博士（農　学）　杉　浦　　綾

学位論文題名

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

学位論文内容の要旨

1．はじめに

産業用無人ヘリコプタは，日本の農業において主に水稲の防除作業に用いられており，その高い作業効率から普及が進んでいる。しかし，ヘリコプタのコストを考えると，防除作業のみの使用ではコストに見合う機械とはいえず機能拡大が望まれる。本研究では，精密農法(PF)への適用を念頭において，産業用無人ヘリコプタをリモートセンシングのプラットフォームとした新しい利用法を提案する。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，作物生育のばらつきを是正することを目指した農法である。その作業行程は大きく分けて，センシング，診断・意思決定，資材の可変投入の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，生産性は向上する。ここで，作物の生育状態などのセンシングに産業用無人ヘリコプタを導入できれば，極めて有効な手段となる。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十分に活用できる。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，収集した空間情報を解析してGISによってマッピングできるシステム開発を目標とした。

2．ヘリコプタベースリモートセンシングシステムの開発

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装備した。作物画像取得のために3バンド(R-G-NIR)のマルチスペクトルイメージングセンサを採用した。機体に搭載したRTK-GPSで絶対位置を計測し，慣性航法センサと地磁気方位センサ（GDS）でロール角，ピッチ角及び方位角を得た。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，取得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，2m以上の空間誤差を有していたため，姿勢角と高度について補正が必要と判断した。特に方位角が大きな誤差要因であったため，姿勢角センサによる相対方位とGDS方位との偏差を調べることでGDS誤差モデルを作成した。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，空間精度を誤差29cmまで改善し，考案した補正法が妥当であることを確認した。また，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，ほ場の正規化植生指数(NDVI)マップを作成した。

３．地形センシングと空間情報の３次元マッピング

開発したリモートセンシングシステムにレーザ距離計を搭載し，画像データに加え地形情報を取得できるようにした。まず，レーザ距離計から得られた地形データの精度評価を行った。約 10m の高低差があるほ場をセンシングした結果，9cm の精度で測量できた。また，試験ほ場の面積は 23,000m^2 であり，センシングに要した時間は約 35 分であった。比較対照した慣行の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慮すると，開発した地形測量システムは高精度でかつ高能率であった。さらに，本システムで取得されるランダムで膨大な地形データ群について精度を維持しながらデータ数を削減できるデータ処理アルゴリズムを考案した。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結果，元データの 79%である 400 点を削減しても，形状誤差を 12cm 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て 3 次元 GIS マップを作成するアルゴリズムも開発した。この結果，画像データを地形データに貼り合わせ，ほ場全体の画像と地形から 3 次元 GIS マップを作成することを可能にした。

４．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

画像データを用いて小麦の生育状態を把握するため，画像輝度値から正規化反射率を導出した。また，センシング時に CCD ゲインと露光時間を自動制御し，その後の処理に有効な画像が得られるようシステムを改良した。さらに，小麦ほ場に存在する防除畝を画像中から自動的に認識・分離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 値と穂水分を採用し，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による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，極めて高精度の推定が可能であった。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，幾何学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導入して，キャリブレーションによりレンズ歪み特性を把握した。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，SPAD 値が 0.79 と十分な推定精度を示した。

５．サーモトレーサによる土壌水分状態のモニタリング

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を開発した。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，裸地状態で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つけた状態で行った。そのため，ピクセル毎に透過率補正を行う必要があったので，透過率について熱画像補正モデルを導出した。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有効性を検証した。約 80°C の表面温度をもつ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，測定対象までの距離 50m 以内において R.M.S.誤差 0.7°C で計測できることを確認した。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，ともに十分な精度を示した。また，午前から午後にかけての温度変化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土壌表面の含水率マップを作成した。本システムを用いた場合，センシング毎にグランドトゥルースの取得とキャリブレーションが必要となるが，ここで扱った含水率の範囲であれば，地表の土壌含水率は地表面温度の線形モデルで推定できることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主査　教授　野口　　伸
副査　教授　端　　俊一
副査　教授　小野里　雅彦（北海道大学大学院
情報科学研究科）
副査　助教授　谷　　宏

学位論文題名

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

本論文は，全6章からなる総頁数131の和文論文である。論文には図86，表14，引用文献104が含まれ，別に参考論文10編が添えられている。

本研究は，産業用無人ヘリコプタ（以下，無人ヘリコプタ）の精密農業への適用を念頭において，リモートセンシングのプラットフォームとした新しい利用法の提案を目的としている。作物生産において有用な空間情報を収集・解析して，GISでマッピングできるシステムを開発し，ほ場内の空間変動を考慮した基盤整備やほ場管理の可能性を示した。以下に，論文の内容と審査結果について述べる。

1．ヘリコプタベースリモートセンシングシステムの開発

供試した無人ヘリコプタにセンサマウントとして可動式雲台を装備した。作物画像取得のために3バンド(R-G-NIR)のマルチスペクトルイメージングセンサを採用した。機体に搭載したRTK-GPSで絶対位置を計測し，慣性航法センサと地磁気方位センサでロール角，ピッチ角及び方位角を得た。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。姿勢角センサによる相対方位と地磁気方位センサの絶対方位との偏差を調べることで方位誤差モデルを作成し，幾何補正精度を誤差29cmまで向上させた。

2．地形センシングと空間情報の3次元マッピング

開発したリモートセンシングシステムにレーザ距離計を搭載し，画像データに加えて地形情報を取得できるように改良を施した，約10mの高低差があるほ場をセンシングした結果，9cmの誤差で測量できた。また，23,000m^{2}の試験ほ場において測量に要した時間は約35分であった。従来のトータルステーションによる測量では3時間以上要したことを考慮すると，開発した測量システムは高精度でかつ高能率であった。さらに，本システムで取得されるランダムで膨大な地形データ群について精度を維持しながらデータ数を削減できる

データ処理アルゴリズムを考案した。最後に，無人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て3次元GISマップを作成できるアルゴリズムも開発した。

3．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

画像データを用いて小麦の生育状態を把握するために，画像輝度値から正規化反射率を導出した。また，センシング時にCCDゲインと露光時間を自動制御することで，光環境に対して広いダイナミックレンジを確保できるよう改良した。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値と穂水分を採用し，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による推定モデルの決定係数は穂水分が0.77，SPAD値は0.85であり，極めて高精度の推定が可能であった。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。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，レンズ収差による歪みを多項式近似によるレンズ歪みモデルを作成して補正した。また，カメラに俯角を持たせた状態で撮影することで広域をセンシングでき，作業能率を大幅に向上させることに成功した。

4．サーモトレーサによる土壌水分状態のモニタリング

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を開発した。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，裸地状態でセンシングを行った。無人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つけた状態で行った。そのため，ピクセル毎に透過率補正を行う必要があったので，透過率について熱画像補正モデルを導出した。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有効性を検証した。約80°Cの表面温度をもつ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，測定対象までの距離50m以内においてR.M.S.誤差0.7°Cで計測できることを確認した。土壌含水率推定精度は決定係数が0.69で，十分な精度を示した。最後に，得られた推定モデルによって土壌表面の含水率マップを作成した。

以上のように本論文は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，収集した空間情報を解析してGISにマッピングできる完成度の高いシステムを開発した。画像データをGISと連結して空間情報として扱うことで，取得された情報の有用性は格段に向上する。現在，全国の地方自治体は電子地図化を進めており，地域のGISコンテンツとしての活用も考えられる。さらに，近年ヘリコプタベースリモートセンシングは精密農業のコア技術として注目されており，国際的にみても高いオリジナリティと学術的価値のある研究である。よって審査員一同は，杉浦　綾が博士（農学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。