ドローンリモートセンシングによる温州ミカン圃場の樹冠情報定量化と収量予測

久井田曜陽・矢野拓

Remote Sensing from UAV for Quantifying Canopy Information and Predicting Yield in Satsuma Mandarin Orchards

YOUYOU KUIDA, TAKU YANO

大分県農林水産研究指導センター農業研究部果樹グループ
Oita Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries Research Center,
Agricultural Research Division Fruit Tree Group

キーワード：UAV（ドローン）、カンキツ、樹冠容積、樹冠抽出、
樹冠占有面積率、着色期画像、オレンジ色、二値化処理

目　次

Ⅰ　緒　言
Ⅱ　材料および方法
　1　調査概要
　2　使用機材と撮影条件
　3　年度別の調査概要
Ⅲ　結　果
Ⅳ　考　察
　1　解析手法の比較と実用性
　2　樹冠占有面積率と収量の関係および画像ごとの変動要因
　3　果実着色面積による収量予測の有効性
　4　半自動抽出手法の優位性と将来的なデータの活用
Ⅴ　摘　要
　謝　辞
　引用文献
　Summary

Ⅰ　緒　言

作物の収量は農業生産における最も重要な指標の一つであり、園芸分野においても幅広い品目で収量増加を目指した研究が長年にわたり行われてきた[1, 2]。近年、施設園芸では、植物体の形態や物質生産能力との関係解析に基づき、収量を左右する要因を明らかにする成果が報告されている（東出[3]、安藤ら[4]）。

果樹では、樹冠構造や物質生産が収量に大きく影響することが報告され（Yano *et al.*[5]）、果樹全般における物質生産と収量の関係が体系的に整理されている（平野、菊池[6]）。温州ミカンでは、果実収量と樹冠容積または樹冠占有面積との間に密接な関係があることが示されている（薬師寺[7]、小野ら[8]、橘、中井[9]）。

従来のカンキツ調査法では、樹冠容積を７かけ法（長径×短径×高さ×0.7）により近似的に算出し、樹冠面積は多方向から樹体半径を測定し、半球として求める方法が用いられてきた[10]。しかし、これらの地上計測は大規模園地や複数圃場で調査する場合、作業負荷が大きく、さらに、栽培環境が異なる圃場や品種を対象に長期間継続して調査することは難しい。一方で、永年作物である果樹では樹齢や栽培管理、気象条件が収量に及ぼす影響を把握するために、複数年にわたる継続的な調査が重要である。

近年、UAV（ドローン）による航空撮影（以下、空撮）技術の進展により、高解像度画像を用いた果樹園モニタリングが可能となった。これに伴い、樹冠抽出や樹冠容積算出に関する研究が多く報告されている（Csillik *et al.*[11]、Han *et al.*[12]、Sun *et al.*[13]）。しかし、これらの報告の多くは、高度な解析技術と高額なソフトウェアの利用が必須となっており、導入コストや解析負荷が、現場での普及を阻む要因となっている。また、影や光条件の変化、雑草の混在（ノイズ）などが

背景分離を困難にし、解析精度に影響を及ぼすことも指摘されている。これらの技術的・経済的な課題は、既存技術を現場に適用する際の主要な検討事項である。

本研究は、リモートセンシング技術を活用し、温州ミカン圃場における樹冠情報の定量化および収量予測技術の実用性を明らかにすることを目的とした。この目的を達成するため、３年間の調査を通じて、樹冠構造の三次元把握から、解析の自動化・簡易化、そして最終的な実用性を重視した手法へと、解析アプローチを段階的に転換して検討した。その結果、得られた収量予測指標の有効性を報告する。

Ⅱ　材料および方法

１　調査概要

大分県国東市の果樹グループ場内圃場および大分県杵築市の現地生産圃場において温州ミカンを対象に調査を行った。各年度の空撮条件に基づき、取得したRGB 画像を解析に用いた。

２　使用機材と撮影条件

空撮機材は DJI 社製 P4 Multispectral を使用し、本機に搭載されている RGB カメラで撮影した画像のみを解析対象とした。撮影は、計測撮影領域モードによる自動航行で実施し、地図上で指定した範囲に応じて画像を取得した。飛行高度およびオーバーラップ率（画像間の重複割合）は、各年度の解析目的に応じて設定したため異なる（詳細は３項に記載）。飛行速度と撮影間隔は指定された飛行高度とオーバーラップ率に応じて機材の機能により自動的に最適化された。撮影は、共通して曇天日の日中（10:00～15:00）に実施した。

３　年度別の調査概要

【2022 年度：3D 点群解析による樹冠容積の推定】

樹体構造の立体的な把握と従来の地上計測手法との比較を目的として、Structure from Motion（SfM）処理による 3D 点群解析を実施した。調査は果樹グループ場内圃場（2.9～4.6 度の緩傾斜地）に植栽された田口早生の 20 年生を用いた。空撮は、飛行高度 15m、オーバーラップ率 80%で実施した。空撮画像から樹冠形状の抽出および容積を算出した。解析には、農研機構が開発した「FieldReconst - 3 次元再構成ソフトウェア」[14] および無償公開ソフトウェア「CloudCompare」[15] を用いて、点群データおよびオルソ画像（幾何学的ひずみを除去した圃場全体画像）を生成した（図１）。空撮航路内にはスケール調整用の基準板を設置し、SfM 処理後のスケーリングに利用した。点群上からは、樹冠の南北・東西方向の径および樹高を抽出した。これらの推定値と地上実測値との比較を行い、各項目の一致度を相関係数により評価した。

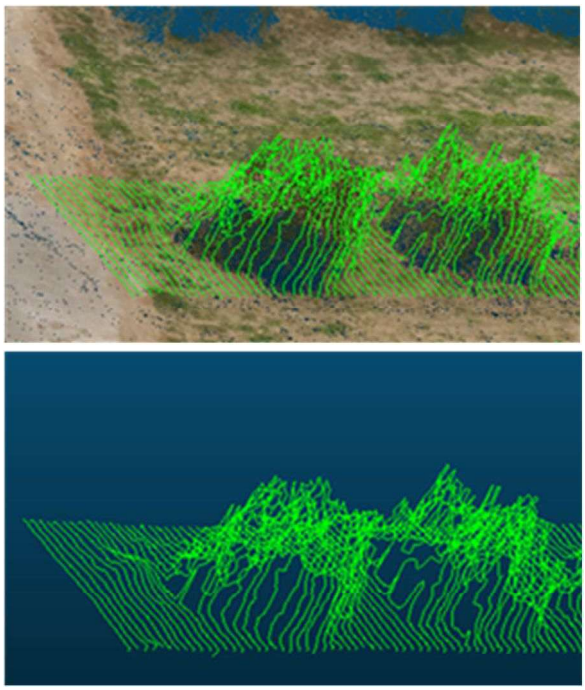


図１　SfM 処理による３Ｄモデルとメッシュデータ

下：メッシュデータのみ表示（緑線：10cm 間隔の断面図表示）

【2023 年度：AI モデルによる樹冠抽出の簡易化と自動化の検討】

樹冠領域の抽出（以下、樹冠抽出）処理の簡易化および全自動抽出（AI モデルが人間の介入なしに樹冠領域を検出・抽出する処理）を目的として、AI モデル「Segment Anything Model（SAM）」（Kirillov *et al.*[16]）を活用した画像解析を行った。本モデルは、事前学習済みの汎用抽出モデルであり、ゼロショット（事前学習済みモデルによる未学習対象の自動抽出）で樹冠抽出を行うものである。供試樹は果樹グループ場内圃場に植栽された田口早生 21 年生、宮川早生 11 年生、尾崎温州 10 年生を用いた。空撮は、飛行高度 15m、オーバーラップ率 80%で実施した。これは将来的な SfM 処理による三次元解析の可能性に備え、点群生成に必要な高い画像重複度を確保するためである。しかし、本解析の目的である二次元の樹冠抽出においては、画像データ量を半分にすることで解析負荷を軽減できるため、解析にはオーバーラップ率が約 40%となるように画像を選択して供試した。解析では、SAM のマスク生

成機能（対象領域を画像上でマスク表示する処理）を用いて樹冠と背景の分離を行い、RGB 画像上で樹冠抽出した。抽出精度の向上を目的として、以下の主要パラメータを組み合わせて調整し、複数回の抽出処理を行った。

① points_per_side：検出精度の粗さを調整
② pred_iou_thresh / stability_score_thresh：信頼度の低いオブジェクト（AI が検出した個々の対象領域や物体）の除去
③ crop_n_layers / crop_overlap_ratio：クロップ処理（画像を分割し、その領域ごとに解析を行う処理）による重複検出の回避

【2024 年度：実用的な収量予測指標の評価と半自動抽出手法の構築】

AI アシスト機能を用いた半自動抽出手法（AI の補助的な検出機能を利用し、人の目による選択・確認・修正を行うことで樹冠抽出する手法）の構築と、実用的な収量予測指標の有効性を評価することを目的とした。大分県杵築市に位置する生産圃場 10 圃場を調査対象とした。供試樹は 13～34 年生に該当し、すべて成木とみなした。調査対象は、いずれも調査期間中、樹冠構造がほぼ均一な状態であった圃場であり、品種が単一で複数品種が混在していないものとした（表１）。空撮は、飛行高度 30m、オーバーラップ率 30%で実施した。この設定は、広域の現地圃場を効率的に撮影し、データ量を削減するためであり、特に三次元解析が不要な二次元解析においては過剰な重複を避けることを意図した。画像解析には、AI アシスト機能を搭載した画像処理ソフトウェア「AnyLabeling」（Nguyen[18]）を使用した。RGB 画像に含まれる圃場外領域（隣接する道路や他の樹木など）を手動で除外し、SAM の軽量版モデル「MobileSAM」（Zhang *et al.*[19]）による AI アシスト機能を用いて樹冠領域を半自動的に抽出した。抽出されたマスク情報をもとに、Python スクリプトにより画像毎の樹冠領域のピクセル数を計数し、樹冠占有面積率（画像上の樹冠領域が占める割合（%））を算出した。なお、空撮時に自動出力される圃場面積情報を用いれば、樹冠占有面積（絶対値）も算出可能である。画像ごとの樹冠占有面積率の平均値を圃場単位の指標として採用した。圃場ごとの単収（kg/10a）は、2024 年度産の収穫終了後に生産者から収穫量を聞き取り、空撮と同時に自動出力される圃場面積情報から、算出した。樹冠占有面積率と収量との相関係数を算出し、単回帰分析により収量予測指標としての有効性を評価した。

他方、高い精度の収量予測指標が期待されたため、空撮時に果実が完全に着色していた圃場（D～G）において、果実着色面積の算出を試みた。樹冠占有面積率の算出に使用したマスクをもとに、画像内の樹冠領域のみを切り出し、該当領域に対して HSV 色空間（色相 Hue、彩度 Saturation、明度 Value）による二値化処理（条件に基づき画素レベルで分類する処理）を行った。なお、抽出条件の設定にあたっては、複数の画像を用いて色相･彩度･明度の閾値を段階的に変更しながら、果実部分が適切に抽出されるかを目視で確認した。その結果、最も抽出精度が高いと判断された色相 10～30、彩度 100～255、明度 100～255 の範囲を最終的な抽出条件とした。この範囲に該当する画素を果実着色領域（オレンジ色領域）として抽出し、オレンジ色割合（%）は、樹冠領域内の総画素数に対するオレンジ色画素数の比率として算出した。

表１　調査圃場概要

圃場	収穫時期による分類 z	樹齢	樹齢による区分 y	備考
A	極早生温州	19, 29 年生	第２期	圃場に樹齢の異なる樹が混在
B	極早生温州	詳細不明	第２期	
C	早生温州	詳細不明	第２期	
D	早生温州	16 年生	第２期	欠損（枯死）樹が点在
E	早生温州	16 年生	第２期	欠損（枯死）樹が点在
F	早生温州	16 年生	第２期	欠損（枯死）樹が点在
G	早生温州	16 年生	第２期	欠損（枯死）樹が点在
H	普通温州	詳細不明	第２期	
I	普通温州	詳細不明	第２期	圃場内で部分的に間伐実施
J	普通温州	16 年生	第２期	欠損（枯死）樹が点在

z「話題の柑橘 100 品種」（松本ら[17]）を参照し、記載のない品種は、その品種の基となった品種（枝変わり等）に準じて分類した。

y 薬師寺（1970）「樹容積の増加と 1 樹当たりの収量」を参照して区分

Ⅲ　結　果

2022 年度から 2024 年度にかけて、温州ミカン圃場における樹体情報の定量化および収量予測に関する調査を実施した。各年度の解析手法の特徴を表２に示す。

以下に、各年度における解析結果を示す。

【2022 年度：3D 点群解析による樹冠容積の算出と精度検証】

Structure from Motion（SfM）処理により得られた樹冠径と地上実測値の比較結果を表３、および表４に示す。南北方向の樹冠径において相関係数 r = 0.73、東西方向の樹冠径では相関係数 r = 0.79 と、いずれも正の相関が確認された（表４）。

表２　各年度の解析手法と特徴

年度	空撮条件	解析手法	抽出対象	解析精度	作業負荷	現場導入性
2022	低高度 高重複率	樹体ごとに 手動選択	樹冠径、 樹高	樹冠径は高精度、樹高は誤差あり	高 撮影・解析に多大な人的・時間的コスト	低 導入可能性は限定的 解析処理負荷が課題
2023	低高度 低重複率	AI モデル(SAM)による自動抽出	樹冠占有面積率	背景条件により精度にばらつきあり	中 解析は自動だがモデル構築・調整に時間と専門的知見が必要。	低（現時点） 現状では低い 軽量モデル開発が必須
2024	高高度 低重複率	AI アシスト(MobileSAM)による半自動抽出	樹冠占有面積率	半自動＋目視確認により高精度抽出が可能	中 処理は簡易だが目視確認に人的コスト	高 汎用ドローンと一般的な PC 環境で調査可能

表３　3D 樹冠容積解析に用いた調査樹体・園地情報の概要（2022 年）

樹体番号	南北実測径（m）	南北推定径（m）	東西実測径（m）	東西推定径（m）	樹高実測値（m）	樹高推定値（m）	樹高誤差[z]（m）	園地位置区分[y]
1	1.8	2	1.8	1.7	1.8	1.6	0.2	下側
2	2	2.3	2.2	2.2	1.8	1.7	0.1	下側
3	1.8	1.9	2	2.1	1.8	1.6	0.2	下側
4	1.6	1.8	1.8	1.9	1.6	1.7	0.0	下側
5	1.6	1.8	2	2.1	1.8	1.6	0.2	下側
6	1.6	1.6	1.8	1.8	1.8	1.6	0.2	下側
7	1.5	1.6	1.4	1.4	1.8	1.3	0.5	下側
8	1.4	1	1.4	1.6	1.6	1.1	0.5	下側
9	2	2	2	1.9	2	1.1	0.9	中央
10	2	1.8	2	1.6	1.8	1.2	0.6	中央
11	2	1.9	2	2.2	2	1.3	0.7	中央
12	2.1	2	1.9	2	1.8	1.3	0.5	中央
13	1.8	1.7	1.8	1.5	2	1.1	0.9	中央
14	1.6	1.4	1.4	1.6	1.6	1.0	0.7	中央
15	1.6	1.9	1.4	1.6	1.8	0.8	1.0	中央
16	1.6	1.7	2	2	2	1.1	0.9	中央
17	1.8	2	1.9	2.1	1.8	1.1	0.7	中央
18	2.1	2.4	2.2	1.8	2	1.5	0.5	中央
19	2	1.9	2	2.2	2.2	1.2	1.0	上側
20	1.7	2	1.8	2.3	2.2	1.2	1.0	上側
21	1.6	1.8	2.4	2.6	2.8	1.1	1.7	上側
22	1.7	1.7	2.2	2.4	2.4	1.0	1.4	上側
23	1.6	1.6	2	2.1	2.6	1.2	1.4	上側
24	2	2.2	1.7	2	2	1.1	0.9	上側
25	2	2.2	1.8	2.1	1.8	1.1	0.8	上側
26	2.2	2.3	2.2	2.6	1.9	1.2	0.7	上側

z 樹高誤差＝実測値－推定値

y 本園地は 2.9～4.6 度の緩傾斜であり、便宜的に上側・中央・下側と区分した

表４　3D 樹冠容積解析による推定値と地上実測値の相関（2022 年度）

推定項目	実測値と推定値の相関係数（r）
南北径	0.73
東西径	0.79
樹高	−0.23

一方、樹高については相関係数 r＝ −0.23 であり、推定値と実測値の間に相関は確認されず、決定係数 R^2＝0.05 と大きなばらつきが確認された（図２）。また、SfM 処理によって生成された圃場の点群データを概観したところ、「系統的な歪み」（SfM 処理において、特に鉛直方向の計測値に誤差が生じ、モデル全体をドーム状に歪ませるものであり、ドーム効果と呼ばれる）に起因するものと推察される鉛直方向への歪みが確認された（図３）。

そのため、樹高の推定誤差を解析するため、SfM 処理における系統的な歪みが、緩傾斜の圃場内でどのように空間的に偏るかという点に着目し、調査園地の緩やかな傾斜に沿った位置区分（上側、中央、下側：表３注釈参照）ごとに樹高誤差（実測値と推定値の絶対差）を評価した。その結果、下側区分に比べて中央、上側区分で誤差が大きいことが確認された（図４）。

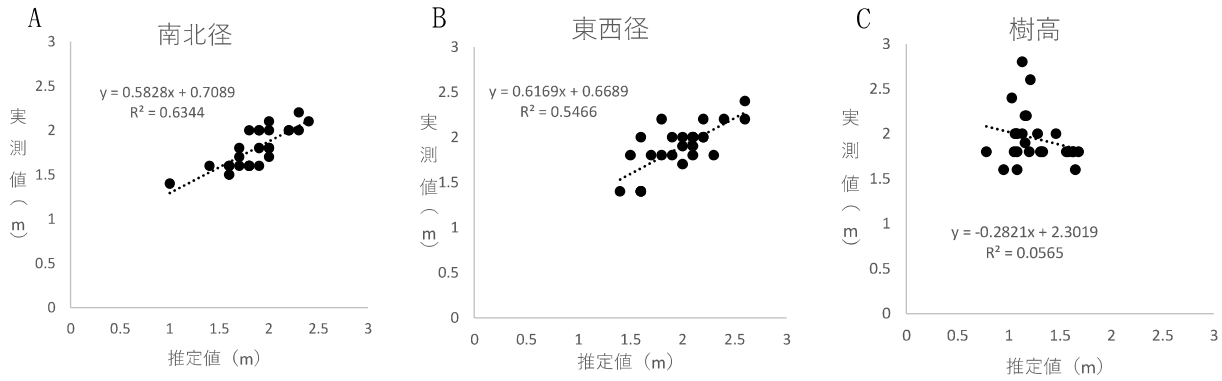


図２　南北径・東西径・樹高の実測値と推定値の散布図（2022 年度）

A：南北径、B：東西径、C：樹

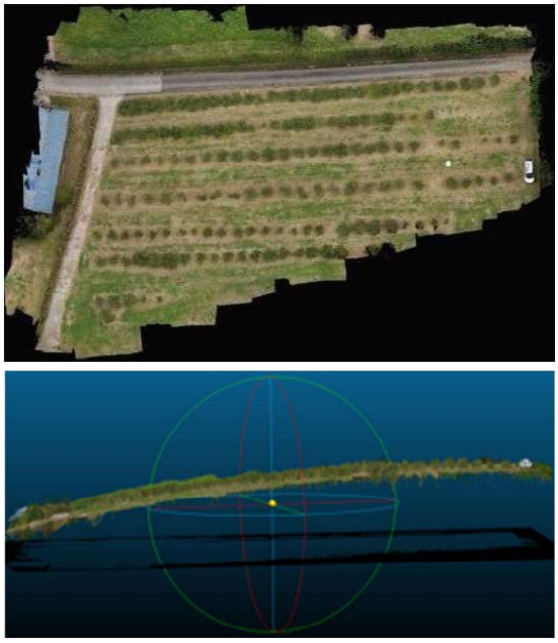


図３　SfM 処理により生成された温州ミカン圃場の点群データ（LAS ファイル）

上段：オルソ画像（幾何学的ひずみを除去した圃場全体画

下段：側面から概観した点群データの系統的な歪み

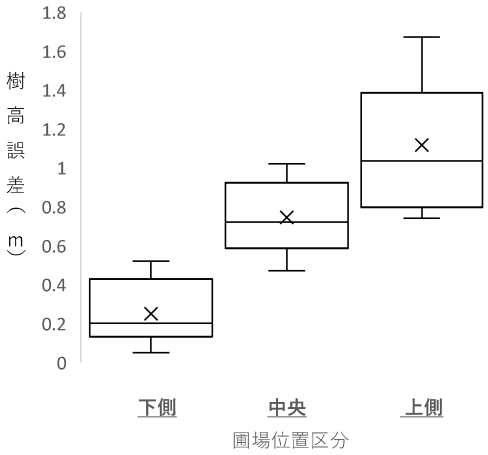


図４　圃場位置区分別の樹高誤差（箱ひげ図）

横軸:位置区分、縦軸＝樹高誤差（実測値と推定値の絶対差）

箱はデータの50%が含まれる四分位範囲（第１四分位点～第３四分位点）を示し、中央線は中央値を表す

×印は平均値を示し、ひげは最大値・最小値を表す

【2023 年度：AI モデルによる樹冠抽出の試行】

Segment Anything Model（SAM）による樹冠抽出は、樹冠と背景の色彩コントラストが明確な画像では樹冠抽出が可能であったが、影や雑草、被覆資材の干渉がある画像では樹冠抽出が不完全なケースが多数確認された（図５）。抽出精度を向上させるためパラメータ設定（材料と方法に記載した①～③）を組み合わせて調整し、試行したが、多様な圃場環境（影、雑草、被覆資材の有無等）全てに対応でき、安定して高精度な樹冠抽出する解析手法を見出すことができなかった。そのため、多様な圃場環境下で安定した樹冠抽出を実現できず、信頼性のある樹冠占有面積率を算出するには至らなかった。結果として、収量との関係を評価するための指標は得られなかった。

【2024 年度：半自動抽出による算出結果と収量予測】

AI アシスト機能を活用した半自動抽出手法により、複数圃場の RGB 画像から樹冠抽出し、樹冠占有面積率を算出した。本処理のフローを図６に示す。空撮画像から樹冠占有面積率を一連の解析手順として算出することが可能であった。

抽出された樹冠領域は、PC モニター上で明瞭に識別可能であり、影や雑草との境界が不明瞭な箇所については目視による修正を行うことで対応した（図７）。算出された樹冠占有面積率の平均値（画像単位の平均値）には、圃場管理方法や樹齢構成によるばらつきが確認された（表４）。特に、樹齢が異なる樹木が混在している圃場（A）や、間伐を部分的に実施している圃場（I）では、画像ごとの樹冠占有面積率に大きな変動が確認された（図８）。



図５ SAMによる樹冠抽出結果

上段：樹冠抽出成功例（左：空撮画像、右：樹冠抽出画像）

下段：樹冠抽出失敗例（左：空撮画像、右：樹冠抽出画像）



図６　空撮画像から樹冠占有面積率を算出する処理フロー図

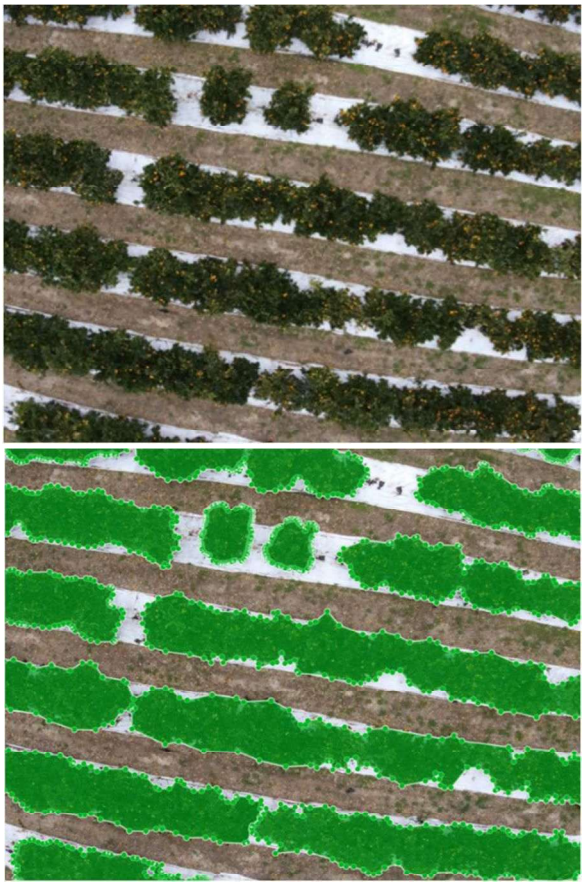


図７　空撮画像とマスク処理した画像

上段：空撮画像、下段：樹冠マスク画像（緑色：樹冠）

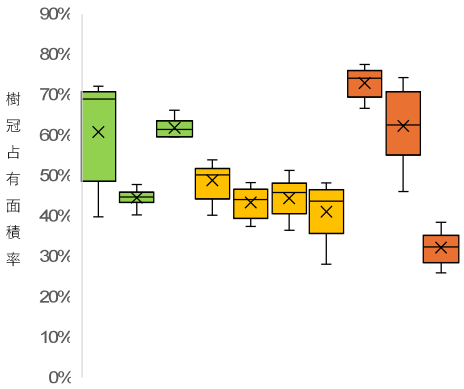


図８　各圃場の樹冠占有面積率の分布図（箱ひげ図）

極早生温州：緑、早生温州：黄、普通温州：オレンジ

樹冠占有面積率と果実収量との関係は、相関係数 r＝0.87 を示す正の相関が確認され(p<0.05 水準で有意)、単回帰分析の結果、決定係数 R^2 ＝ 0.76 が得られた（表５、図９）。

果実着色面積率（オレンジ色割合）に関する解析では、空撮時に果実が着色していた温州圃場（D～G）の画像を対象に、樹冠領域内のオレンジ色画素の抽出を行った（図 10）。オレンジ色割合と果実収量との関係を評価した結果、相関係数 r＝0.99 を示す極めて高い正の相関が確認され単回帰分析の結果、決定係数 R^2 ＝0.99 が得られた（表５、図 11）。

表５　収量予測指標の有効性（2024 年度）

比較項目	相関係数（r）	決定計数（R^2）
樹冠占有面積率と果実収量	0.87	0.76
オレンジ色割合と果実収量	0.99	0.99

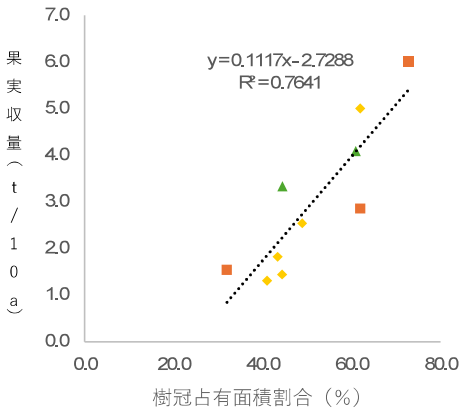


図９　各圃場の樹冠占有面積率の分布図（散布図）

極早生温州：緑、早生温州：黄、普通温州：オレンジ

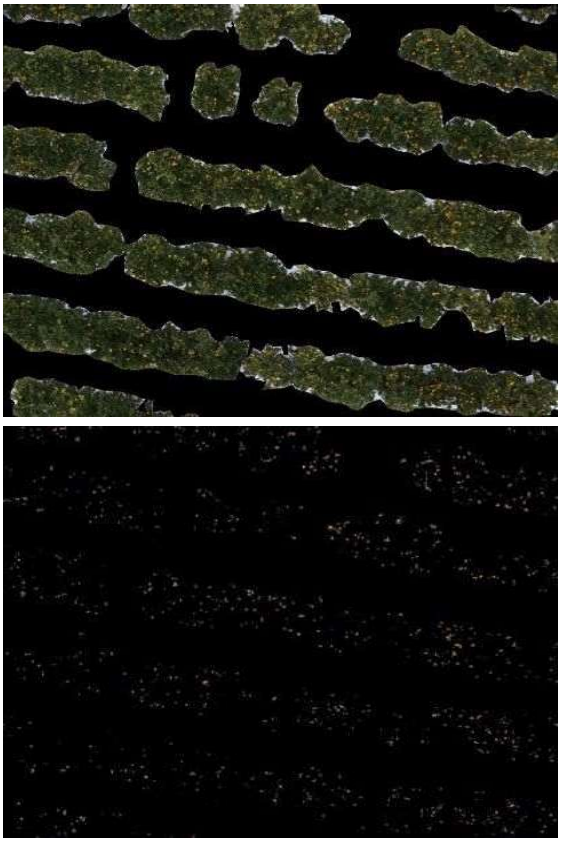


図10　果実着色抽出処理の画像例

上段：樹冠抽出画像、下段：オレンジ色抽出画像

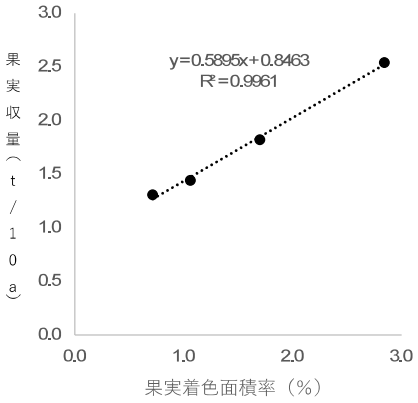


図 11　果実着色面積率（オレンジ色割合）と反収の関係

Ⅳ　考　察

本研究は、温州ミカン圃場における樹冠情報の定量化および収量予測技術の実用性を検討するため、３か年にわたり解析アプローチを段階的に転換し、技術開発を試行した（表６）。

１　解析手法の比較と実用性

温州ミカン圃場における樹冠情報の定量化と収量予測に向けたアプローチとして、三次元点群解析（SfM）、AI 全自動抽出（SAM）、および AI アシスト機能を用いた半自動抽出の 3 手法について、推定精度と現場導入性の観点から比較検討を行った。

SfM による三次元解析は、樹冠容積を推定できる利点があるものの、本試験においては緩傾斜地における樹高推定の誤差が大きく（図４）、解析にかかる計算負荷も高いことが課題として確認された。特に SfM 処理は、飛行経路や圃場の傾斜、使用する地上基準点（GCP）の配置といった要因により、鉛直方向に系統的な歪み（ドーム効果）を生じやすいことが指摘されている（James, Robson[20]）。本研究においても、この系統的な歪み（図３）が樹高推定の大きな誤差の一因となったと推察される。

SAM を用いた全自動抽出は最も省力的な手法であるが、被覆資材や雑草、影などのノイズによる誤検出を完全に排除できず、抽出精度に課題が残った。画像識別 AI の誤識別に対する修正の困難さは、 既往研究においても指摘されている[20]。ここでは、特定の誤りを修正しようとすると、モデル内の他のパラメータに影響が及び、別の正常な識別に悪影響（副作用）が生じるリスクがあることが報告されている。このことから、完全自動抽出において誤抽出をシステム側だけで完全に制御することは現状では困難であり、実用においては人の目による確認工程が不可欠であると考えられる。

表６　温州ミカン圃場における樹冠情報の定量化と収量予測技術開発を目的とした3か年の技術導入フロー

	2022	2023	2024
手法	SfM 点群解析と樹体の手動選択 →樹冠容積の算出	SAM モデルによる樹冠自動抽出 →樹冠の抽出	AnyLabeling よる樹冠半自動抽出 →樹冠占有面積率の算出
成果	樹冠径の高精度推定（長径・短径）	樹冠抽出（一部） 抽出処理の簡易化	面積率と収量の高相関 着色面積との関係 現場導入性の高い処理フロー構築
課題	樹高のバラつきあり 空撮、解析の負荷高い	樹冠抽出不安定 モデルのパラメータ設定により結果変動	目視修正の必要性

AI アシスト機能を活用した半自動抽出手法は、撮影枚数を抑えた二次元画像（RGB）を用い、人が介入して修正を行うことで、比較的低負荷かつ高精度に樹冠領域を特定することが可能であった。特に、SfM 処理に要する数時間の計算負荷に対し、半自動抽出は画像ごとの確認・修正時間を含めても短時間で処理が完了するため、現場での迅速なデータ活用に適している。この手法は、専門的な追加学習や複雑なパラメータ調整を必要とせず、汎用的なドローンと PC 環境のみで運用可能であることから、現場の技術者（普及指導員、営農指導員等）が活用しやすい。

以上のことから、現時点における現場実装技術としては、精度と作業コストのバランスを考慮すると、半自動抽出法がより適切であると判断される。

2　樹冠占有面積率と収量の関係および画像ごとの変動要因

AI アシスト機能を用いた半自動抽出により求めた樹冠占有面積率は、果実収量と正の相関（r＝0.87）を示し、果実生産力の指標として有効であることが確認された。樹冠の広がりは、物質生産の潜在的な生産能力を示すため、この結果は、樹冠の広がりが収量の指標となるという過去の報告と合致している（薬師寺[7]、小野ら[8]、橘、中井[9]）。一般的な生産圃場では樹高や樹形が概ね一定に管理されているため、本研究の結果、二次元の樹冠占有面積が三次元的な樹冠容積の実用的な代替指標として有効に機能することが示唆された。収穫時期で分類した品種間による樹冠占有面積率の平均値に顕著な差は確認されなかった（表７）。

一方で、画像ごとの樹冠占有面積率のばらつき（標準偏差）に着目すると、樹齢構成が単一な圃場に比べ、部分的補植・間伐が行われた圃場では変動が大きくなる傾向が見られた（表１、図８）。これは、欠損が局所的に集中している場合や、樹冠形状・大きさが不均一な場合には、画像単位の数値に偏差が生じるためである。このことから、平均値だけでなく、樹冠占有面積率の分布や変動幅を評価することで、圃場の均一性や欠損状況、管理状態を把握するための補助的な指標として活用できる可能性が示唆された。

今後は、こうしたばらつきの地理的な分布を評価するため、位置情報を用いた空間統計手法（空間ヒートマップ等）の導入が望まれる。この手法により、二次元的な欠損や樹冠の不均一性が圃場内のどの位置に集中しているかを定量化することが可能となる。果樹園管理における空間情報の有効性は既に指摘されており（Wang *et al.*[21]）、樹冠占有面積率の地理的分布定量化は、生育診断や、将来的には樹高や樹冠容積などの三次元情報と連携した可変施肥等の生産管理への応用が期待される。

3　果実着色面積による収量予測の有効性

着色期の画像を対象とした果実着色面積率（オレンジ色割合）の解析では、収量との間に極めて高い決定係数（R^2 ＝0.99）が確認され、精度の高い予測が可能であることが示唆された。樹冠占有面積率が園地の果実生産力を示す生育指標であるのに対し、果実着色面

表７　各圃場の樹冠占有面積率の算出結果

圃場名称	収穫時期による分類[z]	解析画像数（枚）	平均値（%）	中央値（%）	最小値（%）	最大値（%）	標準偏差
A	極早生温州	10	61	69	40	72	13
B	極早生温州	8	44	45	40	48	2
C	早生温州	6	62	61	60	66	2
D	早生温州	8	73	74	67	77	4
E	早生温州	15	49	50	40	54	4
F	早生温州	13	43	44	37	48	4
G	早生温州	13	44	46	36	51	5
H	普通温州	14	41	44	28	48	7
I	普通温州	8	62	62	46	74	9
J	普通温州	14	32	32	26	38	4

z「話題の柑橘 100 品種」（松本ら 17））を参照し、記載のない品種は、その品種の基となった品種（枝変わり等）に準じて分類した。

積は実際の着果量（結実状況）を直接的に反映しているため、より高い相関が得られたものと推察される。本手法は撮影時期が着色期に限定されるという制約はあるものの、収穫直前での高精度な収量予測を実現可能であることが示唆された。樹冠占有面積率による生育期を通じた果実生産力評価と、着色面積による直前の収量予測という、異なる時期の指標を組み合わせることで、より多角的な生産管理が可能になると考えられる。なお、着色面積の算出に用いたHSV閾値は、完全着色期を迎えた温州ミカンに特化して調整されたものであり、普遍性が検証されていない。 今後は、他品種（中晩柑等）での応用、あるいは着色初期から収穫期直前までの着色進捗に応じて、安定して果実領域を抽出するためのHSV閾値の自動調整手法の確立が、実用化に向けた重要な課題である。

4　半自動抽出手法の優位性と将来的なデータの活用

本研究で確立したAIアシスト機能を用いた半自動抽出手法は、人の介入による抽出・修正の柔軟性および樹冠形状の画素単位での正確なマスクが可能である点から、従来の地上調査の計測値と比較してより高い精度が期待できる。また、半自動処理によって蓄積された「修正済みの高精度なマスクデータ」は、将来的にAIモデルをファインチューニング（特定の用途に特化させるための追加学習）するための教師データとして活用できる。そのため、将来的な完全自動化に向けた過渡期における技術としても期待される。

Ⅴ　摘　要

本研究では、温州ミカン圃場をUAV（ドローン）で撮影したRGB画像データを対象に、樹冠情報および果実情報からの収量評価・予測技術の確立を目指し、複数の手法における樹冠・果実情報の高精度な定量化を検証した。具体的には、三次元点群解析手法（SfM）を用いた樹冠形状の定量化、AI全自動抽出モデル（SAM）による樹冠占有面積率の定量化、そしてAIアシスト機能を活用した半自動抽出手法による樹冠占有面積率および果実着色面積率の定量化を行った。三次元点群解析手法（SfM）を用いた樹冠径の算出は地上での実測値と比較的高い精度で一致したものの、樹高推定に大きな誤差が認められた。このため、SfMから算出される樹冠容積の精度も確保されず、得られた樹冠情報からの収量推定には至らなかった。AI全自動抽出モデル（SAM）においても、影、雑草、および被覆資材からの干渉がある画像からは信頼できる樹冠面積率の定量化は困難であり、結果として収量関連指標を導き出すことはできなかった。一方、AIアシスト機能を活用した半自動抽出手法では、影や雑草との境界が不明瞭な箇所をPC画面上で目視修正することで、解析手順に従って空撮画像から樹冠占有面積率を高精度に定量化することができた。この樹冠占有面積率と果実収量には高い相関が確認され（決定係数R^2＝0.76）、収量予測への活用可能性が示された。さらに、樹冠領域内のオレンジ色画素抽出による果実着色面積率は、果実収量と極めて高い正の相関が確認された（決定係数R^2＝0.99）。この結果は、果実着色面積率が収量評価の新たな指標となる可能性を示すものである。本研究の成果として、汎用ドローンと一般的なPC環境で運用可能なRGB画像解析におけるAIアシスト機能を活用した半自動抽出手法が、温州ミカン圃場における実用的な収量評価・予測技術として、今後の活用が期待される。

謝　辞

本研究にあたり、圃場調査や収量データの提供等にご協力いただいた県内生産者に、深く感謝申し上げる。また、画像解析の手法や基礎についてご指導いただいた大分県立工業高等専門学校の関係者の皆様にも、心より感謝申し上げる。

引用文献

１）農林水産省．令和5年度 食料・農業・農村白書 令和6年5月公表　（2024）．

２）日本施設園芸協会 編．施設園芸・植物工場ハンドブック　（2021）．

３）東出忠桐．施設トマトの収量増加を目的とした受光と物質生産の利用．園芸学研究　（2018）；17(2)：133–146.

４）安藤英伍・前田和也・相見直人・安東赫．キュウリ（*Cucumis sativus* L.）促成つる下ろし栽培における主枝更新のための摘心反復が収量構成要素に及ぼす影響．園芸学研究．（2025）；24 (3)：231-240.

５）Yano T，Yasutake D，Kiyosue Y．Characterization of canopy structure for high-yield performance of greenhouse-grown satsuma mandarins using direct measurements and

indirect estimations．Journal of Agricultural Meteorology（2022）；78(1)：19–30
６）平野暁・菊池卓郎　編著. 果樹の物質生産と収量.（1989）.
７）薬師寺清司. 温州ミカンの栽植密度に関する研究. 愛媛果樹試験場報告．（1970）；6：1-86
８）小野祐幸・岩垣功・高原利雄．カンキツ園の収量構成要因に関する研究．果樹試試験場報告．（1987）；D９：51-62.
９）橘温・中井滋郎．温州ミカンの密度条件における最高収量と樹冠占有面積率との関係．園芸学会昭和 59 年度秋季大会研究発表要旨．（1984）：28-29.
10）カンキツの調査方法編集委員会．カンキツの調査方法．（1987）：1-4.
11）Csillik O，Cherbini J，Johnson R，Lyons A，Kelly M. Identification of Citrus Trees from Unmanned Aerial Vehicle Imagery Using Convolutional Neural Networks．Drones.（2018）；2：10.3390/drones2040039.
12）Han L，Wang Z，He M，He X．Effects of different ground segmentation methods on the accuracy of UAV-based canopy volume measurements. Frontiers in Plant Science.（2024）；15：10.3389/fpls.2024.1393592.
13）Sun G，Wang X，Yang H，Zhang X．A Canopy Information Measurement Method for Modern Standardized Apple Orchards Based on UAV Multimodal Information. Sensors.（2020）；20：10.3390/s20102985.
14）農研機構．FieldReconst‐3 次元再構成ソフトウェア　（2018）Available at: http://cse.naro.affrc.go.jp/rsugiura/FieldReconst/ . Accessed on 2025/11/26.
15）CloudCompare Development Team．CloudCompare (version 2.12.4, Kyiv) ．（2022）；Available at: https://www.cloudcompare.org/．Accessed on 2025/11/26.
16）Kirillov A，Mintun E，Ravi N，Mao H，Rolland C，Gustafson L，Xiao T，Whitehead S，Berg A，Lo W，Dollar P，Girshick R．Segment Anything．Mata AI Research.（2023）：2304.02643.
17）松本亮司・喜多景治・向井武・大和田厚　話題の柑橘１００品種（「果樹園芸」誌 50 周年記念出版）.（1997）：25-68.
18）Nguyen V．　AnyLabeling (version 0.2.24).（2024）；Available at: https://github.com/vietanhdev/anylabeling . Accessed on 2025/11/26.
19）Zhang C，Han D，Qiao Y，Kim J U，Bae S，Lee S，Hong S．Faster Segment Anything: Towards Lightweight SAM for Mobile Applications.（2023）：2306.14289.
20）James M，Robson S，Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS.（2014）；39：10.1002/esp.3609
21）Wang Y，Jia W，Ou M，Wang X，Dong X．A Review of Orchard Canopy Perception Technologies for Variable-Rate Spraying．Sensors.（2025）；10.3390/s25164898.
22）国立情報学研究所・九州大学・科学技術振興機構．画像識別 AI の誤識別リスクを低減する技術を開発（ニュースリリース）.（2023）；Available at: https://www.nii.ac.jp/news/release/2023/0317.html ．Accessed on 2025/11/26.

Remote Sensing from UAV for Visualizing Canopy Information and Predicting Yield in Satsuma Mandarin Orchards

YOUYOU KUIDA, TAKU YANO

Summary

This study aimed to establish yield assessment and prediction techniques from canopy and fruit information by analyzing RGB images of Satsuma mandarin orchards captured by UAVs. We validated the high-precision quantification of canopy and fruit information using several methods. Specifically, these included the quantification of canopy morphology using Structure from Motion (SfM) three-dimensional point cloud analysis, the quantification of canopy coverage area using an AI fully automated extraction model (SAM), and the quantification of canopy coverage area and fruit color area using a semi-automated extraction method leveraging AI assistance.

While the canopy diameter calculated using the SfM three-dimensional point cloud analysis showed relatively high agreement with ground-truth measurements, significant errors were observed in tree height estimation. Consequently, the accuracy of canopy volume calculated from SfM data was not ensured, and it was not possible to estimate yield from the obtained canopy information. Similarly, with the AI fully automated extraction model (SAM), reliable quantification of canopy area was challenging due to interference from shadows, weeds, and covering materials in the images, thus preventing the derivation of yield-related indices.

In contrast, the semi-automated extraction method utilizing AI assistance allowed for the high-precision quantification of canopy coverage area from aerial images by enabling manual visual correction on a PC screen for ambiguous boundaries with shadows or weeds, following established analytical procedures. A strong positive correlation was confirmed between this canopy coverage area and fruit yield (coefficient of determination $R^2 = 0.76$), indicating its potential for yield prediction. Furthermore, an extremely high positive correlation was observed between the fruit color area extracted by orange pixel segmentation within the canopy region during the fruit coloring stage and fruit yield (coefficient of determination $R^2 = 0.99$). This result suggests that fruit color area can serve as a promising new indicator for yield assessment.

As a result of this research, the semi-automated extraction method, which leverages AI assistance for RGB image analysis and is operable with general-purpose UAVs and typical PC environments, is expected to be a practical technology for yield assessment and prediction in Satsuma mandarin orchards, with promising future applications.