

葉面積と葉面傾斜角度分布推定のための写真測量技術の適用可能性の評価 Evaluation of photogrammetry for estimating leaf area and leaf inclination angle distribution

○中島直久* 木村賢人* 宗岡寿美* 辻修** 星山賢一**

NAKASHIMA Naohisa, KIMURA Masato, MUNEOKA Toshimi, TSUJI Osamu, HOSHIYAMA Kenichi

1. 背景と目的

スマート農業は労働力不足や気候変動などの課題に対処し、持続的な食糧生産を支える重要な方策である（井上 2023）。作物管理の現場では植物表現型に基づく近接・遠隔計測システムが普及し、収量と高い相関のある Leaf Area Index (LAI) などの指標が広く使われている (Rhymee et al. 2023)。しかし、LAI のみでは収量に及ぼす他の要因を十分にとらえられない (Thorp et al. 2010)。とりわけ葉面傾斜角度の鉛直分布は日射の取り込み効率や群落内の光合成量を規定する形態学的特性として重要であり（山本ら 2009），個葉レベルで群落構造を把握することで、LAI と組み合わせた精密な収量予測を行うことが期待できる。

そこで本研究では、写真測量技術による 3 次元モデリングによって個葉を階層化し、葉面傾斜角度と分布を推定する方法の妥当性を検証する。露地栽培のラッカセイと屋内栽培のゴムノキを対象に試験的に写真測量を試行し、各葉層で推定された葉面傾斜角度の有用性と適用可能性を評価した。

2. 方法

2024 年 8 月 22 日に露地栽培ラッカセイを対象に Structure from Motion (SfM) 写真測量用の撮影（カメラ：SONY α6400）を行った。撮影範囲は、株間 10cm, 15cm, 20cm の 3 種類の群落をそれぞれ対象とした畠中央部の約 1m×1m 区画である。同年 12 月 12 日にてゴムノキも同一手順で撮影した。葉面傾斜角度の実測では、葉の複雑な凹凸形状をとらえるため、ゴムノキにおいて一葉につき複数点をスラントメーターで計測した。3 次元モデルは Agisoft metashape (ver.2.1.3) を用いて高密度点群を作成し、Digital Elevation Model (DEM : 数値標高モデル) と Triangular Irregular Network (TIN : 三角不規則網) を作成した。GIS ソフトウェア上で各葉の平均傾斜角度を算出した。

実測傾斜角度と DEM 由来の傾斜角度を比較すると、両者は 45° 線に近い相関を示した（図 1）。したがって、DEM 由来の平均傾斜角が最も実測に近い推定値と判断した。ただし、DEM はラスター近似のため、作物群落を上・中・下層に層別した場合、中層以下では、角度推定には限界がある。そこで、3 次元表示が可能な TIN を用いて DEM の傾斜角との回帰式を導出し、層位別勾配を 2 因子配置分散分析で検証した。また、TIN は近接 3 点を結んで三角面を構成するため、点群座標の微小なノイズ（上下方向の誤差）により傾斜角が過大評価される場合がある。異常値の除去には、DEM で求めた傾斜角の標準偏差の 2 倍を閾値とし、同一位置でのこの閾値を超える TIN 傾斜角を異常値として除外し（それを scrTIN とする）、ノイズを抑制した。

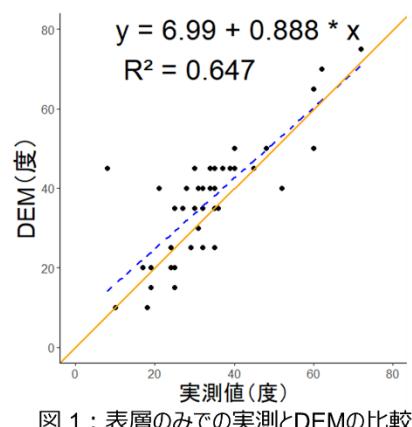


図 1：表層のみでの実測とDEMの比較

*帯広畜産大学 (Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine), **株式会社ズコーシャ (Zukosha Co., Ltd)
キーワード：精密農業、高密度点群データ、TIN モデル、L-system

3. 結果

ゴムノキでは、層（上・中・下）と推定方法（DEM, scrTIN）を固定因子とした2因子ANCOVAにより、層間での傾きの差、およびDEMと層別の交互作用項は有意にはなかった（ $p > 0.05$, 図2)。平均傾斜角の回帰係数（ β ）差はDEM=40°のとき、 $\Delta\beta = 0.9^\circ$ となり実質的な効果量の差は小さかった。

ラッカセイは撮影条件の制約により、3次元モデルは上層・中層しか作成できなかった。上層と中層における層別TINとDEMの回帰式勾配差に有意差は認められなかった（ANCOVA, $p > 0.05$, 図3)。

4. 考察

ゴムノキでは層別で交互作用が検出されず、傾斜角推定における層間差は統計的に確認できなかった。しかし、post-hoc検出力などの詳細な検証が求められるため、層間で完全に均質と断定はできない。効果量が小さいことからも、実用目的では上層の回帰式を下層に適用しても許容可能な誤差範囲に収まると判断できる。露地栽培のラッカセイも同様の傾向を示したが、中層点群のノイズが大きいことを考慮すると、上層回帰式の適用範囲は中層までに限定するべきである。

本調査では中層・下層葉における葉同士の相互遮蔽（self-occlusion）がDEM/TINいずれの推定方法でも主要な誤差要因であった。self-occlusionの補正には、対象作物の実測生長モデルを基盤とした形態パラメトリックモデル（Mark et al. 2022）が有用である。今後の研究では、実測データを取得する前段階としてL-systemを用いたソルガムの3次元生長モデルを構築した。シミュレーションで得た形態・遮蔽マップを学習データとして、形態パラメトリックモデルの推定を行う予定である。本モデルは葉片を小平面パッチで近似し、遮蔽下のパッチを補完することでself-occlusionを推定する。現在はハイパーパラメータ探索と外部検証プロトコルを設計しており、完成後に傾斜角RMSEの低減率と光合成推定への影響を報告する予定である。

本研究は(株)ズコーシャと帯広畜産大学との共同研究の一部であることを付記する。

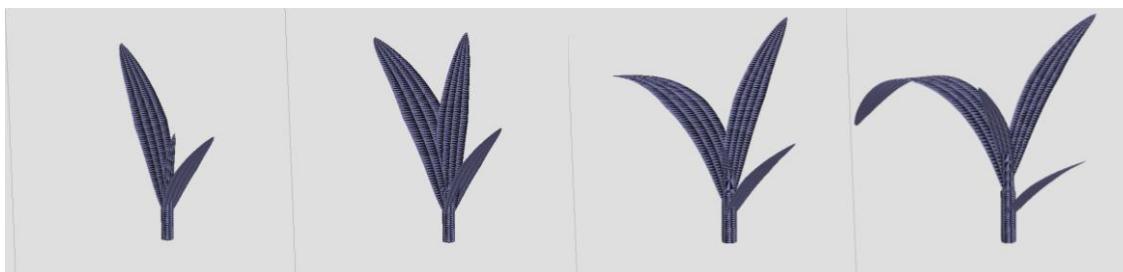


図4:Lシステムを利用したソルガムの生長モデルの構築

引用文献：井上吉雄, 日本作物学会紀事, 2023 / Hamizah Rhymee, Uditha Ratnayake, Ena Kartina Abdul Rahman, Shahriar Shams, AIP Conf. Proc., 2023 / 山本隆儀, 山形大學紀要 15:243-272, 2009 / K. R. Thorp, D. J. Hunsaker, A. N. French, ASABE 53:251-262, 2010 / E. Marks, F. Magistri and C. Stachniss, 2022 ICRA, 2022

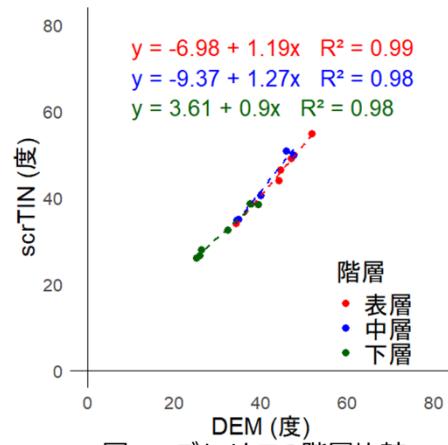


図2:ゴムノキでの階層比較

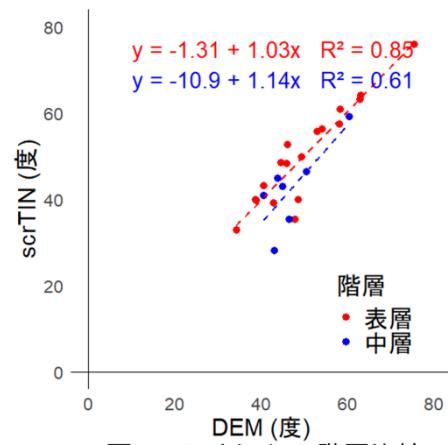


図3:ラッカセイでの階層比較