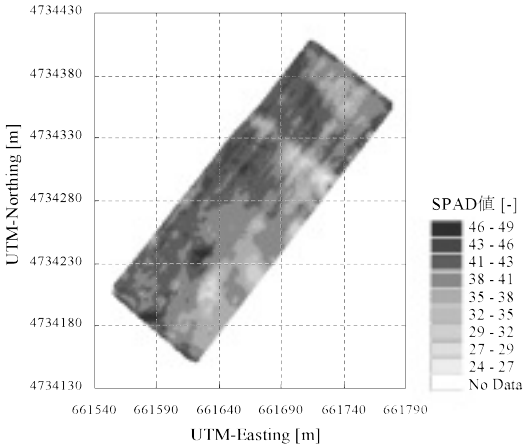


図 4.7　SPAD マップ

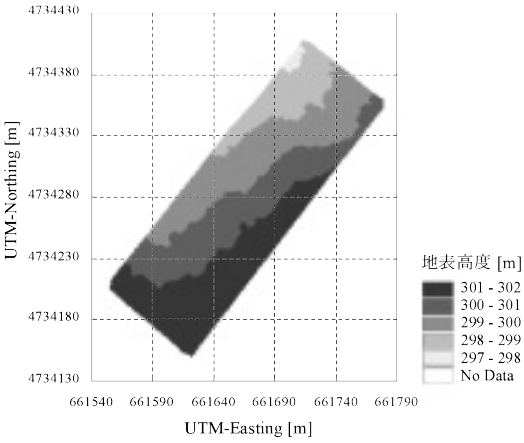


図 4.8　試験ほ場の地形

図 4.9　レンズ歪みを受けた画像

4.6,図 4.7 は前章の 3 次元マッピングアルゴリズムを適用したものである。しかし，そのほ場地形は図 4.8 に示すとおり，23,000 m² の面積で高低差が 5 m 程度と小さかったため，ここでは 2 次元表示とした。このように，マルチスペクトル画像から穂水分，SPAD 値を生育状態として推定でき，マップとしてほ場全体の状態を把握できることから，本システムが実用的なものであるといえる。

D．リモートセンシング作業の効率化

a．広角レンズの適用

これまで使用したイメージングセンサのレンズは焦点距離が 17 mm，対角線画角が 26.51° と極めて狭角のものであった。ここでは，一度の撮影でより広域を撮影することを考え，その直接的な方法として焦点距離 8 mm で，これまで使用したものより広角のレンズを採用した。一般にこのような焦点距離の小さいレンズはレンズ収差により，画像に歪みが生じる。ここで採用したレンズも例外ではなく，図 4.9 のように画像に歪みが確認された。図 4.9 は 1 cm グリッドのチェッカーパターンを 18.5 cm の距離から撮影したものである。従って，採用した広角レンズの特性を内部キャリブレーションによって同定し，画像に幾何学的な補正を加える必要があった。内部キャリブレーションにはレンズ歪みの補正法として広く使われている多項式近似による補正モデル[88] を用いた。この方法において，レンズ歪みの近似モデルは式（4.9）のように表される。

$$u_T = u_D + u_D(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6 + \cdots)$$
$$v_T = v_D + v_D(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6 + \cdots)$$
$$r = \sqrt{u_D{}^2 + v_D{}^2} \qquad (4.9)$$

ここに，(u_D, v_D)は歪みを受けた画像座標であり，(u_T, v_T)は真の画像座標である。ただし，それぞれレンズの光軸と撮像素子が交わる点，つまり，歪み中心を原点としたものである。しかし，光軸と画像中心のオフセットは計測用カメラでは 10 μm 程度であるため，ここでは，画像中心を原点とした。κ_i はレンズ歪み係数であり，レンズ収差の特性を示すものとなる。κ_i は何次まで用いるかは明確な定義はないが，採用したレンズでは κ_2 以降の係数は小さな値となるため，κ_1 までで歪みを表現できると判断した。図 4.10 はレンズ歪み係数を決定する方法を表した模式図である。図中の点は図 4.9 のようなチェッカーパターンを撮影したときの格子点の画像座標であり，レンズ歪みを受けた状態のものである。まず，縦方向と横方法に並ぶ格子点の回帰直線をそれぞれ求める。次に，横方向に並ぶ格子点について，格子点から直線までの距離を $e_{lat(i)}$ とし，縦方向についても同様に，その距離を $e_{lon(j)}$ とする。ここで，レンズ歪み係数 κ_1 を決定するため，式（4.10）のように評価関数 $J(\kappa_1)$を定義する。

$$J(\kappa_1) = \sum_i e_{lat(i)}{}^2 + \sum_j e_{lon(j)}{}^2 \qquad (4.10)$$

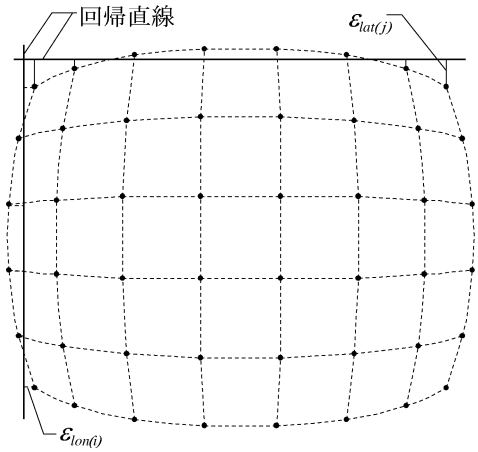
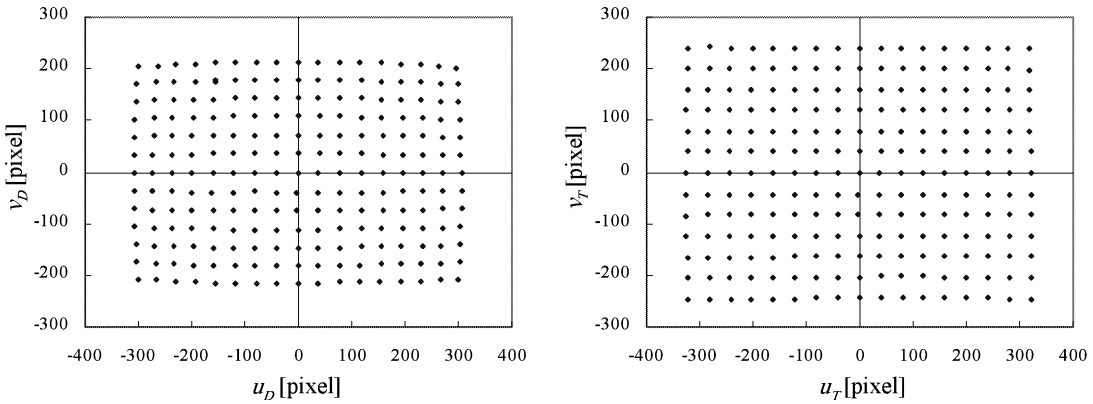


図 4.10　レンズ歪み係数の決定方法

レンズ歪みが適切に補正された場合，撮影された格子点列は直線上に並ぶことは自明であるため，最適な κ_1 は $J(\kappa_1)$が最小になるものとして決定できる。図 4.11（a）は図 4.9 から抽出した格子点の座標であり，このデータを用いてキャリブレーションを行った。その結果，$\kappa_1 = 5.86\times10^{-7}$ を得た。また，このレンズには，式（4.9）で示される放射状の歪みに加え，縦横歪みが含まれる。実際に変換後の格子点座標の間隔は縦横比 1.1 となり，この歪みは縦横比 1 となるように画像座標を調整することで補正した。図 4.11（a）の格子点座標はこの補正モデルにより，図 4.11（b）のように写像される。図 4.9 の画像は図 4.12 となり，格子点が直線状に並ん



(a)　**補正前**　　(b)　**補正後**

図 4.11　レンズ歪みのキャリブレーション結果

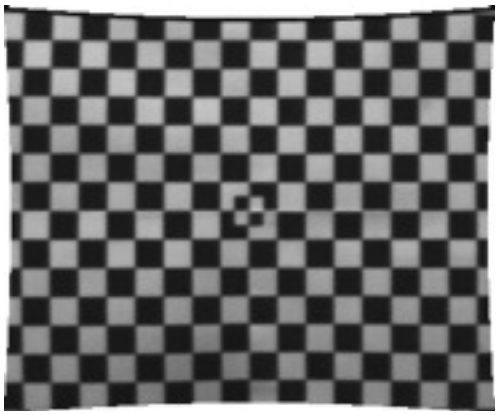


図 4.12　レンズ歪み補正の効果

でいることから，レンズ歪みが補正されていることがわかる。さらに，距離を変化させてこのグリッドを撮影し，画角のキャリブレーションを行った。その結果，対角線画角 55.60° と決定した。従って，飛行高度 30 m から機体直下を撮影した場合，撮影される領域は 36.5 m×27.4 m となる。ここで，式（4.9）において κ_2 までの係数を求めると，$\kappa_2 = 6.02 \times 10^{-14}$ となった。この κ_2 による画像座標の補正量 $u_D \kappa_2 r^4$ は，歪みが最大となる画像端$(u_D,\ v_D) = (320,\ 240)$で 0.5 程度であり，その影響は小さく，無視できるものである。

b．可動式雲台を利用した広域撮影

上述のとおり，広角レンズを使用することで広域を撮影できる。しかし，これまでのような機体直下を撮影する方法では，ほ場全体を飛行させる必要があり，作業効率の劇的な改善には至らない。ここで，可動式雲台を利用し，1 枚

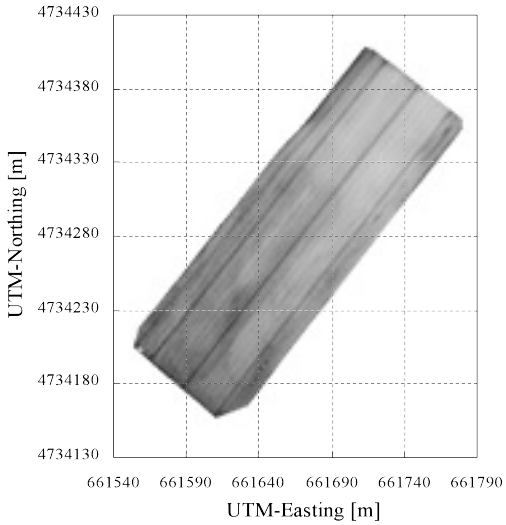


図 4.14　ヘリコプタ画像のほ場マップ

の画像でほ場の大部分をカバーするような撮影を行った。イメージングセンサに俯角を持たせて撮影すれば，低空からでも極めて広域の情報が得られる。この方法で撮影したヘリコプタ画像を図 4.13 に示す。これは，前節で示したリモートセンシングの試験ほ場の画像であり，図 4.14 の赤線が図 4.4 で示したほ場区画を示す。いずれもほ場南側から長辺方向に撮影したものである。撮影範囲は極めて広域であり，2 枚の画像でほ場全体をカバーしていることがわかる。この 2 枚の画像を地表面へマッピングし，絶対座標系で組み合わせると図 4.14 のようなマップが生成できる。また，センシング方法がこれまでの機体直下の撮影と異なるが，このようにして得られた画像も前章のアルゴリズムを

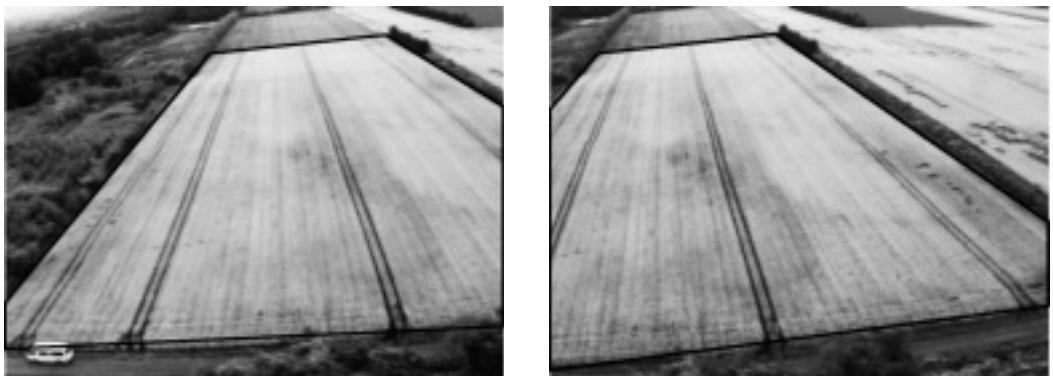


図 4.13　可動式雲台を利用した低空からの広域撮影

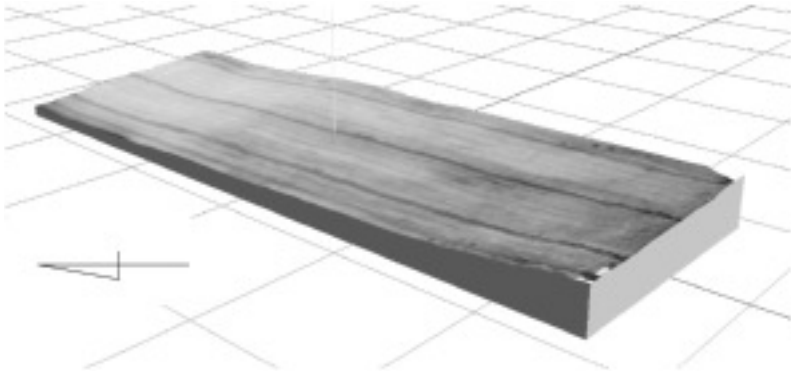
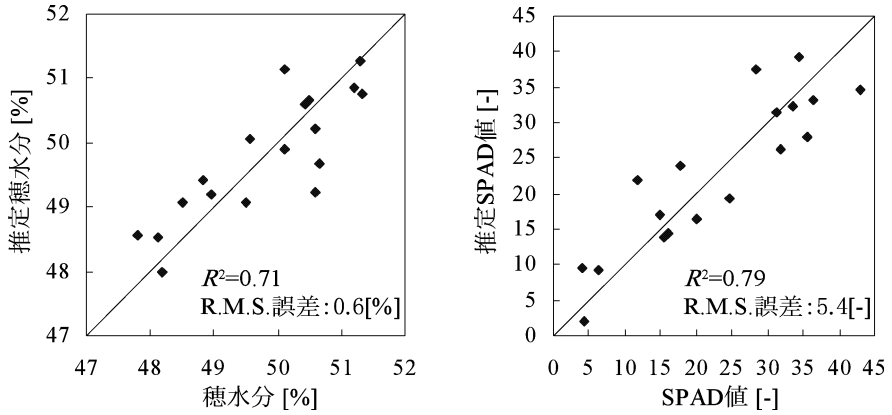


図 4.15　ほ場マップの 3 次元表示



(a)　**穂水分の推定精度**　　(b)　**SPAD 値の推定精度**

図 4.16　重回帰分析による生育状態の推定結果

適用することで図 4.15 のように 3 次元マップとして表せる。機材の準備を含めた総作業時間は 20 分程度であり，従来の方法と比較するとセンシングの作業能率は大幅に向上した。

E．生育推定とマップ生成

前節で示した小麦ほ場のセンシング画像は 2005 年 7 月 25 日に得たものである。生育推定のためのグランドトゥルースとして，18 点の調査地点を設置し，前年と同様に穂水分と SPAD 値を調べた。この調査地点は前年の 19 点とは別の地点であり，やはり生育に差異があると判断した場所を選んだ。マルチスペクトル画像から NDVI と GNDVI を算出し，重回帰分析を行った結果，穂水分と SPAD について以下の推定モデルを得た。

$$Y_{MOIS}=26.3X_{NDVI}-14.4X_{GNDVI}+61.6 \quad (4.11)$$

$$Y_{SPAD}=313.4X_{NDVI}-187.7X_{GNDVI}+155.0 \quad (4.12)$$

上式の重回帰モデルによる推定精度を図 4.16 (a)，図 4.16 (b) に示す。穂水分推定の決定係数は 0.71 であり，R. M. S. 誤差は 5.4%であった。また，SPAD 値について，決定係数が 0.79 であり，R. M. S. 誤差が 0.6 であった。穂水分，SPAD 値ともに十分な推定精度であるといえる。広角レンズを使用したことや，撮影方法の違いによる推定精度への影響は少なく，マップ生成には有効であると判断できる。図 4.17 にマルチスペクトル画像による推定穂水分マップを，図 4.18 に推定 SPAD マップを示

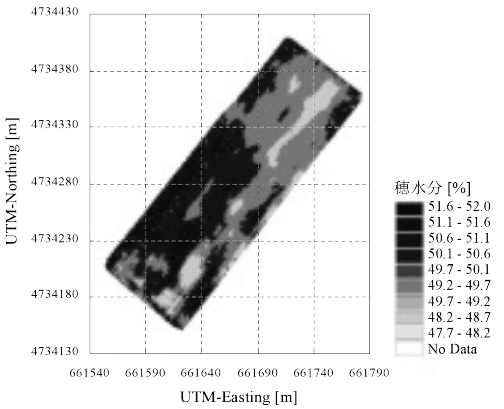


図 4.17　穂水分マップ

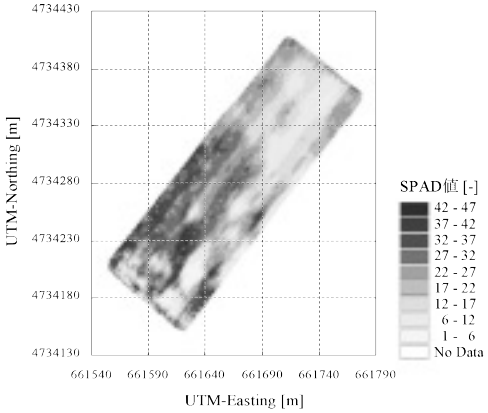


図 4.18　SPAD マップ

す。先に述べたとおり，SPAD 値は生育状態を把握する上で重要な情報となり，穂水分は生育の早晩を判断する材料となる。特に，この時期の穂水分は収穫適期を決定するための指標となり実用性が高い。

F. ま と め

開発したリモートセンシングシステムを用いて，小麦ほ場のセンシングを行った。前章までに扱った NDVI マップはマルチスペクトル画像の濃度値をそのまま用いて算出したものであった。本システムのように画像を貼り合わせてほ場全体をカバーする方式では，画像間の濃度値を比較することができず，生成されたマップは適切に生育状態を示しているとはいえない。そこで，入射光である環境光量と，イメージングセンサの制御項目である CCD ゲイン，露光時間で画像を補正し，絶対量として扱える正規化反射率を導出した。また，小麦ほ場に存在する防除畝を画像中から自動で認識・除去できるアルゴリズムを開発した。小麦ほ場のセンシング試験では，地上での調査項目として SPAD 値と穂水分を実測し，生育推定のグランドトゥルースとした。マルチスペクトル画像から得られる正規化反射率を用いて NDVI と GNDVI を算出し，重回帰分析の説明変数とした。その結果，推定モデルの決定係数は穂水分が 0.77, SPAD 値が 0.85 であり，高精度の推定が可能であった。また，得られた推定モデルにより，穂水分，SPAD 値それぞれのほ場マップを生成した。

ここでは，より広域を撮影することで，リモートセンシングの作業能率向上を図った。まず，撮像範囲を広くとるため，イメージングセンサに広角レンズを装着した。広角レンズを使用して撮影した画像には，レンズ収差による歪みが生じたため，幾何的な補正が必要となった。そこで，多項式近似によるレンズ歪みモデルを当てはめ，キャリブレーションによりレンズ歪みの特性を同定した。また，これまでの機体直下を撮影する方式を改め，カメラに俯角を持たせた状態での撮影を行った。これにより，一度に広域をセンシングでき，作業効率は大幅に向上した。この方法で小麦のセンシング試験を行い，穂水分と SPAD 値の推定を行った。その結果，決定係数は穂水分が 0.71 であり，SPAD 値が 0.79 と十分な推定精度を示した。

本章では，開発したシステムのアプリケーションとして小麦の生育状態推定及びマップの生成を行った。生育状態として穂水分と SPAD 値を用いたが，SPAD 値は生育状態を示すものとして広く使われている。また，穂水分は生育の早晩を判断する材料になることから，収穫適期の決定に役立てられる。本システムによってマップを生成すれば，ほ場全体の生育状態を把握できることから，開発したシステムは実用性の高いものであるといえる。

V．サーモトレーサによる土壌水分状態のモニタリング

A．はじめに

これまでのシステムではセンシングデバイスとしてマルチスペクトルイメージングセンサとレーザ距離計を扱った。ここでは開発したリモートセンシングシステムのもう１つのアプリケーションとしてサーモトレーサを適用し，土壌含水率の推定を目標とした。サーモトレーサはデジタルCCDカメラの一種で，熱赤外線領域の放射エネルギを検知することで，測定対象物の温度を熱画像として出力する装置である。熱赤外線による温度計測は非接触方式であることから，測定対象物の放射率や透過率を適切に設定しなければ，正確な温度を得ることができない。しかし，熱電対やサーミスタなどのスポット計測と違い，サーモトレーサの最大の利点は温度の空間的なばらつきを面の情報として捉えられることにある。衛星や航空機ベースリモートセンシングの分野では熱赤外線領域の画像を用いて，地表面温度やエネルギ放射束あるいは熱慣性を導出し，地質分類や土壌水分を推定する研究[89)90)91)]が行われている。また，熱赤外線画像ではなく，航空機に搭載した近赤外線レーザの反射強度から地表面水分状態を推定した例もある[92)93)]。熱赤外線画像による作物のリモートセンシングでは，葉面温度を計測することで水分の蒸発散量を推定し，水分ストレスを検知する方法も開発されている[94)95)]。本研究ではヘリコプタによる低高度リモートセンシングにより，ほ場レベルでの土壌含水率推定を行う。土壌の水分状態は作物の生育に影響するため，その空間的なばらつきの把握はPFにおいて有効である。

本章では，まず，供試サーモトレーサの仕様，計測原理について述べ，裸地状態の水田で行った実験の概要及び得られた熱画像を示した。また，大気の透過率についての補正法を検証し，測定精度を評価するための基礎実験について説明した。最後に，ヘリコプタから得られた熱画像と地上で測定された土壌含水率との関係を明らかにし，推定含水率マップを作成した。

B．サーモトレーサによる温度計測

a．供試サーモトレーサの仕様

図5.1に本研究で採用した㈱NEC三栄製サーモトレーサTH7102MVの外観を示す。供試サーモトレーサは測定対象物から放射される電磁波の中で，8～14 μmの赤外線エネルギを検知して熱画像として温度を計測できる装置である。この波長帯は他の赤外線波長，特に3～5 μmの短波長帯の赤外線と比較して，大気の透過率が高く，太陽光による反射の影響がほとんど無いため，屋外でも比較的容易に温度計測が行える。表5.1に供試サーモトレーサの主要諸元を示す。測定できる温度範囲は－20～100℃であり，測定精度は±2℃である。画像解像度は320×240ピクセルであり，専用の広角レンズを使用した。画角やレンズ歪みモデルは前章で示したマルチスペクトルイメージングセンサのレンズキャリブレーションと同様の方法で決定し

図5.1　供試サーモトレーサの外観（広角レンズ装着時）

表5.1　供試サーモトレーサの主要諸元

温度測定範囲	－20～100	［℃］
測定精度	±2	［℃］
温度分解能	0.007	［℃］
測定波長	8～14	［μm］
検出器	2次元非冷却センサ	
フレームレート	30	［fps］
解像度	320×240	［pixel］
対角線画角	65	［deg］
電源電圧	7.2	［V］
外形寸法	97×110×169	［mm］
質量	1.7	［kg］
熱画像補正項目	透過率，放射率	

た。本体の機能として，放射率と透過率についての補正が撮影時に行える。また，シャッタリリースやフォーカスの調整などはコンピュータから RS-232 C を介してリモートで操作でき，撮影された熱画像は本体のコンパクトフラッシュに 14 ビット温度データとして保存される。本体の質量は 1.7 kg，電源電圧は 7.2 V であり，軽量でハンディタイプとしても使用できる。このサーモトレーサをヘリコプタに搭載し，コンピュータにより制御できるようシステムを改造した。画像取得のインターバルは供試サーモトレーサの性能上 10 秒とし，コンピュータから送られるコマンドによってシャッタリリースされる。GPS や INS，可動式雲台など，システム全体の基本構成はこれまでと同様とし，画像計測と同時にヘリコプタの位置，姿勢角，雲台の回転角をコンピュータに保存する。また，供試サーモトレーサは NTSC により熱画像をビデオ出力できることから，機体に設置した無線により，地上で撮影画像をモニタリングできる。

b．熱画像の計測原理

温度 t の理想的な黒体から放射され，サーモトレーサで受光できるエネルギ E を式(5.1)のように $f_T(t)$と定義する。また，放射率 ε の物体からの放射エネルギ E_ε は $f_T(t)$を用いて式（5.2）で表される。

$$E = f_T(t) \tag{5.1}$$
$$E_\varepsilon = \varepsilon \cdot f_T(t) \tag{5.2}$$

ただし，本章で扱う温度は全て相対温度とする。一方，プランクの放射則で表される黒体の分光放射エネルギ W は式（5.3）で示される。

$$W(\lambda,\ t) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left\{\dfrac{c_2}{\lambda \cdot (t+273.15)}\right\} - 1\right]} \tag{5.3}$$

ここに，λ は波長である。また，c_1，c_2 は第 1，第 2 放射定数であり，それぞれ $c_1 = 3.7418 \times 10^4$，$c_2 = 1.4388 \times 10^4$ である。式（5.3）で得られる分光放射エネルギを図 5.2 に示す。次に，サーモトレーサの受光感度 S_{TIR} は図 5.3 で表される。従って，先に定義した温度－エネルギ変換 f_T は式(5.4)のように，分光放射エネルギ W とサーモトレーサの受光感度 S_{TIR} を 8 μm から 14 μm まで畳み込んだものとして得られる。

$$f_T(t) = \int_8^{14} W(\lambda,\ t) \cdot S_{TIR}(\lambda)\, d\lambda \tag{5.4}$$

サーモトレーサによる温度計測の模式図を図 5.4 に示す。放射率 ε の測定対象物から発するエネルギは式（5.5）のように放射エネルギ E_o と反射エネルギ E_a で表される。

$$E_o = \varepsilon \cdot f_T(t_o)$$
$$E_a = (1-\varepsilon) \cdot f_T(t_a) \tag{5.5}$$

測定対象物とサーモトレーサの間に存在する大気の透過率 γ を考慮すると，サーモトレーサに入射するエネルギ E_S は式（5.6）となる。

$$\begin{aligned} E_S &= \gamma \cdot (E_o + E_a) \\ &= \gamma \cdot \{\varepsilon \cdot f_T(t_o) + (1-\varepsilon) \cdot f_T(t_a)\} \\ &= \gamma \cdot \varepsilon \cdot \{f_T(t_o) - f_T(t_a)\} + \gamma \cdot f_T(t_a) \end{aligned} \tag{5.6}$$

ここで，式（5.6）第 3 式，第 2 項の $\gamma \cdot f_T(t_a)$

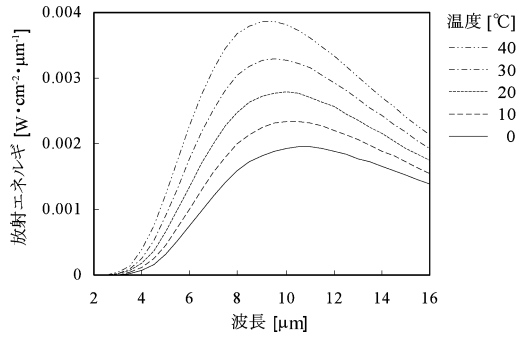


図 5.2　黒体の分光放射エネルギ

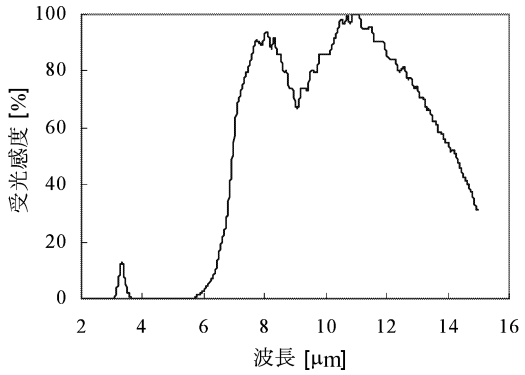


図 5.3　サーモトレーサの受光特性

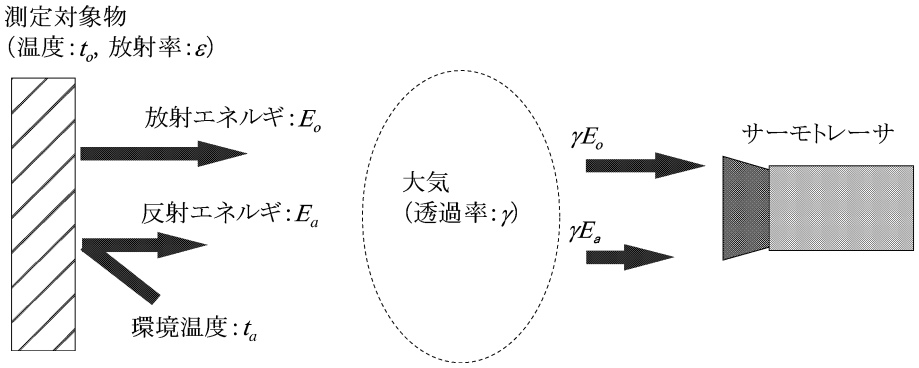


図 5.4　サーモトレーサの温度計測原理

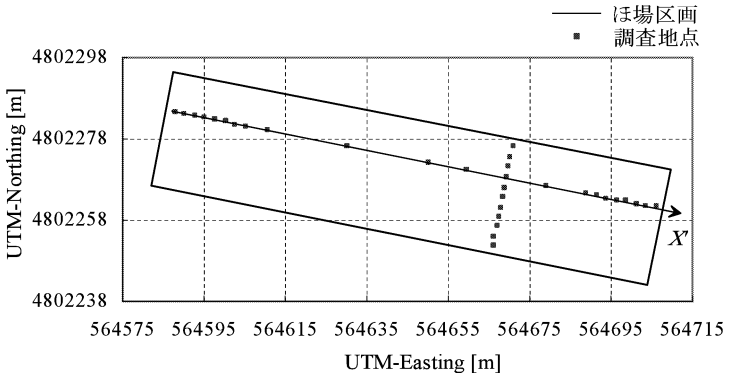


図 5.5　試験ほ場と含水率調査地点

は計測時に本体内部で自動除去され，受光エネルギは式（5.7）のように E_S' となる。

$$E_S' = \gamma \cdot \varepsilon \cdot \{f_T(t_o) - f_T(t_a)\} \tag{5.7}$$

すると，測定対象物の温度 t_o は上式を変形した式（5.8）で得られる。

$$t_o = f_T^{-1}\left[\frac{E_S'}{\varepsilon \cdot \gamma} + f_T(t_a)\right] \tag{5.8}$$

式（5.8）より，測定対象物の真温度を得るには，正確な放射率 ε と透過率 γ が必要となる。しかし，仮にこのような補正値の設定を誤ったとしても，画像全体の相対的な温度分布は捉えることができる。特に，被写体までの距離が変わらず，測定対象物の材質が一様であれば，透過率と放射率を考慮しなくても，熱画像中の温度分布は真温度のばらつきを反映する。

C．実験概要及び撮影方法

a．試験ほ場とグランドトゥルースの設置

センシング試験は 2005 年 4 月 24 日，北海道美唄市の水田ほ場で行い，午前 10 時と午後 3 時に 1 度ずつほ場の熱画像を取得した。試験当日は晴天であり，3 日前から当日までの降雨は無かった。試験ほ場は裸地の状態で土質が一様であるが，排水性に良否があると主観的に判断されたほ場を選んだ。ほ場面積は 125 m×35 m であり，図 5.5 のように，32 点の含水率調査地点を設置し，これをリモートセンシングのグランドトゥルースとした。含水率は午前と午後のセンシングの合間に表層の土壌をサンプリングし，炉乾法により測定した。その結果，調査地点の含水率には 28.8%から 54.2%のばらつきが確認できた。ほ場東側には排水路が敷かれており，ほ場の所有者によれば，試験区の東側の排水性が良く，西側の排水性が慢性的に悪いとされている。ここで，図 5.5 で示した直線 X' 上

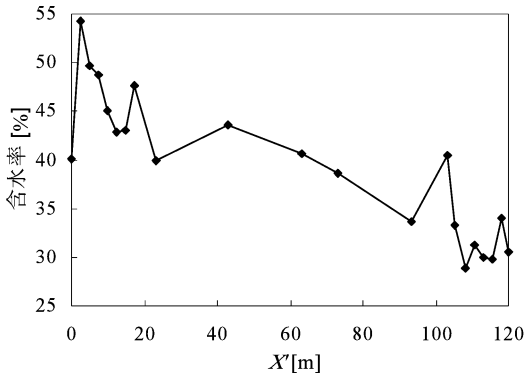


図 5.6　土壌含水率の空間変動

の含水率を空間変動として図 5.6 に示す。直線 X' は東西方向に並ぶ含水率調査地点 21 点を通るものとして定義した。図 5.6 から，ほ場の長辺方向に沿って西側の含水率が高く，東側が低いことが確認できる。図 5.7 は，試験ほ場を東側から長辺方向に向けて市販のデジタルカメラで撮影したものであり，試験当日のほ場状態を示している。

b．撮影方法および撮影画像

ヘリコプタからの撮影は，1 枚の画像にほ場全体がおさまるようカメラに俯角を持たせた状態で行った。マルチスペクトルイメージングセンサの画像からマップを生成する場合，機体直下を撮影した画像を貼り合わせ，合成画像として表現できた。これは，環境光量による画像間の濃度の変動を AI センサによって補償できるためである。しかし，サーモトレーサによるリモートセンシングで同様の方法をとると，撮影中の地温変化が無視され，複数の画像でマップを構成してもほ場全体の温度分布を適切に表現できない。従って，ほ場内の温度分布を捉えるために，1 枚の画像でほ場全体をカバーする必要があった。図 5.8 (a) は午前のセンシング試験で得られた熱画像であり，図 5.8 (b) はこの熱画像を絶対座標系へ変換したものである。同様に，午後のセンシングで得られた熱画像について図 5.9 に示す。いずれの画像も試験ほ場を東側から長辺方向に向けて撮影したものである。画像中の空間分解能は一様ではなく，図 5.8 の場合，ほ場東側の空間分解能は 21 cm×51 cm であり，西側では 54 cm×386 cm であった。

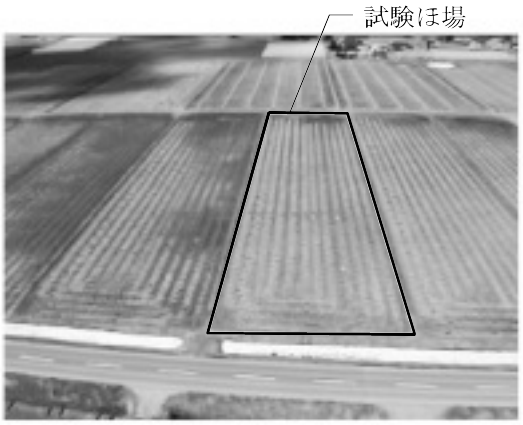


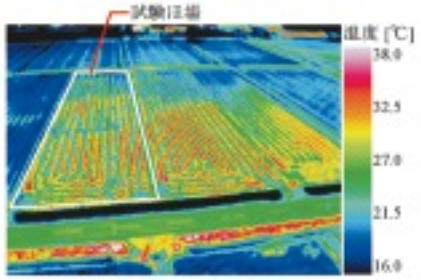
図 5.7　試験ほ場の様子（ほ場東側から長辺方向に向かって撮影）

同様に，図 5.9 ではほ場東側の空間分解能が 24 cm×66 cm，西側で 57 cm×330 cm であった。しかし，画像を見るかぎりほ場全体について温度のばらつきが確認できるため，十分な空間分解能であると判断した。また，図 5.8 (b)，図 5.9 (b) ともに撮影地点から，手前側の温度が高く，撮影地点から離れるほど温度が低いことが確認できる。一般にこのような熱赤外線による温度計測は距離が離れると実際の温度より低い値を出力する。これは測定対象物から放射される赤外線エネルギが大気の透過率の影響で減衰するためである。この熱画像マップで見られる温度分布が，透過率の影響で生じたものか，実際の地表面温度のばらつきを反映しているのかは判断できないが，少なからず大気の影響を受けているため，透過率について原画像を補正する必要がある。また，本実験で得られた画像はサーモトレーサを傾斜させて撮影されたものであるため，センサ中心から地表面までの距離がピクセルごとに異なる。従って，全ピクセルに同じ透過率を当てはめることができず，ピクセルごとの透過率補正が必要となる。

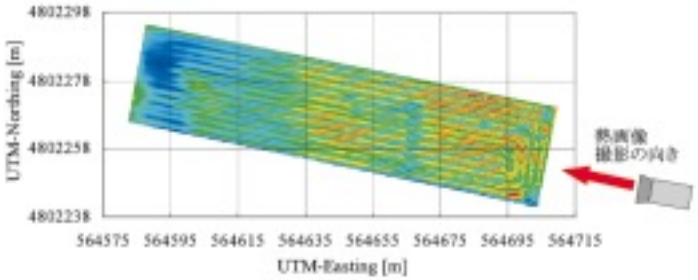
D．熱画像の補正法

a．透過率の決定

式 (5.8) の透過率 γ を操作することで熱画像を補正できる。γ は対象物とサーモトレーサ間の距離 d と大気の温度 t_a，湿度 h_a によって決定されるパラメータである（式 (5.9)）。

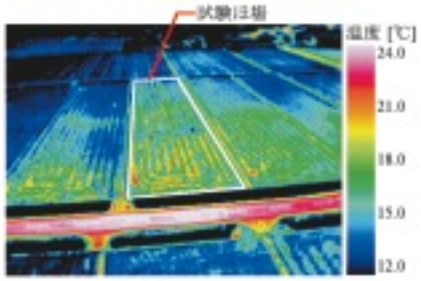


(a)　原画像

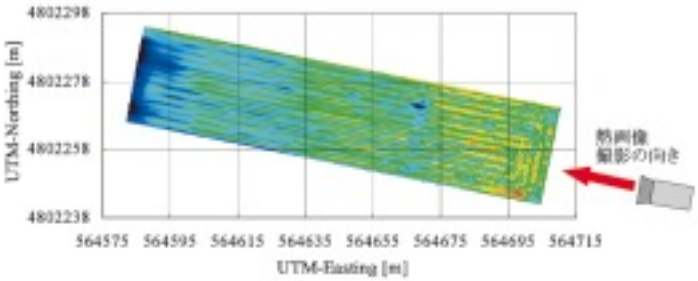


(b)　熱画像マップ

図 5.8　午前のセンシングで得られた熱画像



(a)　原画像

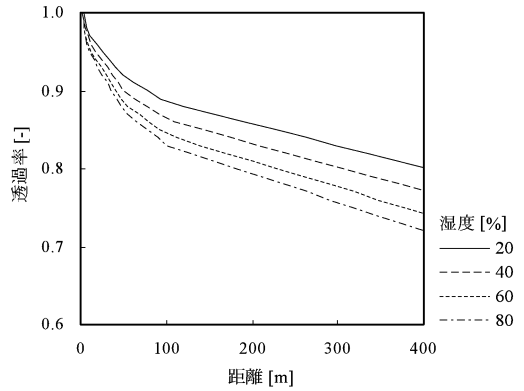


(b)　熱画像マップ

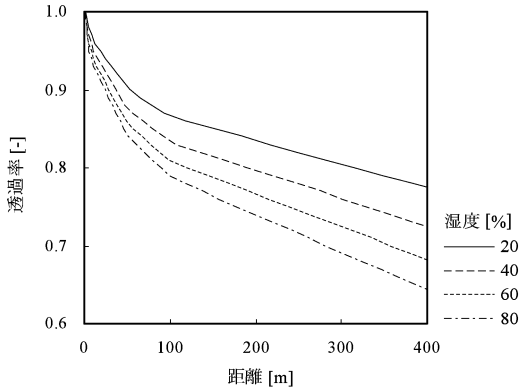
図 5.9　午後のセンシングで得られた熱画像

$$\gamma = G_{MODTRAN}(d,\ t_a,\ h_a) \tag{5.9}$$

温度，湿度，距離と透過率の関係 $G_{MODTRAN}$ は本体内部にデータテーブルとして記録されているものを抽出して用いた。このデータテーブルは透過率算出アルゴリズムとして広く使われてい



(a)　**気温** 10°C



(a)　**気温** 20°C

図 5.10　気温 10°Cと気温 20°Cの場合の距離による透過率の変化

る MODTRAN（Moderate resolution transmittance code）[96)97)] により生成されたものである。ここで用いた $G_{MODTRAN}$ は，距離 1 m，温度 1 °C，湿度 1 %の刻みで設定でき，透過率は 0.01 の分解能で取得できる。距離による透過率の変化を気温 10°Cと 20°Cの場合を例にとり図 5.10 に示す。透過率は距離によって指数関数的に低下し，気温あるいは湿度が上がると透過率は下がる。

b．熱画像の補正モデル

熱画像撮影時に，放射率及び透過率についての補正をともに行わない場合，式 (5.8) の ε と γ は 1.00 となり熱画像が示す温度 t_r は式（5.10）となる。

$$t_r = f_T^{-1}(E_r + f_T(t_a)) \tag{5.10}$$

ここに，E_r はサーモトレーサに入射したエネルギであり，式（5.10）を変形して以下のように求められる。

$$E_r = f_T(t_r) - f_T(t_a) \tag{5.11}$$

従って，この E_r を求めるには撮影時に，環境温度 t_a を記録する必要がある。この t_a は特殊な撮影環境を除けば，透過率を得るために必要な大気の温度と同じものとなる。次に，E_r に放射率 ε と透過率 γ を加味した補正エネルギ E_c を以下のように算出する。

$$E_c = \frac{E_r}{\varepsilon \cdot \gamma} = \frac{f_T(t_r) - f_T(t_a)}{\varepsilon \cdot \gamma} \tag{5.12}$$

この E_c は測定対象物の放射エネルギの推定量となる。最後に式（5.10）の E_r を E_c に置き換えることで補正した温度データ t_c が得られる（式（5.13））。

$$t_c = f_T^{-1}(E_c + f_T(t_a)) \tag{5.13}$$

放射率 ε と透過率 γ を正確に設定すれば，t_c は測定対象物の真の温度となる。

ここで，透過率と放射率に加え環境温度を補正パラメータとする本補正法が，どのような性質を持つかを調べた。また，サーモトレーサ本体の機能である撮影時のリアルタイム補正との比較も行った。図 5.11 (a) は補正法の性質を調べるために撮影したテスト画像であり，本体の補正機能を使用していない画像である。つまり，放射率 ε = 1.00，透過率 γ = 1.00 としたもので，先に定義した熱画像温度 t_r を指す。また，このときの環境温度は 21°Cであった。図 5.11（b）は図 5.11（a）が撮影されてから，6 秒後に撮影されたもので，透過率を γ = 0.70 と設定し，本体機能のリアルタイム補正を用いたものである。図 5.11（c）も同様に透過率 γ = 0.70 として補正した画像であるが，上述の補正法を用いたオフライン処理によるものである。従って，図 5.11（b）と図 5.11（c）の熱画像温度は補正温度 t_c を意味する。ここで，補正前後の計測温度の変化量，つまり補正量を Δt とし

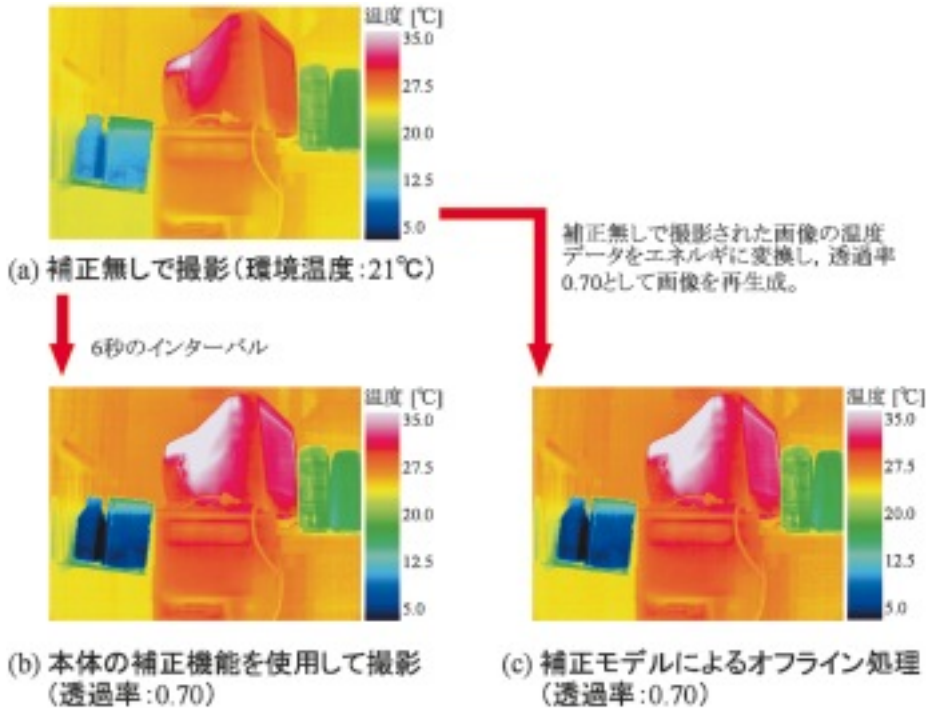


図 5.11　本体の補正機能と補正モデルによるオフライン処理の比較

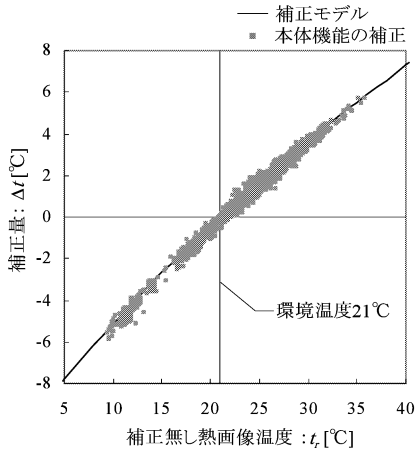


図 5.12　透過率 0.70 での補正量

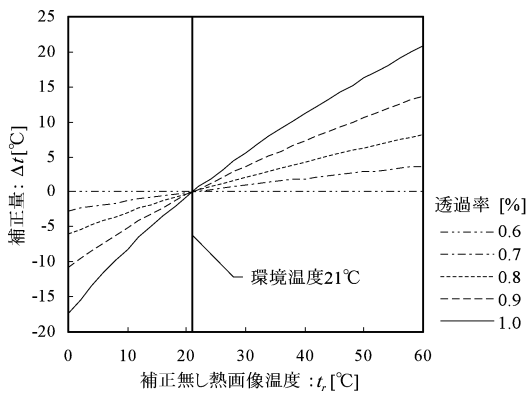


図 5.13　透過率による補正量の変化（環境温度 21℃でのシミュレーション）

て式（5.14）のように定義する。

$$\Delta t = t_c - t_r \tag{5.14}$$

リアルタイム補正とオフライン補正それぞれについて，補正量 Δt の変化を図 5.12 に示す。2 つのデータはほぼ一致しており，オフライン処理でも本体の補正を再現できることが確認できた。また，これは画像全体について同じ補正を行ったものであるが，上述の補正法を用いれば，ピクセルごとに透過率を設定し，補正が行える。従って，図 5.8 と図 5.9 で示した空撮画像のように，被写体までの距離が一様でない画像についても適切な補正が可能となる。

次に，透過率による補正量の変化を調べた。図 5.13 は環境温度を 21℃，放射率 $\varepsilon = 1.00$ とした場合のシミュレーションの結果である。透

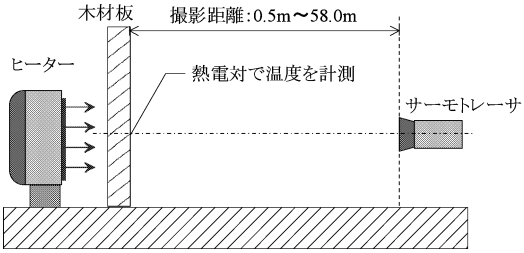


図 5.14　補正法検証実験の概要

過率によらず環境温度を境に補正量の正負がわかれる。これは，式（5.11）で環境温度における放射エネルギ $f_T(t_a)$を差し引いていることに起因する。また，透過率 $\gamma=1.00$ の場合，温度 t_r によらず補正量は 0 となり，透過率が下がると温度変化量を示すカーブは立ち上がる。さらに，放射率について，式（5.12）の ε に注目すれば，ε が補正量に及ぼす影響は透過率 γ によるものと同等であることがわかる。従って，放射率が下がれば，図 5.13 の補正量を示すカーブはさらに立ち上がる。

c．補正法の検証

上述した透過率についての補正法を検証するための実験を行った。図 5.14 のように，ヒータで木材板の温度が安定するまで連続的に加熱し，温度が安定している状態で木材板を撮影した。透過率を変化させるため，撮影距離を 0.5 m から 58.0 m まで 0.5 m ずつ変化させて合計 116 枚の画像を得た。得られた熱画像の例として，撮影距離 4.0 m のものを図 5.15 に示す。撮影された木材板の中央部で最も高温となった部分を熱画像の計測値とした。加熱した木材板の真温度は熱電対により 1 Hz で計測し，これを精度評価用参照データとした。また，透過率決定に必要な環境温度，湿度は市販の温湿度計で測定し，温度 15.1℃，湿度 42％を得た。実験中の木材板の温度は極めて安定しており，79.4〜81.2℃の範囲内で推移した。ほ場でのリモートセンシングを考えるとこのような高温物体を撮影することは考えられないが，環境温度との差が小さいものを撮影した場合，透過率や放射率による影響が小さく，計測誤差の評価が困難となる。従って，本実験では透過率による計測精度への影響をより明確に捉えるため，測

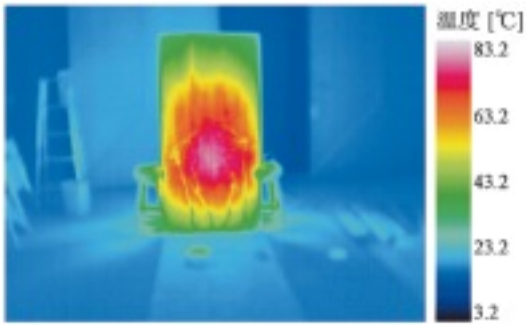


図 5.15　撮影距離 4 m の熱画像

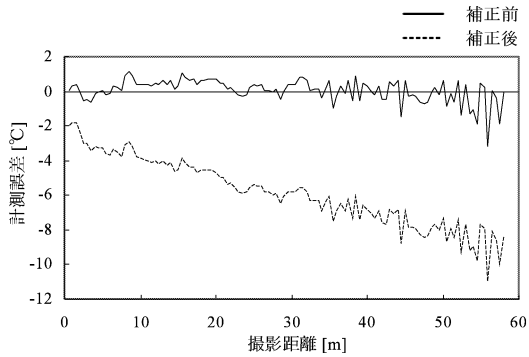


図 5.16　補正前後の温度計測誤差の推移

定対象物の温度を約 80℃とした。

まず，正確な温度計測のためには測定対象物の放射率が必要となる。一般に木材の放射率は高く，0.90 以上である[98]。本実験では 0.5 m の距離から撮影した熱画像を用いて木材板の放射率を調べた。撮影距離が 1 m 以内であれば，透過率の影響は無く，熱画像の誤差要因は測定対象物の放射率に限定される。従って，0.5 m の距離から撮影した画像について，式(5.12)の ε を調節し，真温度と一致するよう放射率を決定した。その結果，放射率 $\varepsilon=0.96$ を得た。次に，得られた全ての熱画像について，放射率と，撮影距離に応じた透過率を加味して補正を行った。本実験環境下では，透過率は距離によって 1.00 から 0.88 まで変化する。補正前後について，距離による温度計測誤差の推移を図 5.16 に示す。補正前の画像では距離によって負の温度誤差が増加することが確認できる。計測誤差は撮影距離 20 m で−4.7℃であり，撮影距離 50 m では−7.3℃となった。これは透過率の影響

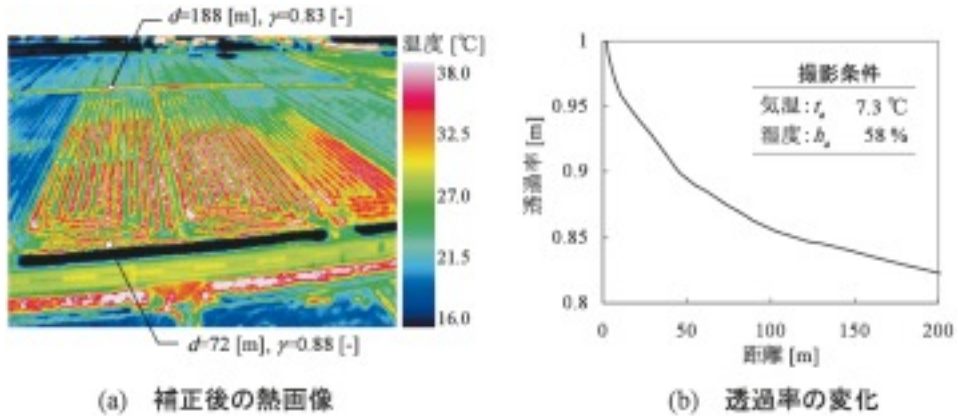


図 5.17　補正後の熱画像と撮影条件下での透過率変化（午前）

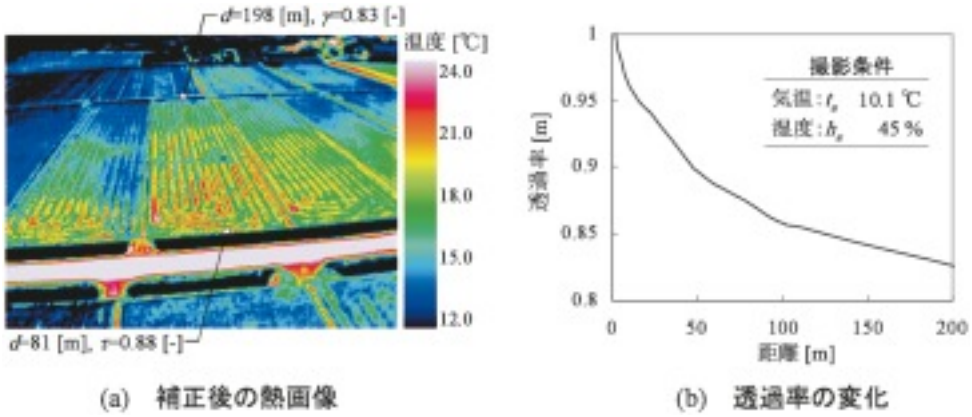


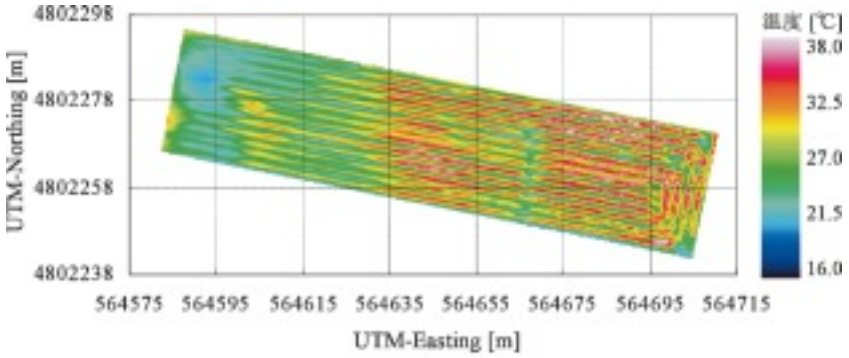
図 5.18　補正後の熱画像と撮影条件下での透過率変化（午後）

によるものであり，測定対象物が環境温度より高いために真温度より低い値を出力する。一方，補正を行った場合，距離による誤差が除去され計測精度が改善されたことがわかる。全画像についての計測精度は R. M. S. 誤差で 0.7℃，撮影距離 50 m から 58 m の 17 画像では 1.2℃であり，補正前の精度と比較すれば，補正法が妥当であると判断できる。

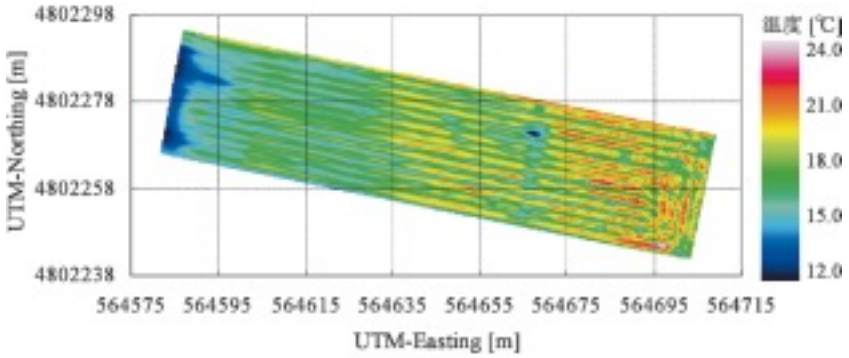
E．土壌含水率の推定

図 5.17 に透過率補正を行った午前の熱画像と，撮影条件下での透過率の変化を示す。同様に午後の熱画像について図 5.18 に示す。撮影距離 d はセンサの姿勢と位置及びピクセルの画像座標から得られる。これは第Ⅱ章の式（2.4）で得られるセンサ位置$[x_S \quad y_S \quad z_S]^T$から，式（2.8）の画像データがマッピングされた位置$[x_M \quad y_M \quad z_M]^T$へのベクトルノルムとして算出される。2 つの熱画像における透過率は，ほ場西側（奥側）で 0.83，東側（手前）で 0.88 であった。図 5.19 に補正後の熱画像マップを示す。補正前の熱画像（図 5.8，図 5.9）と比較すると，補正により計測温度が全体的に高く認識されているが，補正前と同様に，ほ場東側が高温であり，西側が低温であった。これらの補正画像は放射率を考慮していないため，依然正確な温度を示しているとはいえないが，土壌の放射率は一般に高く，ほ場内の土質が均一であることを考えれば，相対的な温度分布にさほど影響しない。また，透過率については適切な補正がされているため，この温度分布は実際の地表面温度のばらつきを反映しているといえる。

次に，午後の熱画像温度から午前のものを差し引いた温度変化量マップを図 5.20 のように生成した。従って，本研究では，午前と午後の



(a)　午前の熱画像マップ



(b)　午後の熱画像マップ

図 5.19　補正後の熱画像マップ

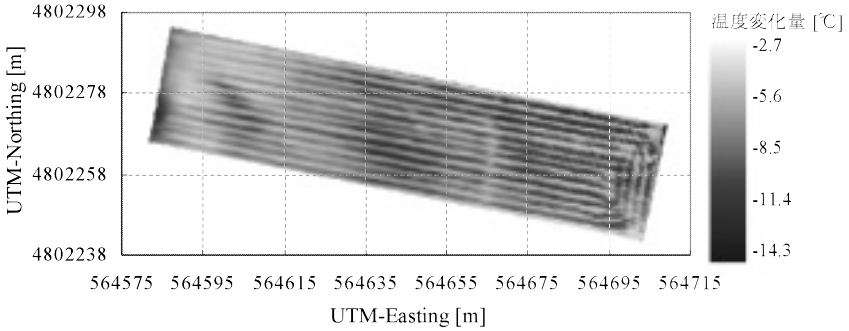
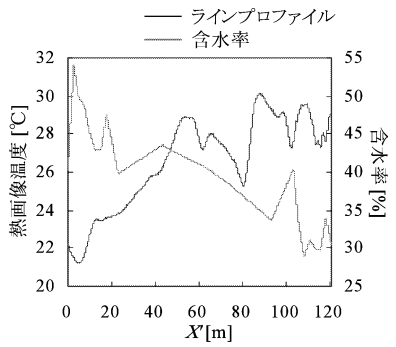


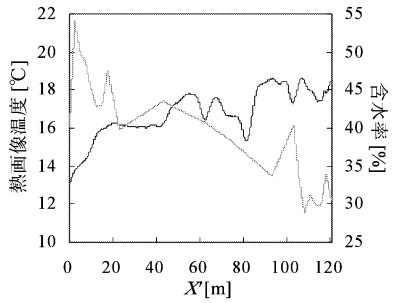
図 5.20　午前から午後への温度変化量マップ

熱画像及びその温度差それぞれと含水率との関係を検証した。

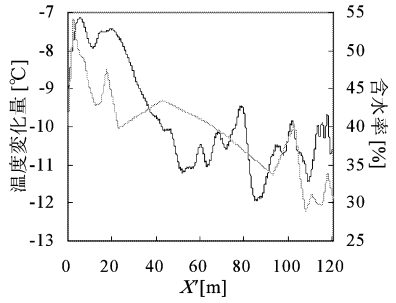
まず，生成された熱画像マップと含水率の傾向を見るため，図 5.5 で定義した直線 X' について熱画像マップのラインプロファイルを図 5.21 のように抽出した。図 5.21 を見ると含水率と温度は負の相関が，温度変化量とは正の相関がみられる。また，午前より午後の方が，温度のばらつきが小さいことがわかる。一般に，水分の高い土壌は比熱あるいは熱慣性が高く，環境温度や日射に対する温度応答が鈍いことが知られている。本実験でも，午前中は太陽光が照射され，土壌温度が上昇過程にあったこと考えると，妥当な結果だといえる。また，含水率



(a) 午前

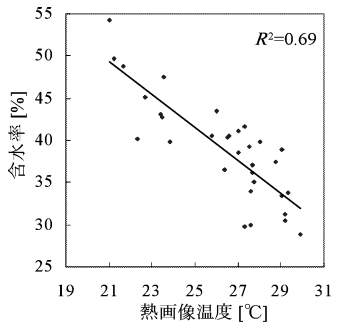


(b) 午後

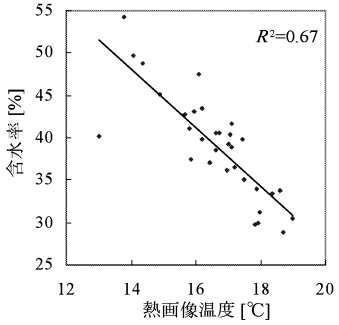


(c) 午前から午後の温度変化

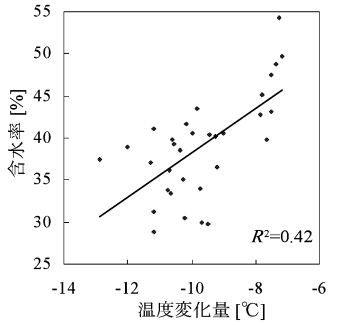
図 5.21　熱画像マップのラインプロファイル



(a) 午前



(b) 午後



(c) 午前から午後の温度変化

図 5.22　熱画像温度による含水率の推定

の高い部分の温度変化度合いは小さく，含水率の低い部分は大きいことも，土壌水分と比熱の関係に則している。

調査地点全 32 点について含水率との相関を図 5.22 に示す。それぞれの相関を見ると，図 5.22 (a) で示した午前の熱画像を用いたものが決定係数 R^2=0.69 と最も高かったため，本実験ではこの推定モデルを採用し，図 5.23 のように土壌含水率マップを生成した。今回得られた含水率推定モデルは汎用的なものではなく，ほ場ごとに実測値とのキャリブレーションを要する。これは，土質が異なれば，熱画像の計測値が変わるためである。また，午前と午後の推定モデルに違いが生じたことを考えると，センシングするごとにキャリブレーションを行う必要がある。しかし，本実験により，含水率が 54.1～28.8%の範囲であれば，熱画像温度による線形モデルで推定できることが確認できた。

F．ま　と　め

本章では，サーモトレーサにより熱画像マップを生成できるシステムを開発し，土壌含水率の推定を目標とした。ヘリコプタからの空撮は，ほ場全体を 1 枚の画像でカバーするため，サー

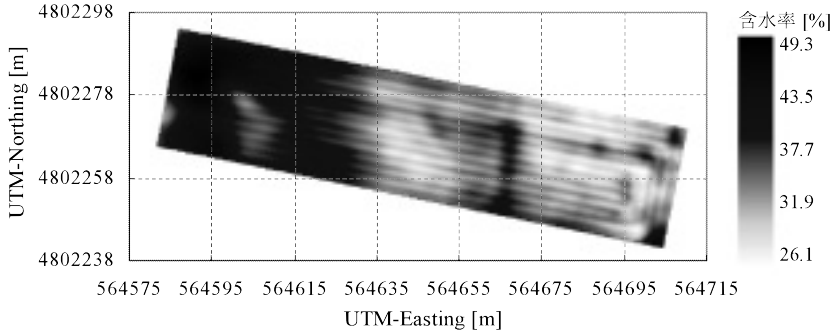


図 5.23　含水率マップ

モトレーサに俯角を持たせた状態で行った。そのため，ピクセルごとに放射率補正を行う必要があった。そこで，放射率についての熱画像補正モデルを導出した。熱画像の補正には大気の透過率が必要となるため，サーモトレーサ本体に記録されている透過率データテーブルを用いた。本章では，まず，熱画像補正モデルの性質を調べ，基礎実験によってその妥当性を検証した。約 80℃の物体の温度をサーモトレーサによって計測し，補正モデルを適用した結果，計測精度は R. M. S. 誤差で 0.7℃であることを確認した。土壌含水率推定には午前と午後の熱画像及びその差分のデータを用いた。含水率の相関は午前が $R^2=0.69$，午後が $R^2=0.67$ であり，ともに十分な精度であった。また，午前から午後への温度変化量にも相関が確認できた。最後に得られた推定モデルによって含水率マップを生成した。本システムを用いた場合，センシングするごとにグランドトゥルースとのキャリブレーションが必要であるが，ここで扱った含水率の範囲であれば，熱画像温度による線形モデルで推定できることが確認できた。

VI. 総　　括

A. はじめに

日本の農業分野において産業用無人ヘリコプタは主に水稲の防除作業に用いられており，作業効率の高さから確かな評価を得ている。しかし，ヘリコプタのコストを考えると，1 年間の農作業を通して防除作業のみの使用ではコストにみあう機器とはいえず，農業分野への用途拡大が必要である。そこで，本研究では産業用無人ヘリコプタの新しい利用法として，精密農法（PF）におけるフィールド情報センシングのプラットフォームに適用した。PF とは，生育の良不良を局所的に認識し，最適な資材投入を行うことで，生育のばらつきを是正することを目的とした農法である。その作業行程は大きく分けて，生育状態などのフィールド情報センシング，診断と意思決定，可変投入の 3 要素技術に分類できる。この一連の技術が確立されれば，ほ場管理の低コスト化，効率化が実現でき，生産性は確実に向上する。また，薬剤の過剰投入をおさえることができるので，食品の安全性，農地環境の保全に寄与することができる。ここで，フィールド情報のセンシングに産業用無人ヘリコプタを導入すれば，有効な手段となる。ヘリコプタは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，その特徴はリモートセンシングのプラットフォームとして活用できる。ヘリコプタは飛行体であることから作物や土壌状態を選ばず，センシングすべき場所へ即座に移動できるので，作業効率が高い。センシング作業はユーザ自身が機体を操作して行うため，取得したデータをその場で提供でき，リアルタイム性に優れる。さらに，低空センシングであることからほ場の空間変動を捉えるには十分な分解能を維持できる。

以上より，産業用無人ヘリコプタをフィールド情報センシングのプラットフォームとし，収集したデータを GIS としてマッピングできるシステムの開発を本研究の目標とした。

B．ヘリコプタベースリモートセンシングシステムの開発（第 II 章要旨）

供試ヘリコプタは本来農薬散布用として開発されたものであるが，農薬散布に必要な機材を取り外し，センサマウントとして可動式雲台を設置した。作物画像取得に際し，3バンドのマルチスペクトルイメージングセンサを採用した。本研究ではポジショニングセンサとしてRTK-GPS を採用し，供試ヘリコプタに搭載されている INS と GDS から得られるロール角，ピッチ角，方位角を姿勢角データとして用いた。さらに，可動式雲台の回転角をロータリエンコーダによって計測した。これらのセンサから得られるパラメータを用いれば，計測した画像データの外部歪みを除去できる。ヘリコプタから得られた画像に座標変換を施した結果，2 m 以上の大きな空間誤差を確認したため，姿勢角と高度について補正が必要であると判断した。特に方位角が大きな誤差要因であり，IMU による相対方位と GDS 方位との偏差を調べることで，誤差モデルを生成した。ロール角，ピッチ角，高度データについてはバイアス値を考慮することで補正した。その結果，空間精度は 29 cm まで改善され，考案した補正法が妥当であることを確認した。また，可動式雲台を利用し，センサに俯角を持たせた状態で得られた画像については 38 cm の精度であった。これは，ほ場空間情報をマッピングし，PF に適用する上で十分な精度である。本システムを用いてトウモロコシほ場のセンシングを行い，111 枚の画像でほ場マップを生成した。作業効率が高く，生成したマップは高分解能であり，本システムの有効性が実証された。本システムは無線操縦によるプラットフォームを採用したことから，作業状態を地上で確認できるシステムが不可欠であった。そこで，リモートセンシングの作業支援として，作業状態を地上でモニタリングできるシステムを開発した。機体に新たに無線装置を搭載し，作業中，機体と地上局の間で通信を行えるようシステムを改良した。地上局では開発したソフトウェアによって機体の位置や姿勢が描画され，作業状況としてセンシングされた領域も表示できる。本システムのように遠隔操縦プラットフォームを用いる場合，このようなモニタリングシステムは必須の機能であり，実用上有用なものである。

C．地形センシングと空間情報の 3 次元マッピング（第 III 章要旨）

これまで開発したシステムにレーザ距離計を組み込み，画像データに加え地形情報を取得できるものとした。傾斜や凹凸があるほ場をセンシングし，画像データを高精度にマッピングする場合，ほ場の地形情報が不可欠である。水平面に限らず，どのようなほ場でも対応できるシステムとし，汎用性向上を目指した。まず，レーザ距離計から得られる地形データの精度評価を行った。レーザ距離計による地形センシングでは，約 10 m の高低差があるほ場を 9 cm の誤差で測量できた。また，試験ほ場の面積は 23,000 m^2 であり，センシングの作業時間は約 35 分であった。従来法として扱ったトータルステーションによる地上測量では 3 時間以上要したことを考えると，開発した地形測量システムは高精度，高能率であり，有効なシステムである。また，本システムで得られた地形データの 1 つの処理法として，精度を維持しながらデータ数を削減できるアルゴリズムを考案した。ここでは，全地形データ 507 点からデータ数を削減し，形状変化を調べた。その結果，生データの 79% である 400 点を削減しても，形状誤差を 12 cm に抑えることができた。さらに，ヘリコプタから得られた地形データと画像データを統合し，3 次元 GIS マップを生成できるアルゴリズムを開発した。画像データを地形データに貼り合わせ，その空間精度を調べた結果，41 cm の誤差を確認した。また，ほ場全体の画像と地形から 3 次元 GIS マップを生成した。

D．マルチスペクトルイメージングセンサによる小麦の生育診断（第 IV 章要旨）

本システムのように複数の画像でほ場マップを構成する場合，環境光の変動を補償し，全ての画像の濃度値を絶対量に変換する必要があった。従って，AI センサによる環境光量と CCD ゲイン，露光時間の設定値を考慮して，画像の濃度値から正規化反射率を導出した。有効な反射率を算出するためには適切な明るさを持つ画

像を得なければならない。そこで，センシング時に CCD ゲインと露光時間を自動制御し，その後の処理に適切な画像を得られるようシステムを改良した。また，小麦ほ場に存在する防除畝を画像中から自動で認識・除去できる画像処理アルゴリズムを開発した。小麦ほ場のセンシング試験では，地上での調査項目として SPAD 値と穂水分を実測し，生育推定のグランドトゥルースとした。マルチスペクトル画像から得られる正規化反射率を用いて NDVI と GNDVI を算出し，重回帰分析の説明変数とした。その結果，推定モデルの決定係数は穂水分が 0.77，SPAD 値が 0.85 であり，高精度の推定が可能であった。また，得られた推定モデルにより，穂水分，SPAD 値それぞれのほ場マップを生成した。

次に，一度の撮影でより広域をカバーすることで，リモートセンシング作業の効率化を図った。まず，撮像範囲を広くとるため，イメージングセンサに広角レンズを装着した。広角レンズを使用して撮影した画像には，レンズ収差による歪みが生じたため，幾何的な補正が必要となった。そこで，多項式近似によるレンズ歪みモデルを当てはめ，キャリブレーションによりレンズ歪みの補正を行った。また，これまでの機体直下を撮影する方式を改め，カメラに俯角を持たせた状態での撮影を行った。これにより，一度に広域をセンシングでき，作業効率は大幅に向上した。この方法で小麦のセンシング試験を行い，穂水分と SPAD 値の推定を行った。その結果，決定係数は穂水分が 0.71，SPAD 値が 0.79 と十分な推定精度を示した。

本研究では開発したシステムのアプリケーションとして小麦の生育状態推定及びマップの生成を行った。生育状態として穂水分と SPAD 値を用いたが，SPAD 値は生育状態を示すものとして広く使われている。また，穂水分は生育の早晩を判断する材料になることから，収穫適期の決定に役立てられる。本システムによってマップを生成すれば，ほ場全体の生育状態を把握できることから，開発したシステムは実用性の高いものであるといえる。

E．サーモトレーサによる土壌水分状態のモニタリング（第 V 章要旨）

サーモトレーサによりほ場の熱画像を取得し，土壌含水率を推定できるシステムの開発を目標とした。土壌の水分状態は作物の生育に影響するため，その空間的なばらつきの把握は PF において有効である。リモートセンシングの試験区として土質が一様な水田ほ場を選び，裸地状態の時期にセンシングを行った。ヘリコプタからの空撮は，ほ場全体を 1 枚の画像でカバーするため，サーモトレーサに俯角を持たせた状態で行った。そのため，ピクセルごとに透過率補正を行う必要があった。そこで，透過率についての熱画像補正モデルを導出した。この透過率は，サーモトレーサ本体に記録されている透過率データテーブルから得た。ここでは，まず，熱画像補正モデルの性質を調べ，基礎実験によってその妥当性を検証した。約 80℃の物体をサーモトレーサで計測し，補正モデルを適用した結果，計測精度は R. M. S. 誤差で 0.7℃であることを確認した。土壌含水率推定には午前と午後の熱画像及びその差分のデータを用いた。含水率の相関は午前が $R^2=0.69$，$R^2=0.67$ であり，ともに十分な精度であった。また，午前から午後への温度変化量にも相関があることが確認できた。最後に得られた推定モデルによって含水率マップを生成した。本システムを用いた場合，センシングするごとにグランドトゥルースとのキャリブレーションが必要であるが，ここで扱った含水率の範囲であれば，地表面の温度分布による線形モデルで推定できることを確認した。

謝　　辞

本研究は 2001 年 4 月から 2006 年 1 月までの 4 年 9 ヶ月間に，課程博士の学位請求論文として，北海道大学大学院農学研究科在学中に行われたものである。研究開始当初より，御指導，御鞭撻を賜った北海道大学大学院農学研究科，野口伸教授に衷心より感謝の意を表する。また，本研究の取りまとめにあたり，終始懇切なる御指導と本論文の御校閲を賜った北海道大学大学院農学研究科，端俊一教授ならびに同大学大学

院同研究科，谷宏助教授，同大学大学院情報科学研究科，小野里雅彦教授に深謝する。さらに，研究や実験を遂行する上で有益な御助言，御協力を頂いた北海道大学大学院農学研究科，寺尾日出男名誉教授ならびに同大学大学院同研究科，石井一暢助手に謝意を表する。

本研究の一連の実験に際して，ヘリコプタのオペレータとしてご協力頂いた株式会社ヤンマーヘリサービス，樋口広樹氏，浦山昌己氏に深く感謝する。

2004年7月と2005年7月に行った第Ⅳ章に関する実験では，株式会社ズコーシャの丹羽勝久氏，横堀潤氏に共同研究者として御協力頂いた。また，2005年4月に行った第Ⅴ章に関する実験では，財団法人北海道農業近代化技術センター，南部雄二氏，山崎祐樹氏に御協力頂いた。ここに記して感謝の意を表する。さらに，実験，解析その他に御協力頂いた北海道大学大学院農学研究科農用車両システム研究室の皆様に心から感謝する。

量記号一覧

$\boldsymbol{A}$ ：I^v(p)の係数（3×3の対称行列）
AI ：環境光量を示すデジタル値 ［−］
a_k，b_k ：フーリエ係数 ［−］
$\boldsymbol{B}$ ：$I^v(\boldsymbol{p})$の係数（3次元列ベクトル）
C ：$I^v(\boldsymbol{p})$の係数（スカラー）
C_0〜C_5 ：イメージングセンサの光学特性を示す係数 ［−］
c_1 ：第1放射定数 ［W・cm^{-2}・μm^{-4}］
c_2 ：第2放射定数 ［μm・K］
d ：センサの光学中心から画像データのマッピング地点点までの距離［m］
D ：試験区の面積 ［m^2］
d_H ：補間点からサンプル点までの水平距離 ［m］
$\boldsymbol{d}_L$ ：ピクセル投影ベクトル ［m］
E ：サーモトレーサで受光できる黒体放射エネルギ ［W］
E_a ：測定対象物の環境反射エネルギ［W］
E_c ：測定対象物の放射エネルギの推定量 ［W］
E_o ：測定対象物の放射エネルギ ［W］
E_r ：t_rから得られるエネルギ ［W］
E_S ：サーモトレーサに入射したエネルギ ［W］
E_S’ ：見かけ上の入射エネルギ ［W］
Exp ：露光時間を示すデジタル値 ［−］
E_ε ：放射率 ε の物体の放射エネルギ ［W］
e_{FPE} ：FPE値 ［−］
$e_{lat(i)}$ ：レンズ歪みによる横方向の位置誤差 ［pixel］
$e_{lon(j)}$ ：レンズ歪みによる縦方向の位置誤差 ［pixel］
e_M ：参照地形からの形状誤差 ［m］
e_{yaw} ：GDSの方位角とIMUの方位角の偏差 ［deg］
$F_{IDW}(s)$ ：地形データ V_c を用いたIDWによる補間曲面 ［m］
$F_R(u, v)$：縮退画像の濃度値 ［−］
$F_S(u, v)$：ガウスフィルタによる平滑化画像の濃度値 ［−］
f ：フーリエ級数近似
f_P ：三角ポリゴン S の集合
f_P^M ：f_P から M 点削減した場合の地形形状
$f_T(t)$ ：温度からエネルギへの変換式
$G(i, j)$ ：2次元ガウス関数
$Gain$ ：CCDゲインを示すデジタル値 ［−］
$\overline{GL}$ ：全ピクセルの平均濃度値 ［−］
GL_{max} ：濃度値の有効範囲（最大値） ［−］
GL_{min} ：濃度値の有効範囲（最小値） ［−］
$G_{MODTRAN}(d, t_a, h_a)$：MODTRANによる透過率算出アルゴリズム
h ：ヘリコプタの対地高度 ［m］
h_a ：環境湿度 ［%］
h_T ：補正後の高度 ［m］
$I_M(s)$ ：$F_{IDW}(s)$と$\Gamma^z(s)$の差分 ［m］
$I^v(\boldsymbol{p})$ ：任意点 $\boldsymbol{p}$ から S_τ 平面への距離の2乗和 ［m^2］
$J(\boldsymbol{\kappa}_1)$ ：レンズキャリブレーションのための評価関数
k_b ：凸包の境界線を構成する頂点の個数 ［−］
L ：ピクセル投影直線

L_d　：レーザ距離計の出力値　[m]
L_{res}　：空間分解能　[m]
M　：データ削減数　[−]
$NDIV$　：正規化植生指数（NDVI）　[−]
N_E　：測量点数　[−]
N_f　：方位データの総数　[−]
NIR　：近赤外線の濃度値　[−]
n_c　：3 次元画像マッピングに用いる地形データの数　[−]
n_f　：フーリエ級数展開の次数　[−]
n_{IDW}　：IDW に用いたサンプル点の数　[−]
$\boldsymbol{n}_\tau = [n_{x(\tau)} \quad n_{y(\tau)} \quad n_{z(\tau)}]^{\mathrm{T}}$：三角ポリゴン S_τ の法線ベクトル　[m]
$\mathrm{O}(\boldsymbol{v})$　：3 つの点を通る円と別の 1 つの点との位置関係を示す関数
$\boldsymbol{p} \in E^3$　：3 次元空間上の任意点　[m]
$\boldsymbol{p}^{v_{j-k}}$　：$\boldsymbol{v}_j$，$\boldsymbol{v}_k$ 周りの $I^v(\boldsymbol{p})$ が最小となる点　[m]
$\boldsymbol{Q}_1$　：パン方向回転による変換行列
$\boldsymbol{Q}_2$　：チルト方向回転による変換行列
$\boldsymbol{R}$　：オイラー角の定義の従った回転変換行列
$\boldsymbol{R}_1$　：ロール角変化による回転変換行列
$\boldsymbol{R}_2$　：ピッチ角変化による回転変換行列
$\boldsymbol{R}_3$　：ヨー角変化による回転変換行列
Red　：赤色の濃度値　[−]
Ref_R　：赤色画像の正規化反射率　[−]
Ref_G　：緑色画像の正規化反射率　[−]
Ref_{NIR}　：近赤外線画像の正規化反射率　[−]
S　：三角ポリゴン
S_{TIR}　：サーモトレーサの受光感度　[%]
S_τ　：ある 1 つの頂点 $\boldsymbol{v}_i$ が含まれる三角ポリゴン
$\overline{S_\tau}$　：三角ポリゴン S_τ の面積　[m²]
s　：L 上の点を表現するためのパラメータ　[m]
s_M　：画像データがマッピングされる位置を示すパラメータ　[m]
t　：温度　[℃]
t_a　：環境温度　[℃]
t_c　：補正後の熱画像温度　[℃]
t_o　：測定対象物の温度　[℃]
t_r　：補正無しで撮影された熱画像温度　[℃]
$U-V$　：画像座標系
$(u,\ v)$　：画像データの座標　[pixel]
$(u_D,\ v_D)$：レンズ歪みを受けた画像座標　[pixel]
$(u_T,\ v_T)$：レンズ歪み補正後の画像座標　[pixel]
V　：地形データを元とする集合
V^*　：$\boldsymbol{v}^*$ を元とする集合
V_c　：$\boldsymbol{v}_c$ を元とする集合
$\boldsymbol{v} \in E^3$　：地形データのベクトル表現　[m]
$\boldsymbol{v}^* \in E^2$　：$\boldsymbol{v}$ の XY 平面への射影　[m]
$\boldsymbol{v}_c$　：$\boldsymbol{\zeta}_c$ の近傍 n_c 点の地形データ　[m]
$\boldsymbol{p}^*$　：$\boldsymbol{v}_i$ の XY 平面への射影　[m]
v_i^Z　：$\boldsymbol{v}_i$ の Z 方向成分　[m]
$\boldsymbol{v}_\alpha$，$\boldsymbol{v}_\beta$　：削除される点　[m]
W　：黒体の分光放射エネルギ　[W・cm^{-2}・μm^{-1}]
X'　：試験ほ場内に定義した直線軸　[m]
X_{GNDVI}　：正規化反射率を用いた GNDVI　[−]
X_{NDVI}　：正規化反射率を用いた NDVI　[−]
$X-Y-Z$：絶対座標系
$X_H-Y_H-Z_H$：ヘリコプタ座標系
$X_L-Y_L-Z_L$：センサの光学中心を原点とするローカル座標系
$X_P-Y_P-Z_P$：パン方向回転軸を含む雲台座標系
$X_T-Y_T-Z_T$：チルト方向回転軸を含む雲台座標系
$[x_c \quad y_c \quad z_c]^{\mathrm{T}}$：$X_T-Y_T-Z_T$ 系で表されるセンサの光学中心の位置ベクトル [m]
$[x_d \quad y_d \quad z_d]^{\mathrm{T}}$：$X_T-Y_T-Z_T$ 系で表されるレーザ出力点の位置ベクトル　[m]
$[x_E \quad y_E \quad z_E]^{\mathrm{T}}$：レーザ照射点の絶対位置（地形データ）　[m]
$[x_{GPS} \quad y_{GPS} \quad z_{GPS}]^{\mathrm{T}}$：GPS の計測値　[m]
$[x_H \quad y_H \quad z_H]^{\mathrm{T}}$：ヘリコプタ座標系における画像データの位置ベクトル　[m]
$[x_L \quad y_L \quad z_L]^{\mathrm{T}}$：$X_L-Y_L-Z_L$ 系で表される回転変換後の画像データの位置　[m]
$[x_L' \quad y_L' \quad z_L']^{\mathrm{T}}$：$X_L-Y_L-Z_L$ 系で表される透視変換後の画像データの位置 [m]
$[x_M \quad y_M \quad z_M]^{\mathrm{T}}$：マッピングされた画像デー

タの絶対座標　[m]
$[x_S \quad y_S \quad z_S]^T$：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　[m]
Y_{MOIS}：小麦の穂水分　[%]
Y_{SPAD}：小麦の SPAD 値　[−]
$\hat{z}$：IDW による推定地表高度　[m]
$\boldsymbol{\Gamma}(s)$：L 上の点への位置ベクトル　[m]
$\boldsymbol{\Gamma}^*(s)$：$\boldsymbol{\Gamma}(s)$の XY 平面への射影　[m]
$\Gamma^z(s)$：$\boldsymbol{\Gamma}(s)$の Z 方向成分　[m]
γ：透過率　[−]
Δh：高度補正に関するバイアス値　[deg]
Δt：補正前後の熱画像温度変化量　[°C]
$[\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]^T$：GPS アンテナからセンサの光学中心までのベクトル　[m]
$\Delta\theta$：ピッチ角補正に関するバイアス値　[deg]
$\Delta\phi$：ロール角補正に関するバイアス値　[deg]
$\Delta\psi$：方位角補正に関するバイアス値　[deg]
ε：放射率　[−]
$\boldsymbol{\zeta}_c$：最小の $\boldsymbol{\zeta}_i$　[m]
$\boldsymbol{\zeta}_c^*$：$\boldsymbol{\zeta}_c$ の XY 平面への射影　[m]
$\boldsymbol{\zeta}_i$：$\boldsymbol{v}_i$ からおろした垂線の足　[m]
$\boldsymbol{\eta}$：イメージングセンサの光学中心位置のベクトル表現　[m]
Θ：防除畝認識のためのクラスタサイズのしきい値　[−]
θ：ピッチ角　[deg]
θ_T：補正後のピッチ角　[deg]
κ_i：レンズ収差の特性を示す係数　[−]
λ：波長　[μm]
μ：イメージングセンサの画角　[deg]
$\boldsymbol{\xi}_1$：$X_P-Y_P-Z_P$ 系から $X_T-Y_T-Z_T$ 系へのベクトル　[m]
$\boldsymbol{\xi}_2$：GPS アンテナから $X_P-Y_P-Z_P$ 系へのベクトル　[m]
ρ_1：パン方向回転角　[deg]
ρ_2：チルト方向回転角　[deg]
σ^2：GDS 方位角の予測誤差の分散　[deg^2]
ϕ：ロール角　[deg]
ϕ_T：補正後のロール角　[deg]
$\boldsymbol{\chi}$：三角ポリゴン S_τ 上の点への位置ベクトル　[m]
ψ：ヨー角　[deg]
ψ_{GDS}：GDS による方位角　[deg]
ψ_T：補正後の方位角　[deg]
ω_{IMU}：IMU による方位角　[deg]

引 用 文 献

1）小貫和裕，間谷敏邦，平沢信夫，友部弘道，狩野幹夫，窪田満，木野内和夫，弓野功，滑川裕之：ヘリコプタを利用した水稲灌水土壌中直播技術に関する研究，茨城県農業試験場研究報告 31，7-20，1991
2）三原実：水稲管理作業の新技術，農機誌 59(4)，136-139，1997
3）農林水産航空協会：農林水産航空技術合理化試験結果報告，農林水産航空協会，45，2001
4）農林水産航空協会：産業用無人ヘリコプタ新分野開発試験結果報告，農林水産航空協会，10-29，2001
5）農林水産航空協会：産業用無人ヘリコプタ新分野開発試験結果報告，農林水産航空協会，24，2004
6）杉浦綾，野口伸，石井一暢，寺尾日出男：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)，農機誌 64(1)，53-61，2003
7）野口伸：米国穀倉地帯におけるプレシジョンアグリカルチャ，農機誌 61(1)，12-16，1999
8）渋澤栄：米国プレシジョンアグリカルチャへの訪問，農機誌 61(1)，7-12，1999
9）笹尾彰：農業機械学会シンポジウム「日本型プレシジョンファーミングを考える」報告，農機誌 61(1)，30-35，1999
10）井上吉雄：情報化精密農業生産管理へのリモートセンシングの応用(1)，農機誌 60(2)，139-146，1998
11）杉山純一：農産物の情報開示と IT 技術，農機誌 66(4)，16-20，2004
12）James, I. T., Godwin, R. J.: Soil, water and yield relationships in developing

strategies for the precision application of nitrogen fertilizer to winter barley, Biosystems Engineering, 84(4), 467-480, 2003

13) Hubbard, B. E., Crowley, J. K.: Mineral mapping on the Chilean-Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and hyperion imagery: Data dimensionality issues and solutions, Remote Sensing of Environment, 99, 173-186, 2005

14) Wu, J., Wang, D., Bauer, M. E.: Image-based atmospheric correction of QuickBird imagery of Minnesota cropland, Remote Sensing of Environment, 99(3), 315-325, 2005

15) Suganuma, H., Abe, Y., Taniguchi, M. Tanouchi, H., Utsugi, H., Kojima, T., Yamada, K.: Stand biomass estimation method by canopy coverage for application to remote sensing in an arid area of Western Australia, Forest Ecology and Management,(in press), 2005

16) Ning, S., Chang, S., Jeng, K., Tseng, Y.: Soil erosion and non-point source pollution impacts assessment with the aid of multi-temporal remote sensing images, Journal of Environmental Management, (in press), 2005

17) Wang, Y., Xia, H., Fu, J., Sheng, G.: Water quality change in reservoirs of Shenzhen, China: detection using LANDSAT data, Science of the Total Environment, 328, 195-206, 2004

18) Lee, H., Kim, T., Park, W., Lee, H. K.: Extraction of digital elevation models from satellite stereo images through stereo matching based on epipolarity and scene geometry, Image and Vision Computing, 21, 789-796, 2003

19) Hirano, A., Welcha, R., Lang, H.: Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 57, 356-370, 2003

20) Hinzman, L. D.: Effects of Nitrogen Fertilization on Growth and Reflectance Characteristics of Winter Wheat, Remote Sensing Environment, 19, 47-61, 1986

21) Fernandez, S.: Radiometric Characteristics of Triticum aestivum cv. Astral under Water and Nitrogen Stress, Intl. j. Remote Sensing, 15, 1867-1884, 1994

22) Bushmann, C.: In vivo Spectroscopy and Internal Optic of Leaves as Basis for Remote Sensing of Vegetation, Intl. J. Remote Sensing, 14, 3181-3190, 1993

23) Chen, S., Huang, C., Huang, C., Yang, C., Wu, T., Tsai, Y., Miao, P.: Determination of nitrogen content in rice crop. ASAE Paper No.031132, 2003

24) 志賀弘行：米・小麦の安定生産への衛星リモートセンシングの活用，農機誌，65(4)，9-12，2003

25) 丹羽勝久：土壌物理性を考慮した精密農業の研究動向，土壌の物理性，100，27-34，2005

26) Dusek, D., Jackson, R., Musick, J.: Winter Wheat Vegetation Indices Calculated from Combinations of Seven Spectral Bands, Remote Sensing Environment, 18, 255-267, 1985

27) Barnes, E. B., Pinter, J. P., Kimball, A. B., Wall, W. G., LaMorte, L. R.: Modification of CERES-Wheat to Accept Leaf Area Index as an Input Variable, ASAE Paper No.973016, 1997

28) Arai, K.: Inversion techniques for proportion estimation of mixels in high resolution satellite image analysis, Advances in Space Research, 14(3), 177-186, 1994

29) Kitamoto, A., Takagi, M.: The area proportion distribution - relationship with the internal structure of mixels and its application to image classification, Sys-

tems and Computers in Japan, 31(5), 57-76, 2000
30) 大政謙次：農業リモートセンシングの新展開，農機誌 65(4)，4－8，2003
31) 村上広史，筒井俊洋，中川勝登：ヘリコプター搭載レーザスキャナの標高計測精度とGIS への応用の可能性，国土地理院時報，89，44-55，1998
32) 飯田洋，渡辺信之，佐藤潤，小荒井衛：高分解能 SAR を利用した災害状況把握，国土地理院時報，99，49-57，2002
33) 吉川由里子，沼田洋一，大堂仲二，原田政司：道路設計業務におけるレーザプロファイラの利用，APA，79，67-74，2001
34) 沼田洋一，田村正行：レーザプロファイラによる広域樹高分布の計測手法の研究，APA，78，52-62，2001
35) Kim, J., Muller, J.: 3D reconstruction from very high resolution satellite stereo and its application to object identification, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIV(4), 420-426, 2002
36) Nakagawa, M., Shibasaki, R., Kagawa, Y.: Laser range data for building 3D urban model, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIV(4), 487-492, 2002
37) Yao, H., Tian, L., Noguchi, N.,: Hyperspectral Imaging System Optimization and image Processing, ASAE Paper No. 011105, 2001
38) Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J., Strachan, I. B.: Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture, Remote Sensing of Environment, 90, 337-352, 2004
39) Hu, B., Qian, S., Haboudane, D., Miller, J. R., Hollinger, A. B., Tremblay, N., Pattey, E.: Retrieval of crop chlorophyll content and leaf area index from decompressed hyperspectral data: the effects of data compression, Remote Sensing of Environment, 92. 139-152, 2004
40) Wood, G. A., Taylor, J. C., Godwin, R. J.: Calibration methodology for mapping within-field crop variability usingr remote sensing, Biosystems Engineering, 84(4), 409-423, 2003
41) Pateraki, M., Baltsavias. E., Recke, U.: Experiences on automatic image matching for DEM generation with Ads40 pushbroom sensor data, Proceedings of the ISPRS Congress 2004, XXXV(B2), 402-407, 2004
42) Lee, W., Searcy, S.,: Multispectral sensor for detecting nitrogen in corn plants, ASAE Paper No.001010, 1999
43) Elfaki, M. S., Zhang, N., Peterson, D. E.: Weed detection using color machine vision, Transactions of the ASAE, 43(6), 1969-1978, 2000
44) Antuniassi, U. R., Nery, M. S., Carvalho, W., Ruiz, E., Leόn, M.: Performance evaluation of an optical sensor for weed detection, ASAE Paper No.031160, 2003
45) Noh, H., Zhang, Q., Han, S., Shin, B., Reum, D.: Dynamic calibration and image segmentation methods for multispectral imaging crop nitrogen deficiency sensors, Transactions of the ASAE, 48(1), 393-401, 2005
46) Noh H., Zhang, Q., Shin, B., Han, S.: Multispectral image sensor for detection of nitrogen deficiency in corn by using an empirical line method, ASAE Paper No. 031135, 2003
47) Gomide, R. L, Tian, L., Pinto, F.: Thermal and color near-infrared spectral remotely sensed scanners to detect in-field soybean and corn water stress vari-

ability, ASAE Paper No.033127, 2003
48) Kise, M., Zhang, Q., Mas, F, R.: A Stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance, Biosystems Engineering, 90(4), 357-367, 2005
49) Aziz, S. A., Steward, B. L., Birrell, S. J., Shrestha, D. S., Kaspar, T. C.: Ultrasonic sensing for corn plant canopy characterization, ASAE Paper No.041120, 2004
50) Kim, Y., Reid, J. F., Han, S.: Evaluation of a real-time N sensing and fertilizer control, Proceedings of the ASAE meeting of Automation Technology for Off-Road Equipment, 102-111, 2002
51) Noh, H., Zhang, Q., Han, S.: Sensor based variable rate application of nitrogen by using a multi-spectral image sensor, ASAE Paper No.041133, 2004
52) Sugimori, T.: Hight density DEM as basic information of outflow analysis, CSIS Discussion Paper, 29, 27-30, 2000
53) Nath, S., Bolte, J. P., Ross, L. G..: Applications of geographical information systems (GIS) for spatial decision support in aquaculture, Aquacultural Engineering, 23(1), 233-278, 2000
54) Ehlers, M., Edwards, G., Bedard, Y.: Integration of remote sensing with geographic information systems: a necessary evolution, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 55, 1619-1627, 1989
55) Wulder, M. A.: The prediction of leaf area index from forest polygons decomposed through the integration of remote sensing, GIS, UNIX, and C, Computers & Geosciences, 24(2), 151-157, 1998
56) Paul, F., Huggel, C., Kaab, A.: Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers, Remote Sensing of Environment, (89)4, 510-518, 2004
57) Iino, A., Hoyano,: A. Development of a method to predict the heat island potential using remote sensing and GIS data, Energy and Buildings, 23(3), 199-205, 1996
58) Jokinen, O., Haggren, H.: Statistical analysis of two 3-D registration and modeling strategies, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 53, 320-341, 1998
59) 長谷川裕之：3次元GISのためのデータ作成，国土地理院時報，92，21-26，1999
60) Demirel, H.: A dynamic multi-dimensional conceptual data model for transportation applications, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 58, 301-314, 2004
61) 杉浦綾，野口伸，石井一暢，寺尾日出男：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2報)，農機誌66(6)，67-74，2004
62) Nemenyi, M., Mesterhazi, P. A., Pecze, Z., Stepan, Z.: The role of GIS and GPS in precision farming, Computers and Electronics in Agriculture, 40, 45-55, 2003
63) Welsh, J. P., Wood, G. A., Godwin, R. J., Taylor, J. C., Earl, R., Blackmore, S., Knight, S. M.: Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals (Part I): Winter Barley, Biosystems Engineering, 84(4), 481-494, 2003
64) Carrar, M., Comparetti, A., Febo, P. S.: Orlando spatially variable rate herbicide application on durum wheat in sicily, Biosystems Engineering, 87(4), 387-392, 2004
65) Thorp, K. R., Tian, L. F.: Performance study of variable-rate herbicide applications based on remote sensing imagery, Biosystems Engineering, 88(1), 35-47, 2004
66) Sowmya, A., Trinder, J.: Modelling and representation issues in automated feature extraction from aerial and satellite images, ISPRS Journal of Photogram-

metry & Remote Sensing, 55, 34-47, 2000
67) Han, S., Hendrickson, L., Ni, B.: Comparison of satellite and aerial imagery for detecting leaf chlorophyll contest in corn, Transactions of the ASAE, 45(4), 1229-1236, 2002
68) 加藤寛一郎，今永勇生：ヘリコプタ入門，東京大学出版，49-51，1985
69) Sugiura, R., Noguchi, N., Ishii, K.: Remote Sensing Technology for Vegetation Monitoring Using an Unmanned Helicopter, Biosystems Engineering, 90(4), 369-379, 2005
70) Gonzalez, R., Woods, R.,: Digital Image Processing (Third Edition), Addison-Wesley Publishing Company, 51-68, 1993
71) 杉浦綾，野口伸，石井一暢，寺尾日出男：ヘリコプタベースリモートセンシングのための飛行モニタリングシステム，農機誌 67(2)，86-92，2005
72) 安田明生：GPS 技術の展望，電子情報通信学会論文誌 J84-B(12)，2082-2091，2001
73) 浪江宏宗，萩原述史，新田信治，柴原芳信，齋藤雅之，金井嘉伸，金学進，安田明生：仮想基準局（VRS）方式による RTK-GPS の評価，電子情報通信学会論文誌 J84-B(12)，2160-2168，2001
74) Defense Mapping Agency (DMA),: The Universal grids: Universal Transverse Mercator (UTM) and Universal Polar Stereographic (UPS), DMA Technical Manual, DMATM8358.2, 1989
75) 北海道中央農業試験場，農業環境部環境保全科，土壌と土地条件に伴う総合的な排水性の改善，平成 13 年度北海道農業試験会議資料，2002
76) Lee, C., Yanai, J., Kaho, T., Iida, M., Umeda, M., Kosaki, T., Matsui, T.: Mapping of Field Information in a Paddy Field, Jounal of JSAM, 63(5), 45-52, 2001
77) Takagi, M.: Accuracy of Digital Elevation Model according to Spatial Resolution, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32(4), 613-617, 1998
78) 坪井知美，村手直明：レーザレーダによる 50 cm－DEM の作成方法と精度，CSIS discussion paper, 29, 15-18,2000
79) Ohkura, H.: Calibration of an airborne X-band interferomettic SAR system with fine DEM, Advances in Space Research, 28(1), 109-116, 2001
80) Gotsman, C., Surazhsky, V.: Guaranteed intersection-free polygon morphing, Computers & Graphics, 25, 67-75, 2001
81) Soetebier, I., Birthelmer, H., Sahm, J., Luckas, V.: Managing large progressive meshes, Computers & Graphics, 28(5), 691-701, 2004
82) 山本徹也，鈴木宏正，金井崇，木村文彦：三角形メッシュモデル細分割手法の拡張と評価，精密工学会誌 65(3)，386-390，1999
83) Berg, M. D., Kreveld M. V., Overmars, M., Schwarzkopf, O.: Computational Geometry, Kindaikagakusha, 225-258, 1997
84) Wonsk, L., Stephen, W., Searcy, S.: Multispectral Sensor for Detecting Nitrogen in Corn Plants, ASAE Paper No.001010, 1996
85) Barnes, E. B., Pinter, J. P., Kimball, A. B., Wall, W. G., LaMorte, L. R.: Modification of CERES-Wheat to Accept Leaf Area Index as an Input Variable, ASAE Paper No.973016, 1997
86) Omine, M., Shibata, Y., Toriyama, K., Sasaki, R., Kobayashi, K., Chosa, T.: Development of Real Time Telemetry System on Leaf Color of Paddy Rice Vegetations, Proceedings of 59th JSAM Annual Meeting, 325-326, 2001
87) 杉浦綾，深川知久，原令幸，石井一暢，野口伸：マルチスペクトルイメージングセンサを用いた生育診断システムの構築（第 2 報），農機誌，印刷中
88) 吉岡悠一，和田俊和：事例ベースカメラ

キャリブレーション，情報処理学会研究報告2004CVIM144，2004(40)，49-56，2004
89) Kahle, A. B., Schieldge, J. P., Alley, R. E.: Sensitivity of thermal inertia calculations to variations in environmental factors, Remote Sensing of Environment, 16(3), 211-232, 1984
90) Pratt, D. A., Ellyett, C. D.: The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology, Remote Sensing of Environment, 8(2), 151-168, 1979
91) Verhoef, A.: Remote estimation of thermal inertia and soil heat flux for bare soil, Agricultural and Forest Meteorology, 123(3-4), 221-236, 2004
92) 小林伸行，山代行記，西河琢：GPS/IMU搭載航空レーザ計測データの特徴およびその活用例，農業土木学会誌73(6)，491-492，2005
93) 小林伸行，山代行記，西河琢，吉田裕二，伊藤省三，西池義尚：航空レーザ計測による土壌水分マップの作成，第54回農業土木学会北海道支部研究発表会講演集，32-35，2005
94) Luquet, D., Begue, A., Vidal, A., Clouvel, P., Dauzat, J., Olioso, A., Gu, X. F., Tao, Y.: Using multidirectional thermography to characterize water status of cotton, Remote Sensing of Environment, 84(3), 411-421, 2003
95) Yuan, G., Luo, Y., Sun, X., Tang, D.: Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the North China Plain, Agricultural water management, 64(1), 29-40, 2004
96) Richter, R.: Atmospheric correction of DAIS hyperspectral image data, Computers & Geosciences, 22(7), 785-793, 1996
97) Wang, Y., Xia, H., Fu, J., Sheng, G.: Water quality change in reservoirs of Shenzhen, China: detection using LANDSAT data, Science of the Total Environment, 328, 195-206, 2004
98) Bramson, M. A.: Infrared Radiation (A Hand Book for Application). Plenum, 535-536, 1968

Summary

1. Introduction

Unmanned helicopters are smaller than full-scale manned helicopters and have been used primarily in agriculture, especially for chemical spraying. The number of unmanned helicopters is increasing among large-scale farmers or contractors in Japan. However, to justify the high cost of unmanned helicopters, helicopter manufacturers and farmers are seeking more ways to utilise them in agriculture. In this paper, an unmanned helicopter is proposed as one of remote sensing platforms for field monitoring. Non-contact crop sensing is one of the key issues in precision farming. Therefore, this technology would contribute to precision agriculture in Japan. If a small, readily manoeuvrable, low-altitude aerial platform (e.g., unmanned helicopter) could be introduced as a tool for crop status sensing, it would offer significant advantages over remote sensing methods. As generally known, the aerial manoeuvrability of a helicopter exceeds that of an aircraft. A helicopter can cruise any direction and vertical take-off and hover flight are also possible. These abilities provide more flexibility as well as more efficiency for remote sensing. Helicopter-captured image has high spatial resolution due to their low-altitude flight. Another benefit in using unmanned helicopters is that they can be operated by farmers themselves. It allows them to obtain imagery almost immediately. Thereby, the obtained data can be instantly used for crop production management and precision farming, such as variable rate technology.

The objective of this study is to develop a remote sensing system that can generate a precise field map of crop status and field information using an unmanned helicopter.

2. Development of the helicopter-based remote sensing system

The test imaging sensor was attached to the adjustable pan-head. The imaging sensor was a camera which contains three separate CCD planes. Special optical filters were installed over the sensors providing three video channels of red, green and near infrared. This study employed helicopter position and posture data as external sources to transform image coordinates to global coordinates. Therefore, a real-time kinematic global positioning system (RTK-GPS) was adopted as a positioning sensor, in addition to an inertial navigation sensor (INS) and a geomagnetic direction sensor (GDS). The spatial error of the image transformation was over 2m, resulting from geomagnetic warping of GDS outputs. In addition, errors in the roll, pitch angles and altitude also affected the accuracy of the transformation. Results indicated that posture data correction was required before transformation of image data. Although a GDS provides absolute direction, large errors arise from magnetic influences of mechanical and electrical systems. It is necessary, therefore, to correct GDS data, roll, pitch angles and altitude to generate a map based on the global coordinate system. A method to correct GDS output was developed. The spatial accuracy of the transformed and undistorted imagery was improved to 29cm by the developed method, a significant reduction

in spatial error. Transformation error of the images taken with the adjustable pan-head was less than 38 cm. Still, this accuracy should be acceptable for remote sensing in precision agriculture. Also, the map of the corn field was generated by the developed method.

The monitoring system to support tele-operation of this system was developed. The radio transmitter mounted on the helicopter transmits the position, posture and pan-head angles. The base station receives these data, and the helicopter status is visually displayed by the developed software. The software shows the helicopter position and orientation. When an image is obtained from the helicopter, the sensed area of a field can be expressed. Furthermore, this system provides with the status of the flying helicopter with 3-dimensional graphics. Using the monitoring system, the operator can recognize the status of the helicopter such as the position, posture and the sensed area even where the helicopter flies far away. Consequently, the developed software is very valuable for operating the helicopter.

3. Helicopter-based survey system and 3-dimentional GIS map generation

Topographical information is necessary to generate a GIS map of a field that has large elevation differences. The laser range finder was installed in the helicopter to obtain the topographic data of a field. The laser range finder can measure distance to the ground from the helicopter. Therefore, the topographic data can be calculated using the helicopter position, posture and the pan-head angles. The helicopter-based survey system developed in this research could generate topographic map with 9 cm error. This accuracy is useful for field survey. Furthermore, as compared with surveying time of the conventional method using a total station, the developed system was clearly efficient.

In this study, we developed the methods that can automatically generate triangle polygons from the topographic data set, and simplify the data maintaining accuracy. As a result of evaluating topographical feature error from the original data with simplification, even if the data was reduced by 400 points that was 79% of raw data, topographical error was less than 12cm.

The 3-D image mapping algorithm was also developed. This algorithm integrates the image data and the topographic data. The spatial accuracy of the 3-D image mapping was 41cm. This accuracy is sufficient towards precision farming.

4. Monitoring of wheat growth information by the multi-spectral imaging sensor

In order to extract the crop information by a remote sensing, the high quality image is required under the various ambient light conditions. The normalized image could be generated using ambient light intensity, CCD gain and exposure time in each captured image. This system was improved so that these parameters can be automatically adjusted during sensing. Due to this control system, the high quality image could be obtained. There are normally unplanted ridges in wheat field. The unplanted ridge in the image makes the error of the vegetation monitoring. Therefore, the algorithm which can automatically segment the unplanted ridge area was developed. In the research, the grain moisture and the SPAD value in wheat were estimated by the multiple-linear regression analysis of the sensing data and ground-truth data. The NDVI and the GNDVI calculated by the normalized reflectance were used as the explanatory vari-

able of multiple-regression models. The coefficients of determination of the grain moisture and the SPAD value were 0.77 and 0.85 respectively. This accuracy is sufficient for the crop status estimation.

The efficiency of the remote sensing was improved by obtaining wide area imagery. The wide angle lens was installed in the imaging sensor. The image obtained using this lens has large internal distortion. Therefore, the method by a polynomial approximation was adopted to correct the internal distortion of the lens. In addition, sensing large field area was ensured by changing the tilt angle of the pan-head. The field of 23,000m² could be sensed by just two images. The grain moisture and the SPAD value were estimated with 0.71 and 0.79 of the coefficients of determination. Finally, the GIS maps of the grain moisture and the SPAD value were generated. The SPAD value is used for evaluation of crop status and the grain moisture is very useful information to determine the appropriate date for harvest. Therefore, the maps generated in this study were very valuable to crop production management.

5. Monitoring of soil water content by the thermal vision

The system that can generate a map of water content on soil surface was developed using the thermal vision. The thermal vision can measure the temperature of the object by sensing the thermal infrared radiation. The thermal image obtained from the helicopter should be corrected about the thermal infrared transmissivity. In this study, the correction model about the transmissivity was introduced. Basic experiment was conducted to evaluate the correction model. If the thermal image was corrected, the accuracy of measuring temperature was 0.7℃ of R. M. S. error. The remote sensing was carried out at the puddy field that has uniform soil type. The thermal images were taken at 10 am and 3 pm on same day. And the variation of these two images was also used for water content estimation. As a result of the evaluating the correlation between thermal images and the soil water content, the coefficients of determination were 0.69 using the image taken at 10 am and 0.67 using the image of 3 pm. And the variation of two images also had correlation. In this research, the image taken at 10 am was used to generate the map of soil water content due to the highest correlation of three models. The developed system needs to calibrate with the ground-truth data. However, the water content on soil surface could be estimated by a linear-regression with a thermal image.