

学 位 論 文 題 名

低空リモートセンシングによる
小麦生育のモニタリングに関する研究

学位論文内容の要旨

1. はじめに

北海道をはじめとする大規模な耕作地帯を中心に、生産性や作業性向上と品質管理を目的とした作物生育のモニタリングに関する研究が盛んに行われている。その代表例として、人工衛星で撮影した画像を用いた小麦生育のモニタリングがあり、生育マップを作成して施肥・防除・収穫など作業決定の支援を行っている。しかし、衛星画像の撮影は天候による影響が大きく、時期によっては画像が入手できない場合がある。また、この手法には画像ごとに多数の実測データを校正値として使用しなければならない。得られる情報の分解能や精度は必ずしも高いとはいえない。そこで、本研究は産業用無人ヘリコプタをプラットフォームとした低空リモートセンシングにより、小麦生育のモニタリングを行うシステムの開発を行った。小麦の穂水分やタンパク含有率などの生育量推定に有用な波長域を特定し、これをもとにマルチスペクトル画像を用いた生育推定を行った。さらに、このシステムと衛星リモートセンシングを併用することで、前述の衛星画像を用いたモニタリングの問題点を克服する方法論の確立を狙った。

2. 産業用無人ヘリコプタと供試センサ

プラットフォームに採用した産業用無人ヘリコプタは農薬散布用として市販されているものであるが、これらの散布機材を取り外し、飛行位置を計測できるように RTK-GPS を装備して、小麦生育のモニタリングを行うためのプラットフォーム環境に整えた。

これをベースに、2種類のセンシングシステムを開発した。まず、波長分解能が高く、350～2500nm の波長域で分光反射率が計測できる分光放射計 (ASD 社, FieldSpec3) を搭載し、小麦の分光計測を行うことができるシステムを開発した。供試分光放射計で計測される分光反射率は、日射量の変化の影響をうけることから、日射センサにより日射量変化を計測し、補正式を介することでその影響の除去を図った。

分光計測システムは波長分解能が高い反面、面的にデータを計測することが難しい。そこで、マルチスペクトルカメラ (MSIS) と環境光量センサ (AI センサ) を産業用無人ヘリコプタに搭載し、撮影画像から分光反射率を得ることができるシステムの開発を行った。MSIS は緑、赤、近赤外波長域の情報が取得でき、RS232 通信を介してバンド毎に露光時間、ゲイン、オフセットを制御できる。AI センサは画像撮影時の環境光量を上記の波長域ごとに計測可能である。

3. 分光計測器を用いた小麦生育のモニタリング

分光計測システムを用いて、小麦穂水分やタンパク含有率と関わりのある推定パラメータを、重回帰分析、主成分分析、PLS 回帰分析など多変量解析を用いることにより明らかにした。穂水分はレッドエッジ波長、950nm 付近、1350nm 付近の波長域の分光反射率と深い関わりがあり、これらの波長域の分光反射率や $NDVI$ を用いることで 1.2% の RMS 誤差で穂水分を推定できた。タンパク含有率の推定には 750nm～950nm の近赤外領域と 1400nm 付近の中間赤外領域の情報が有用であることがわかり、0.58% の誤差で推定できた。穂水分は小麦の早晩の判定と収穫順位の決定材料となり、またタンパク含有率は品質を評価する 1 つの指標となる。これらの推定を精度よく行うために有用な波長域を特定できた。

4. マルチスペクトルカメラを用いた分光反射率計測システムの制御法とデータ計測

MSIS を用いた分光反射率計測システムについて、制御法と有用性の評価を目的に静的試験を行った。あらかじめ設定した CCD ゲインのもと、広範囲の環境光量のもとで赤および近赤外領域の分光反射率を計測したが、個々の分光反射率について評価を行うことはできなかった。そこで、これらをパラメータとして、前章の結果からも小麦生育量の推定に有用であることがわかったヘリコプタ画像から計測される正規化植生指数 $NDVI_H$ について調査した。その結果、赤領域の環境光量が $45[\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}]$ 以下である暗い状態で撮影した画像から算出した $NDVI_H$ は、他の環境光量の状態と比較して値が小さくなる傾向を示した。よって、環境光量に下限値を設定した。また、赤および近赤外の CCD ゲインの比 γ を定義し、この値を 0.31 となるよう制御することで再現性のあるデータが取得できることがわかった。MSIS を用いた分光反射率計測システムによりモニタリングを行うための環境光量の条件とカメラパラメータ制御法を明らかにした。

5. マルチスペクトルカメラによる小麦生育のモニタリング

2004 年度より 3 年間、小麦登熟後期にリモートセンシング試験を行い、そこで得たヘリコプタ画像と地上実測データから穂水分、SPAD 値、子実収量、タンパク含有率の推定モデルを作成した。第 3 章で推定に有用であることがわかった波長域の情報を用いて解析を行った。穂水分は 2% ほどの誤差で推定を行うことができた。登熟後期は 1 日あたり 1.5% 程度の割合で穂水分は低下していくことから、本システムでは精度よく穂水分推定を行うことができると判断した。また、 $NDVI_H$ をパラメータとした 3 年間の穂水分推定モデルは類似しており、分布や傾向をとらえることが十分に可能であった。同様の試験を反復し、また地上実測データを最大・最小値付近からサンプリングすることで穂水分推定モデルが修正できることから推定精度の高いモデルに進化することも期待される。さらに、反射率をもとに作成した穂水分推定モデルは、情報の蓄積により年次を越えて使用でき得る可能性が見出せた。SPAD 値、子実収量、タンパク含有率については穂水分推定モデルのような傾向は確認できなかったが、精度のよい推定を行うことが可能だった。

6. ヘリコプタセンシングと衛星画像を併用した小麦生育モニタリング

衛星画像は広域情報を取得することに長けているが、多数の地上実測データを必要とし、反射率への変換には統計学的手法を用いる必要がある。そこで、同期撮影したヘリ

コプタ画像を利用して、衛星画像の分光放射輝度を精度の良い分光反射率へ変換することを試みた。その結果、レイリー散乱の影響が小さい赤および近赤外領域で分光反射率との高い相関が認められ、これらをパラメータとする NDVI についても相関が認められた。つまり、2 つのプラットフォーム間の情報の関係を導くことで、衛星画像の情報が分光反射率ベースの情報に変換できることが示された。また、変換した衛星画像の情報とヘリコプタセンシングにより作成した穂水分推定モデルを用いることにより、地上実測データのサンプル数を最小限に抑えつつ穂水分マップを作成することができた。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	野 口	伸
副 査	教 授	柴 田	洋 一
副 査	准教授	谷	宏
副 査	准教授	石 井	一 暢
副 査	准教授	海 津	裕

学 位 論 文 題 名

低空リモートセンシングによる 小麦生育のモニタリングに関する研究

本論文は、全6章からなる総頁数 102 ページの和文論文である。論文には図 36, 表 36, 引用文献 42 が含まれ、別に参考論文4編が添えられている。

北海道をはじめとする大規模な耕作地帯を中心に、土地生産性と品質管理を目的とした人工衛星を活用した作物生育のモニタリングに関する研究が盛んに行われている。しかし、衛星画像の撮影は天候による影響が大きく、時期によっては画像が入手できない場合がある。また画像ごとに多数の実測データを較正值として使用しなければならず、得られる情報の分解能や精度は必ずしも高いとはいえない。そこで、本研究は産業用無人ヘリコプタをプラットフォームとした低空リモートセンシングにより、小麦生育のモニタリングを行うシステム開発を行った。小麦の穂水分やタンパク含有量などの生育量推定に有用な光波長域を特定し、これをもとにしたマルチスペクトル画像を用いた小麦生育推定を行った。さらに、この低空リモートセンシングと衛星リモートセンシングを併用することで、前述の衛星画像を用いたモニタリング法の欠点を克服できる方法論の確立を狙った。

産業用無人ヘリコプタに RTK-GPS を装備して、小麦生育のモニタリングを行うためのプラットフォーム環境を整え、2種類のリモートセンシングシステムを開発した。まず、波長分解能が高く、350～2500nm の波長域で分光反射率が計測できる分光放射計 (ASD 社, FieldSpec3) をヘリコプタに搭載して、小麦の分光反射率計測を行うことができるシステムを開発した。分光放射計で計測される分光反射率は、日射量変化の影響をうけることから、センサにより日射量変化を計測し、補正式を介することでその影響の除去を図った。もう一つはマルチスペクトルカメラ (MSIS) と環境光量センサ (AI センサ) によって撮影画像から分光反射率を得ることができるシステム開発も行った。MSIS は緑, 赤, 近赤外波長域の情報を取得できる。AI センサは画像撮影時の環境光量を上記の波長域ごとに計測し、これら2情報から対象となる小麦の分光反射率を算出することができる。

分光放射計を用いて、小麦穂水分やタンパク含有量と関わりのある推定パラメータを、

重回帰分析，主成分分析，PLS 回帰分析など多変量解析によって明らかにした。穂水分はレッドエッジ波長，950nm 付近，1350nm 付近の波長域の分光反射率と関連があり，これらの波長域の分光反射率や $NDVI$ を用いることで 1.2% の RMS 誤差で穂水分を推定できた。タンパク含有量の推定には 750nm～950nm の近赤外領域と 1400nm 付近の中間赤外領域の情報が有用であることが判明し，0.58% の誤差で推定できた。穂水分は小麦の早晩の判定と収穫順位の決定材料となり，またタンパク含有量は品質を評価する指標となる。

MSIS を用いた分光反射率計測システムについては小麦生育量とヘリコプタ画像から計測される正規化植生指数 $NDVI_h$ の関係について調査した。その結果，光環境が大きく変化する自然環境下で MSIS による小麦穂水分やタンパク含有量の推定精度を維持するためには，赤と近赤外の CCD ゲイン比を 0.31 となるように MSIS の CCD ゲインを制御する必要があることを明らかにした。この知見に基づいて MSIS の環境光量に基づいたカメラパラメータ制御法を考案した。

2004 年度より 3 ケ年，小麦登熟後期にリモートセンシング試験を行い，そこで得たヘリコプタによる MSIS 画像と地上実測データから穂水分，SPAD 値，子実収量，タンパク含有量の推定モデルを作成した。穂水分は 1.5% 以下の誤差で推定を行うことができた。登熟後期は 1 日あたり 1.5% 程度の割合で穂水分は低下していくことから，本システムでは精度よく穂水分推定を行うことができると判断した。また， $NDVI_h$ をパラメータとした 3 年間の穂水分推定モデルは類似していることから，地上実測データを 2, 3 点サンプリングするだけで穂水分推定モデルが作成される可能性も認められた。さらに，分光反射率をもとに作成した穂水分推定モデルは，情報の蓄積により年次を越えて使用でき得る可能性が見出せた。SPAD 値，子実収量，タンパク含有量については穂水分推定モデルのような傾向は確認できなかったが，精度のよい推定を行うことが可能で，タンパク含有量は 1% 未満の誤差で推定できた。さらにヘリコプタによる低空センシング情報を衛星画像と融合して広域化できる方法論を考案した。衛星画像とヘリコプタ画像は相互変換が可能であり，衛星画像の情報とヘリコプタセンシングにより作成した穂水分推定モデルを用いることにより，地上実測データのサンプル数を最小限に抑えつつ広域の穂水分マップを作成することができた。

本研究は産業用無人ヘリコプタをプラットフォームとした低空リモートセンシングを用いて小麦の穂水分，タンパク含量などのモニタリングシステムの開発を行った。小麦の分光特性を統計的に精査してマルチスペクトル画像を用いた生育推定法を考案するとともに，この低空リモートセンシングシステムと衛星リモートセンシングを併用することで，衛星リモートセンシングの欠点を補完できる新しい融合型リモートセンシングの方法論を構築した。以上のように本研究は農地のリモートセンシング研究として高いオリジナリティとともに実際問題とも深くかかわる内容である。よって審査員一同は，半谷一晴が博士（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。