

論文の内容の要旨

生物環境工学 専攻
平成 27 年度博士課程 入学
氏 名 鄧 博慶
指導教官 細井 文樹

論文題目：

小型 UAV を用いた植物群落の 3 次元リモートセンシングと生育パラメータの精度評価

リモートセンシングにより植物生育の成長パラメータを高精度で評価することは重要な課題である。Airborne-Lidar(Light Detection and Ranging)を用いた植物の 3 次元計測がこれまで行われており、形状、植物冠高、バイオマス量などの計測に適用されてきた。しかしながら、適切な時期に計測を行うことが難しく、コスト的な問題もあった。一方、技術の進歩により、UAV(Unmanned Aerial Vehicle)-Lidar や UAV-SfM(Structure from Motion)による 3 次元計測が可能になってきた。UAV-SfM の利点は、UAV-Lidar による方法に比べ低コストで画像取得の操作が簡単なこと、3 次元情報と色情報の複合解析が容易なこと、低高度で高空間解像度の計測が可能なことなどがあげられる。

植物群落の 3 次元リモートセンシングでは、複雑な形状を持つ植物自体の計測の問題だけでなく、地表面の傾斜や凹凸が 3 次元計測の精度に影響を与える。しかしながら、これまで、UAV-SfM を用いた植物群落や地表面の高精度計測方法の検討は不十分であった。そこで、本研究では、イネ群落、カラマツ群落、サツマイモ群落などを対象として、UAV-SfM を用いた地表面や植物群落の高精度計測法について検討し、その精度検証を行った。特に、サツマイモ群落については、マルチで覆われた畝で生育するサツマイモ群落の全生育期間にわたる生育パラメータの高精度計測法とその精度検証について検討した。

本論文は全 5 章構成になっている。第 1 章の序論では、植物群落の 3 次元リモートセンシングに関する研究の背景を述べた後、UAV-SfM を用いた植物群落の 3 次元リモートセンシングの原理について説明した。そして、UAV-SfM による植物自体の計測の問題や地表面の傾斜や凹凸の問題など、高精度で、植物群落を 3 次元計測する際の問題点や UAV-SfM による植物生育パラメータ計測に関する既往の研究をまとめた。

第 2 章では、UAV による撮影方法やイネ群落の 3 次元モデリング法とその精度評価に関する研究について述べた。SfM などの 3 次元構築アルゴリズムの進歩により、UAV で得られた連続画像から農作物の 3 次元生育モニタリングが可能になってきた。既往の研究では、

水田で生育しているイネなどの農作物の3次元モデル構築のための UAV からの撮影やモデル構築の方法と精度の問題について、十分な検討がなされていなかった。そこで、UAV からの撮影方法について、茨城県つくば市の水田において、DJI Phantom 3 Professional に搭載されたビデオカメラの動画を用いて検討し、3次元モデル構築のための撮影方法やモデル構築の方法、及びその精度検証を行った。具体的には、UAV の計測区域内 (約 50 m x 50 m) に基準点を設定し、GCP(Ground Control Point)に GNSS (Global Navigation Satellite System) の地理情報データを記録し、解析に使用した。また、飛行高度を地上約 10 m、計測データは Full HD (1920Hx1080V 60FPS(Frames/s))で録画をした。そして、録画した動画から、異なるサンプリングレートで作出した静止画群を用い、また、市販のソフトウェア(Agisoft Photoscan)と自作のプログラムにより、SfM による 3次元モデル構築の精度と計算時間や画像オーバーラップなどの関係について検討した。具体的には、1秒当たり 6枚から 0.6枚までの 5種類のサンプリングレートの静止画を用いた。また、イネの高さや周辺の農道、水路、通路や区画境界のコンクリートなどの巻尺での実測寸法との比較により、水平方向 (X-Y 軸) と垂直方向 (Z 軸) の精度検証を行った。その結果、水平方向の平均平方二乗誤差 RMSE (Root Mean Square Error) で 12.8cm、垂直方向の RMSE で 7.3cm と、高い精度での計測ができた。また、SfM の解析においては、サンプリングレートを大きくとり、9枚以上の画像のオーバーラップ枚数を確保することが、精度向上の重要な要因であった。

第3章では、カラマツ群落の地表面と樹冠高の推定方法とその精度評価に関する研究について述べた。UAV-SfM による従来の研究報告では、森林の植物冠高の推定精度が悪く、地表面を含めた高精度な 3次元モデルの構築法の検討と精度検証が必要であった。そこで、カラマツ群落を対象とし、地表面を含めた 3次元モデルの高精度構築法を検討し、その精度検証を行った。その際、異なる焦点距離レンズを用いて計測し、高精度 3次元モデル構築のための計測の最適条件を見出すことを目的とした。実験場所は茨城県つくば市国立環境研究所生態系研究フィールドⅡのカラマツ林である。この群落を精度約 5 cm のレーザー距離計(FG21-HA, RIEGL)により計測したところ、平均樹高は 14m であった。DJI S1000 に、有効画素数、約 1800 万画素の一眼レフデジタルカメラ(EOS kiss X7, Canon)を搭載し、飛行高度地面から約 30m で撮影した。その際、1秒1枚にカメラの撮影間隔を設定し、また、GNSS 座標更新もカメラのシャッターに同期させて1秒1回で行い、カメラが移動軌跡を記録した。撮影は、シャッター優先とし、シャッタースピードは 1/1000 秒、絞りを自動調整するモードに設定した。レンズは、28 mm、35 mm、50 mm の 3種類を使用した。そして、SfM により得られた 3次元高密度点群画像から、逆距離加重法 IDW(Inverse Distance Weighting)とポリゴン法の 2つの方法を用いて、DSM(Digital Surface Model)画像を作成した。しかし、地表面に傾斜があると、DSM からは正確な植物冠高が得られない。このため、3次元高密度点群モデルから地表面データを抽出し、DTM (Digital Terrain Model)を作成し、DSM から DTM を差し引くことにより地表面の影響を除去した 3次元植

物冠高モデル DCHM (Digital Canopy Height Model)を作成した。そして、樹木毎の最高点を抽出し、植物冠高を求めた。植物冠高の実測値との精度検証を行ったところ、IDW による推定の方がポリゴン法による推定よりもどの焦点距離のレンズを用いても高い精度で計測できることがわかった。精度が一番よかったのは、IDW 法と 28 mm のレンズの組み合わせの結果で、RMSE が 47 cm であった。オーバーラップ枚数はレンズの焦点距離が 28 mm の時、一番多かった。レンズの焦点距離が長い高空間解像度レンズの場合は、オーバーラップ枚数を増やすために、撮影間隔を短くあるいは低飛行速度で行う必要があるが、撮影高度が低くなると樹木への接触等も懸念される。また、画像枚数が増えると撮影時間や処理時間が長くなる。実計測において支障が生じない、地面から 30m 程度での飛行高度での 28 mm のレンズでの撮影画像と IDW 法との組み合わせにより、先端が尖っているカラマツ林のような針葉樹の計測においても、RMSE で 47 cm の推定精度が得られ、既往の研究と比べても比較的良好な結果であると言える。

第 4 章では、サツマイモ群落の畝立て栽培における地表面と生育パラメータの推定方法、及びその精度評価に関する研究について述べた。実験場所と使用した UAV 及び一眼レフカメラは第 3 章と同じで、飛行高度は地面から約 30m で、レンズは 28mm と 50mm の 2 種類を使用し、6 月から 10 月まで 5 回計測を行った。栽培品種はベニアズマで、6 種類の施肥量が異なる区で栽培した。農作業との関係で、植物が栽培されている状態で地表面モデルを作成する必要がある。このため、植物の生育初期の 6 月 10 日に撮影されたカラー画像から HSV (Hue, Saturation, Value) モデルを用いて植物部分 (緑色) を除去し、更に、NxN のマスクフィルタによる拡大処理により植物の陰などを除去し、畝立て栽培された状態での地表面の 2 値化画像を作成した。この 2 値化画像と元のカラー画像をあわせて SfM 処理し、3 次元点群モデルを作成し、IDW 法を用いて DTM を作成した。その後、除去した植物や陰の部分の穴を埋めるために NxM のメディアンフィルタ (N が畝方向、M が畝に直角方向) を用いて平滑化した。そして、第 3 章の方法と同じ方法により得られた DSM から DTM を差し引くことにより、地表面の凸凹の影響を除去した 3 次元植物冠高モデル Digital Canopy Height Model (DCHM)を作成した。そして、植物毎の最高点を抽出し、植物冠高を求めた。さらに、植物葉の面積を推定するために、施肥量が異なる各区内の 1 m² の範囲における植物を対象として、3 次元ボクセルモデルの植物領域を、HSV モデルを用いて抽出し、そのボクセル数をカウントすることにより、葉面積を推定した。その際、28mm のレンズで撮影された元画像の画像空間解像度が 0.8 cm であるので、高密度 3 次元点群モデルを 1cm³ の 3 次元ボクセル(voxel)モデルに変換し、そのボクセル数をカウントすることにより、葉面積を推定した。また、比較のために、同じ範囲を対象として、2 次元カラー画像の植物領域を、HSV モデルを用いて領域抽出し、ピクセル数を数えることにより、葉面積を推定した。3 次元ボクセルモデルと 2 次元画像から得られた葉面積の推定値と実測値を比較し、精度検証を行った。また、葉面積の推定値と地上部乾物重や収穫した芋乾物重の実測値から葉面積と乾物重との関係を求め、推定モデルの誤差評価を行った。結果とし

て、植物の陰等を除去するための穴の拡大マスクフィルタでは、陰の除去に 5x5 のフィルタが最も適していた。また、植物穴を埋めるためのメディアンフィルタでは、畝方向の穴を埋めるのに最低限の大きさで、畝の形状に影響を与えない N=7、M=1 のフィルタが最も効果があった。上記により得られた結果を実測と比較し、精度検証を行ったところ、28 mm のレンズで撮影した画像から構築した DTM の畝高で RMSE が 1.28cm の精度が得られた。また、この DTM から生成した DCHM から、植物冠高を求めると、RMSE が 2.90 cm の精度であった。栽培全生育時期における植物冠高の誤差評価では、レンズの焦点距離 28 mm が 50mm に比べて良い結果が得られ、RMSE が 3.3 cm であった。葉面積の誤差評価では、3次元ボクセルモデルの方が、2次元画像求めるよりも推定精度が高く、 R^2 が 0.56、RMSE が $1237.3 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ であった。この理由は、3次元ボクセルモデルは多方向撮影画像から構築されているため、2次元画像よりも見えない領域が少なく、より多くの構造情報を反映するためと考えられる。また、葉面積と地上部乾物重の関係では、3次元ボクセルモデルの方が2次元画像よりも推定精度が高く、 R^2 が 0.63、RMSE が $86.1 \text{ g}/\text{m}^2$ であった。芋収穫量の推定では、6月29日の葉面積と収穫量との相関が他の時期に比較して高い結果 ($R^2=0.69$) が得られ、葉面積から RMSE が $125.7 \text{ g}/\text{m}^2$ で芋収穫量を推定できた。これは、推定精度が、葉の繁茂状態に関係し、繁茂が大きくなると、葉の推定精度が悪くなることが原因と考えられる。

最後に、第5章において、本論文の総括と今後の展望を述べた。