

多次元空間情報を利用した草地基盤整備に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究は牧草地の地形情報, 牧草収穫時の振動加速度情報, 牧草生育情報などを取得・分析し, これら多次元空間情報に基づいて牧草地の基盤整備を合理的に実施できる新しい工事基準・工法を開発することを目指した。

1. 牧草地に対する地形情報の取得と解析

RTK-GPS とレーザスキャナを用いて改良工事前後の地形を測量し, 地理情報システム (GIS) を利用して正確な地形マップを作成する地形測量システムの開発を行った。レーザスキャナのスキャン幅を 4, 8, 12m と変化させて測位精度を評価した。平均誤差は 4.3, 5.6, 5.0cm, 誤差の標準偏差は 5.4, 5.7, 6.3 cm を示し, レーザスキャナの測定誤差 (± 5 cm) を考慮すると農地の地形測量に十分な測位精度と判定された。地形測量時の作業時間はほ場面積 1.2ha で, RTK-GPS を搭載したロボットトラクタによる測量の場合, 74 分を要したが, レーザスキャナを併用したシステムの場合, スキャン幅 4, 8, 12m で各々 25, 15, 11 分まで測量に要する時間を大幅に削減できた。以上の結果から測量精度を考慮するとスキャン幅 12m まで十分に地形測量に使用できると判定された。さらに, 改良工事前後の地形マップの比較から工事に伴う地形の変化を把握し, 工事による移動土量の計算も精度良く行うことができた。

2. 牧草収穫作業振動と地形の傾斜が作業性に及ぼす影響

牧草収穫の作業特性として姿勢角計測装置(IMU)を用いて収穫作業中のトラクタの姿勢(ロール角, ピッチ角, ヨー角), 加速度(進行方向加速度, 横方向加速度, 鉛直方向加速度)を計測した。これらの物理量は作業者が受ける振動や姿勢変化を意味し, 作業性に影響を及ぼす空間情報である。ロボットトラクタと RTK-GPS を利用して 2m 幅で自律走行を行うことで, 正確な標高と位置情報を取得し, 高精度な地形図を作成した。さらに, 改良工事の施工基準を求めるために収穫作業時の加速度の合成ベクトルとロボットで取得した地形図から算出された傾斜角度を用いて判別分析を行なった。その結果, 正答率が 95.3%で作業性に問題がある領域を自動抽出することに成功した。開発したシステムを利用することで単純な地形の不陸や傾斜のみによる整備の必要性の評価でなく, 作業中の振動加速度をも考慮した新しい整備基準策定の可能性が示唆された。

3. ISO 振動基準による牧草収穫作業時の振動特性の解析

実際に農家で使用しているトラクタに RTK-GPS と IMU を搭載して, 牧草収穫作業時の振動加速度と位置情報を同時取得できるシステムを試作し, 位置情報の属性としてフーリエ変換した

振動強度を取得・解析した。トラクタ作業時の人間に悪影響を与える 1~10Hz の周波数に対する GIS マップを作成した。また、各周波数の振動強度が ISO 基準を超えて作業性に影響を与えるかを検討し、牧草地の機械作業性に対する評価を行った。

進行方向、横方向、鉛直方向の振動加速度をフーリエ変換し、位置情報と組み合わせることで、ほ場全面の振動強度を示す GIS マップを作成した。また、1/3 オクターブバンド中心周波数毎の 3 軸の振動加速度と ISO 2631 に規定している疲労・作業能率低下の振動強度レベルを比較することで、ほ場全体の作業時間限界に関する GIS マップも作成した。その結果、供試牧草地において振動加速度による機械作業性は、進行方向、横方向の振動加速度の場合、2.0Hz 以下で作業時間 6 分を超えると疲労や作業能率が低下することが判明した。一方、鉛直方向の振動加速度の場合は 5.0~10Hz で 1 時間以上の作業を行うと作業性が著しく悪化する結果を示した。さらに、1/3 オクターブバンドについて 3 軸振動加速度から計算した合成振動加速度に基づいて作業快適性に関する GIS マップを作成した。以上の結果から、本研究で実現した振動加速度の取得法及び空間情報としての振動加速度の周波数分析法は牧草地における機械作業性の把握と評価に極めて有効と判断された。

4. 地形情報と分光反射情報による牧草の生育診断

分光反射測定器(FieldSpec3)を使用して牧草生育のセンシングを行った。生育情報としては牧草の収量、乾物率、イネ科牧草割合、雑草割合を採用し、生育推定のグランドトゥールースとした。分光反射測定器から得られた反射率を用いて $NDVI$, $GNDVI$, $NDWI_{1640nm}$ を算出し、重回帰分析による牧草生育推定の説明変数とした。その結果、推定モデルの決定係数は牧草収量が 0.701, 牧草乾物率が 0.882, イネ科牧草割合が 0.853, 雑草割合が 0.870 で、それぞれの状態量を高い精度で推定できた。また、地形の傾斜変化率である曲率と牧草収量及び雑草生育の相関性を調べることで地形と牧草生育の関係についても検討した。曲率計算を 2×2m グリッドで行った場合、雑草割合との相関は $r = -0.902$ を示し、雑草割合が地形曲率と高い相関があった。そこで、2×2m グリッド曲率を説明変数として決定係数 0.814 の雑草割合推定モデルを作成し、雑草割合に関する GIS マップを作成した。以上の結果から、機械振動に加え雑草割合の観点からも草地を評価し、基盤整備の必要性の有無を判定できると考えられた。

5. 牧草地の地形情報を利用した基盤整備法の提案

改良工事前後の数値標高モデル (DEM) をフーリエ変換することによって、地形の空間周波数特性を調べ、改良工事基準の策定を試みた。DEM を 2 次元離散フーリエ変換(DFT)することにより、地形をしゅう曲成分と大地形成分に分離できる。ただし、2 次元 DFT を行う際には圃場面積による制約があり、抽出したい波長の 2 倍の区画を用意する必要がある。さらにその形は正方形や長方形でなければならない。また、区画の端にはしゅう曲の抽出が不安定な領域が発生し、波長に比例してその領域は広がるので、解析したい地表面より十分に広い標高データを用意する必要がある。北海道の耕地は一区画が広く、矩形であることが多いので、DFT による解析は適していると考えられるが、作業性の悪い領域が区画の端にある場合や圃場が不定形の場合は対策を施す必要がある。本研究では改良工事前の地形から 0.02~0.05[1/m]の空間波長成分を除去することによって、慣行の改良工事後の地形と高い相関(決定係数 0.7)が得られたことから、0.02~0.05[1/m]のしゅう曲を除去できるデジタルフィルターを設計ツールに採用した。開発した周波数解析を行うことで、改良工事前の地形を測定することだけで改良工事を行うべき領域の抽出や工事後の地形予測すなわち基盤整備設計が可能となった。

学位論文審査の要旨

主査	教授	野口	伸
副査	教授	長谷川	周一
副査	准教授	近江谷	和彦
副査	准教授	海津	裕

学位論文題名

多次元空間情報を利用した草地基盤整備に関する研究

本論文は、全7章からなる総頁数 130 ページの和文論文である。論文には図 74, 表 21, 引用文献 39 が含まれ、別に参考論文 3 編が添えられている。

牧草地の地形情報、牧草収穫時の振動加速度情報、牧草生育情報などを取得・解析し、この多次元空間情報に基づいて牧草地の基盤整備を合理的に実施できる新しい工事基準・工法を確立することを目指した。以下に、論文内容と審査結果について述べる。

1. 牧草地に対する地形情報の取得と解析

RTK-GPS とレーザスキャナを用いて改良工事前後の地形を測量し、GIS を利用して正確な地形マップを作成する地形測量システムの開発を行った。レーザスキャナのスキャン幅を 4, 8, 12m と変えて測位精度を評価した。平均誤差は 4.3, 5.6, 5.0cm, 誤差の標準偏差は 5.4, 5.7, 6.3 cm を示し、草地の地形測量としては十分な測位精度と判定された。地形測量時の作業時間は圃場面積 1.2ha で、ロボットトラクタによる測量の場合、74 分を要したが、レーザスキャナを併用したシステムの場合、スキャン幅 4, 8, 12m でそれぞれ 25, 15, 11 分まで測量時間を短縮できた。したがって、測量時間と測量精度を考慮するとスキャン幅 12m までは地形測量に使用できると判断した。

2. 牧草収穫作業振動と地形の傾斜が作業性に及ぼす影響

牧草収穫の作業特性として姿勢角計測装置(IMU)を用いて、収穫作業中のトラクタの姿勢(ロール角、ピッチ角、ヨー角)と加速度(進行方向、横方向、鉛直方向)を計測した。これらの物理量は作業者が受ける振動や姿勢変化を意味し、作業性に影響を及ぼす空間情報である。ロボットトラクタと RTK-GPS を利用して、2m 幅で自律走行を行うことで高精度な地形図を作成した。さらに、改良工事の施工基準を求めるために、収穫作業時の振動加速度の合成ベクトルとロボットで取得した地形図から算出された傾斜角度を用いて判別分析を行なった。その結果、作業者が作業性に問題があると指摘した領域を正答率 95.3% で自動抽出することに成功した。

3. ISO 振動基準による牧草収穫作業時の振動特性の解析

実際に農家が使用しているトラクタに RTK-GPS と IMU を搭載して、牧草収穫作業時の振動加速度が取得できるシステムを試作した。フーリエ変換によって振動加速度を周波数毎の振動強度に変換し、トラクタ作業時の人体に悪影響を与える 1~10Hz の周波数に対して GIS マップを作成した。また、各周波数の振動強度が ISO 基準を超えて作業性に影響を与えるかどうかを評価・検討した。車両の振動加速度をフーリエ変換することで圃場全面の振動強度、作業時間限界、作業快適性の分布を GIS マップで表現し、人体への影響面から圃場空間を評価できる方法論を確立した。すなわち、本研究で実現した振動加速度の取得法及び周波数分析法は牧草地における作業性の把握と評価に有効と判断した。

4. 地形情報と分光反射情報による牧草の生育診断

分光反射測定器を使用して牧草生育のセンシングを行った。生育情報としては牧草の収量、乾物率、雑草割合などを採用し、生育推定のグランドトゥルースとした。分光反射測定器から得られた反射率を用いて *NDVI*、*GNDVI* などを算出し、重回帰分析により牧草生育推定を行った。その結果、推定モデルの決定係数は牧草収量が 0.701、牧草乾物率が 0.882、雑草割合が 0.87 であった。また、地形の曲率計算を 2×2m グリッドで行った場合、曲率と雑草割合間で高い相関を示したことから、地形曲率を説明変数とした決定係数が 0.82 の雑草割合推定モデルを作成した。以上の結果から、雑草割合といった牧草の質の観点からも牧草地を評価し、整備の必要性の有無を評価できると判断した。

5. 牧草地の地形情報を利用した基盤整備法の提案

改良工事前後の DEM をフーリエ変換することで、地形の空間周波数特性を調べることで改良工事法の開発を試みた。改良工事前の地形から 0.02~0.05[1/m] の空間波長成分を除去することによって、慣行の改良工事後地形と高い相関(決定係数 0.7)が得られたことから、0.02~0.05[1/m] のしゅう曲を除去できるディジタルフィルターを設計した。開発した設計法を用いた場合、改良工事前の地形を測定するだけで改良工事を行うべき領域の抽出や工事後の地形予測すなわち基盤整備設計が可能となる。

以上のように本論文は牧草地の空間情報を取得・解析して、これら多次元空間情報に基づいて牧草地の基盤整備を合理的に実施できる新しい工事基準・工法を開発したものであり、高い学術的価値とオリジナリティがある。今後、行政機関は本手法に基づいた新しい基盤整備基準を策定する予定である。よって審査員一同は、姜 太煥が博士(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。