

スマートフォンを用いたユズの葉面積指数(LAI)推定技術

西森空・中野和彦*・谷本佑**・北沢知明***

Method for Estimating Leaf Area Index (LAI) of Yuzu (*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka) using Smartphone Application

Sora NISHIMORI, Kazuhiko NAKANO*, Yuu TANIMOTO** and Tomoaki KITAZAWA***

要 約

葉面積指数(以下, LAI)をユズのせん定量の指標として活用するために, LAI 簡易推定スマートフォンアプリケーション(以下, LAI 推定アプリ)を NEC ソリューションイノベータ株式会社と共同で開発し, 測定・設定方法の検討および精度の検証を行った.

LAI 推定アプリを用いた測定は次のとおり行う. スマートフォンのインカメラに魚眼レンズを装着し, 樹冠半径の 1/2 の位置よりスマートフォンの本体上部を樹体中心に向け, 水平を保ったまま, 地表面近くからインカメラを上に向けて撮影することで推定結果が画面上に表示される. 測定方向は, 畝に直交する 2 方向からとする.

LAI 推定アプリを用いて測定した LAI は, 実測 LAI と強い正の相関がみられ, プラントキャノピーアナライザー(以下, PCA)から得られた LAI と実測 LAI との相関と同程度の精度が確認された. また, 空隙率検出閾値(二値化閾値)を機種毎に適した値に設定することで, 実測 LAI により近い LAI 値が得られた.

キーワード: 魚眼レンズ, スマートフォンアプリケーション, せん定, 二値化, PCA

はじめに

ユズ(*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka)は高知県を代表する果樹で, 県内の栽培面積は 885ha, 生産量は 9,654t¹⁾といずれも全国一の産地である. 産地では生産者の高齢化に伴う担い手不足により新規就農者の継続的な確保が求められている. しかし, ユズは隔年結果性が強く, せん定に代表される栽培管理に熟練の技術を要するため, これらが新規就農を阻害する要因のひとつとなっている.

ユズは他のカンキツ類と比較して加工用果実も高単価で取引されるため, 摘果がほとんど行われず, せん定により着果量が調節されているが, これまでせん定量が隔年結果に及ぼす影響に関する研究は行われていなかった. そこで谷本らはユズのせん定量の指標として LAI に着目し, LAI を非破壊かつ迅速に推定できる PCA の測定方法を確立し, あわせて隔

年結果を防ぐせん定量を PCA から得られた LAI により指標化した³⁾. PCA は, ユズ³⁾の他にブドウ⁵⁾やイチネ⁶⁾における LAI の測定に用いられているが, 高価であり生産現場において日常的に用いることは現実的ではない.

そこで, 当センター果樹試験場では 2022 年に, スマートフォンで利用できる LAI 推定アプリを NEC ソリューションイノベータ株式会社と共同で開発した(図 1). このアプリは, インカメラに市販の魚眼レンズを装着したスマートフォン(Android 端末)で対象樹を撮影し, 撮影画像を二値化して LAI を推定する. また, 測定園地の栽植密度に応じて推定に用いる天頂角の選択, 対象樹に応じた樹高比の設定および撮影後の画像から推定対象範囲を自由に選択することが可能である. なお, LAI 推定アプリにおける天頂角は, PCA の天頂角(7, 23, 38, 53, 68°)に対応する撮影

* 現高知県中央西農業振興センター

** 高知県農業技術センター果樹試験場兼高知工科大学

*** 現高知県中央西農業振興センター高知農業改良普及所

画像内の範囲を指す(図2)。

本研究では、この LAI 推定アプリについて、ユズにおける最適測定・設定方法の検討および精度の検証を行ったので、報告する。

なお、本研究は、内閣府地方大学・地域産業創生交付金「IoP(Internet of Plants)」が導く「Next 次世代型施設園芸農業」への進化の助成を受けて実施した。

材料および方法

当場内露地ほ場(高知市朝倉)で栽培しているユズ「公文系」、開心自然形、22~26年生、栽植間隔3.0×4.0mの9樹を供試した。同樹について、LAI推定アプリをインストールしたスマートフォン3機種(スマホ1: Galaxy S20 SC-51A, スマホ2: AQUOS sense6, スマホ3: Xperia 5 II)およびPCAを用いてせん定前後にLAIを推定し、実測LAIとの相関を算出した。なお、せん定時以外に葉の減少はないものとした。また、空隙率検出閾値とはLAI推定アプリ内での二値化閾値を指す。

試験に用いた機種の選定は IDC Japan 株式会社が報告した2020年第4四半期および2020年通年国内携帯電話/スマートフォン市場実績値をもとに行い、Android端末の上位製造元が2022年1月末時点で販売していた機種とした。各機種のカメラ性能情報を表1に示した。

試験1 LAI推定アプリの測定方向の検討

LAI推定アプリを用いて推定したLAI(以下、スマホLAI)は、せん定前の2022年3月22日(16:30~17:30, 曇り)に5樹、せん定後の同年3月28日(9:00~10:00, 曇り)に9樹で測定した。スマートフォンのインカメラに魚眼レンズ(リアルプロクリップレンズ魚眼180°, Kenko Tokina 社製)を装着し、樹冠半径の1/2の位置からスマートフォンの本体上部を樹体中心に向け、地表面近くからインカメラを上に向けて測定した(図3, 4)。測定は1方向, 2方向, 4方向からとし、それぞれの測定位置は図5のとおりとした。なお、測定位置は実用面を考慮して畝に合わせ、4方向から測定する場合は畝に対して直交および平行、2方向から測定する場合は畝に対して直交または平行に撮影した。設定について、天頂角を4つ(1~4天頂角)採用する独立樹モード、樹高比(樹高/樹幅)は1.0, 空隙率検出閾値は254(初期設定値)

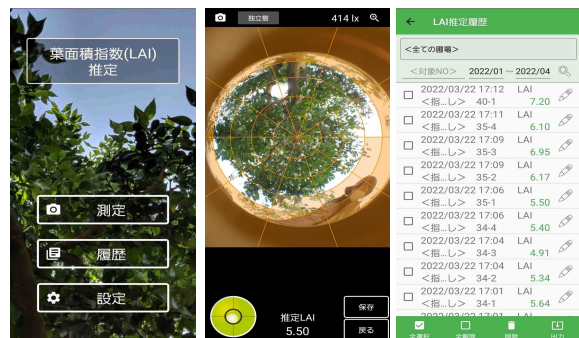


図1 LAI推定アプリの画面

(左: アプリトップ画面, 中央: 測定結果画面, 右: 測定履歴画面)

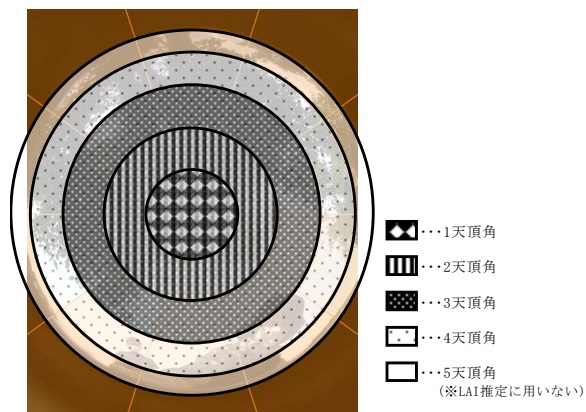


図2 LAI推定アプリにおける天頂角



図3 LAI推定アプリを用いた測定の様子

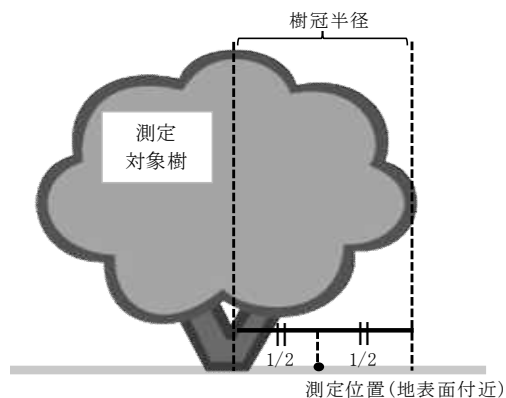


図4 スマホLAIの測定位置

とし、撮影画像から対象樹が写っている範囲を自動(二値化後の白部分(空等)が75%以上の範囲を自動的に除外)および手動(対象樹が写っている面積が25%以下の範囲を目視で除外)で指定した。

PCA(LAI-2200C, LI-COR社製)を用いたLAI(以下, PCA-LAI)の測定は, せん定前の2022年2月10日に5樹, せん定後の同年3月28日に9樹で実施した。谷本ら³⁾の方法に準じて90°のビューキャップを装着したPCAを用いて主幹中心から80cmの東西南北の位置より樹体中心に向かって測定した後(図5), 付属の解析ソフト(FV2200, LI-COR社製)を用いて光路長をHorizontal(default), 天頂角を4つ(7, 23, 38, 53°)としてLAIを算出した。

実測LAIは, 全葉面積(=全葉数×個葉面積)/樹冠占有面積で求めた。全葉数は2022年3月24~28日にせん定後の全葉数およびせん定除去葉数を計測し, せん定前の全葉数はせん定後の全葉数+せん定除去葉数で求めた。なお, せん定後の全葉数は9樹, せん定除去葉数は5樹で計測した。個葉面積は2022年3月24日に中庸な葉をサンプリング(20枚/樹)してスキャナー(GT-X830, EPSON社製)でスキャンした後, フリーソフトウェアのLIA for Win32[®])により算出した。樹冠占有面積は樹幅を2022年2月9日, 3月25日に測定し, 樹冠占有面積=長径幅/2×短径幅/2× π で算出した。

試験2 LAI推定アプリの空隙率検出閾値の検討

スマホLAIは, せん定前の2022年3月22日(16:30~17:30, 曇り)に5樹, せん定後の同年3月28日(9:00~10:00, 曇り)に9樹で試験1と同様の方法で測定した。測定方向は畝に対して直交する2方向からとした。機種毎の空隙率検出閾値について, 初期設定値が最適か確認するために, 以下の方法で空隙率検出閾値を調整したスマホLAIと比較した。撮影したカラー画像と二値化画像を比較しながら空隙率検出閾値を調整し, 葉とその他の部分との境界が一致する値(スマホ1は閾値140または150, スマホ2

は閾値110または120, スマホ3は閾値130または140)とした。

PCA-LAIはせん定前の2022年2月10日に5樹, せん定後の同年3月28日に9樹で試験1と同様の方法で測定した。

実測LAIは試験1と同様の方法で測定した。

結 果

試験1 LAI推定アプリの測定方向の検討

スマホLAIは, 実測LAIとの相関係数は0.8041から0.9347となり, いずれの機種も強い相関がみられ, PCA-LAIと実測LAIとの相関係数0.8093と同等以上であった(図6~10)。また, 1方向より2方向の測定で実測LAIとの相関が強くなったが, 4方向では2方向と同等であった。2方向から測定する場合, 畝に対して直交する位置からの測定は, 畝に対して平行する位置からの測定に比べ, 実測LAIとの相関が強かった。なお, スマホLAIは実測LAIより高くなる傾向であった。

試験2 LAI推定アプリの空隙率検出閾値の検討

空隙率検出閾値を調整することにより, スマホ1のLAIは実測LAIに近づいたが, 空隙率検出閾値140, 150の実測LAIとの相関係数は, それぞれ0.666, 0.7641となり, 初期設定値(254)の0.8853より低い値を示した(図11)。スマホ2のLAIも同様に実測LAIに近づいた(図12)。空隙率検出閾値110, 120の実測LAIとの相関係数は, それぞれ0.9268, 0.9312となり, 初期設定値(254)の0.9347と同程度となった。スマホ3のLAIは, 他の2機種と同様に実測LAIに近づいた(図13)。空隙率検出閾値130, 140の実測LAIとの相関係数は, それぞれ0.9127, 0.9196となり, 初期設定値(254)の0.929と同程度となった。なお, PCA-LAIと実測LAIとの相関係数0.8093と同程度で, 実測LAIに近い値を示す空隙率検出閾値は, スマホ1では150, スマホ2では120, スマホ3では140であった。

表1 各機種のカメラ性能情報

表 2 各機種スマートフォンカメラ性能				
機種名		有効素数	インカメラ対角画角 (°)	F値
スマホ1	Galaxy S20 SC-51A	約1000万画素	68.450	2.2
スマホ2	AQUOS sense6	約800万画素	78.832	2.0
スマホ3	Xperia 5 II	約800万画素	85.539	2.0

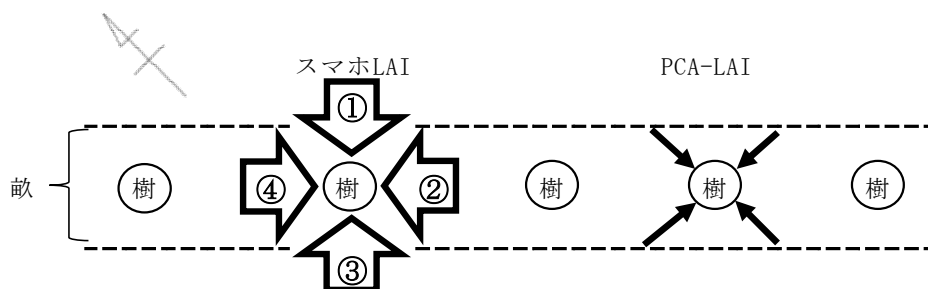


図5 測定方向およびLAI算出方法

注1) 矢印の向きは撮影方向を示す。

2) スマホLAIの1方向の場合は①～④それぞれを、2方向は①および③(畝に直交)または②および④(畝に平行)の平均値、4方向は①～④の平均値を対象樹のLAIとした。

3) PCA-LAIは東西南北の4方向から測定した。

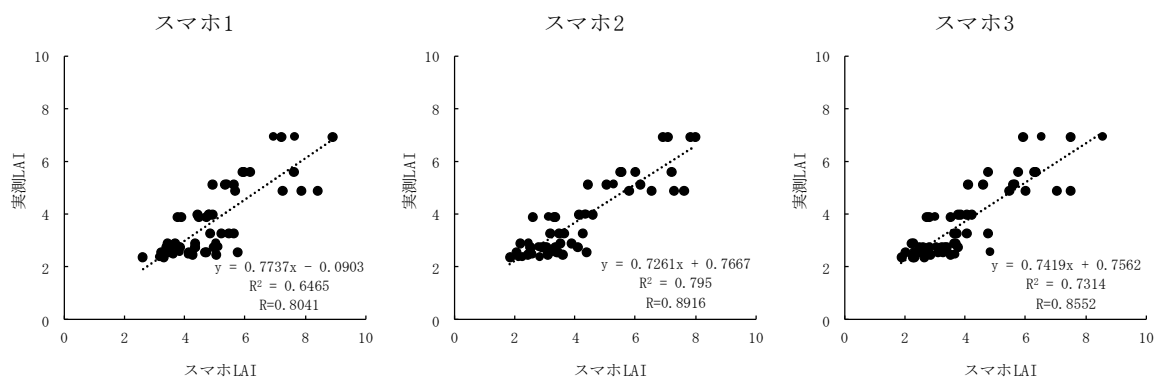


図6 1方向から測定したスマホLAIと実測LAIとの関係

注1) 供試樹数は9樹とし、同樹についてせん定前5樹、せん定後9樹を調査した。

2) 空隙率検出閾値(LAI推定アプリ内での二値化閾値を指す)は、いずれの機種も254とした。

3) スマホLAIは畝に直交および平行の4方向から測定し、それぞれの方向から得られた値を対象樹のLAIとした。

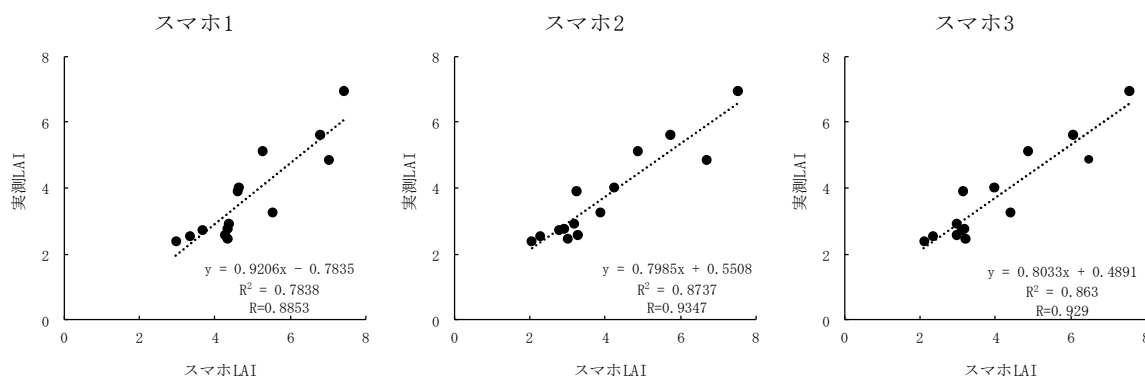


図7 畝に直交する2方向から測定したスマホLAIと実測LAIとの関係

注1) 供試樹数は9樹とし、同樹についてせん定前5樹、せん定後9樹を調査した。

2) 空隙率検出閾値(LAI推定アプリ内での二値化閾値を指す)は、いずれの機種も254とした。

3) スマホLAIは畝に直交する2方向から測定し、その平均値を対象樹のLAIとした。

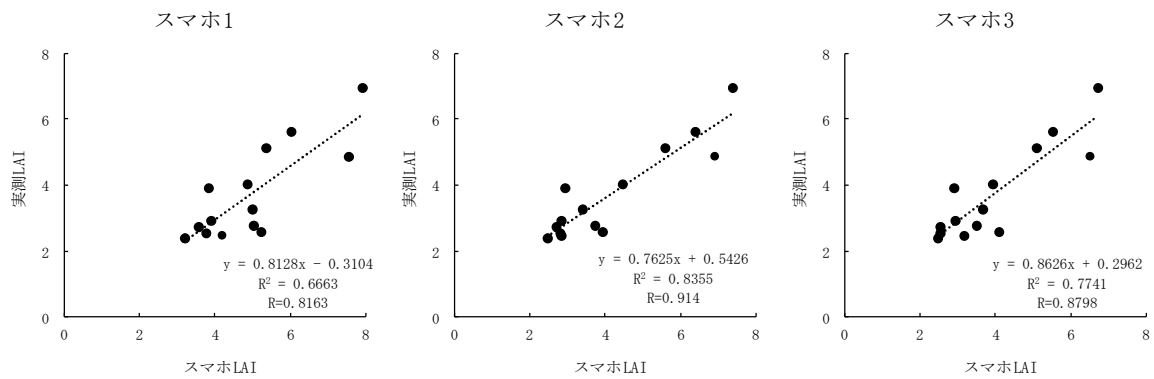


図8 畝に平行の2方向から測定したスマホ LAI と実測 LAI との関係

- 注 1) 供試樹数は9樹とし、同樹についてせん定前5樹、せん定後9樹を調査した。
 2) 空隙率検出閾値(LAI 推定アプリ内での二値化閾値を指す)は、いずれの機種も254とした。
 3) スマホ LAI は畝に平行の2方向から測定し、その平均値を対象樹の LAI とした。

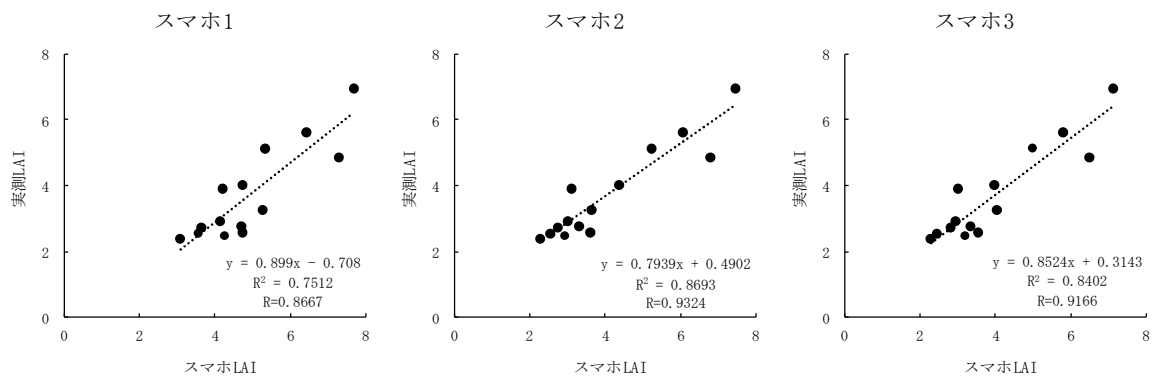
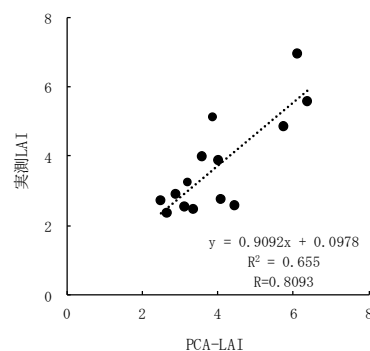


図9 4方向から測定したスマホ LAI と実測 LAI との関係

- 注 1) 供試樹数は9樹とし、同樹についてせん定前5樹、せん定後9樹を調査した。
 2) 空隙率検出閾値(LAI 推定アプリ内での二値化閾値を指す)は、いずれの機種も254とした。
 3) スマホ LAI は畝に直交および平行の4方向から測定し、その平均値を対象樹の LAI とした。

図10 4方向から測定した PCA-LAI と
実測 LAI との関係

- 注 1) 供試樹数は9樹とし、同樹についてせん定前5樹、せん定後9樹を調査した。
 2) PCA-LAI は東西南北の4方向から測定した。

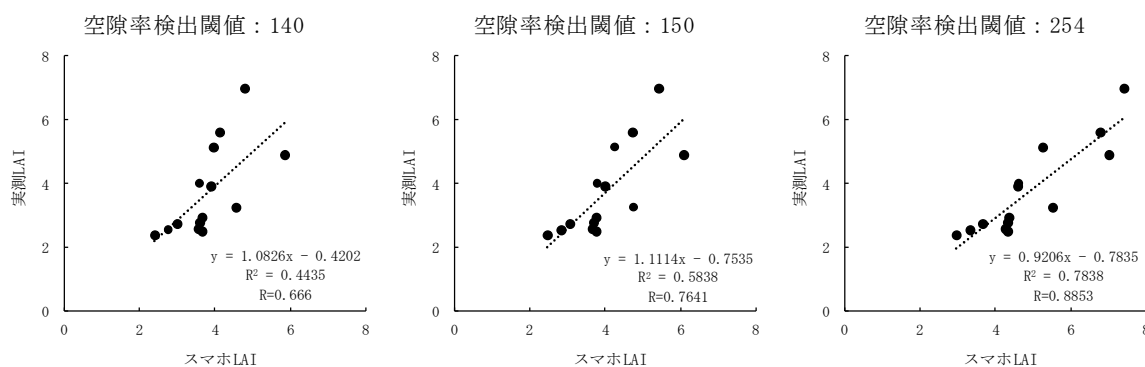


図 11 空隙率検出閾値を調整したスマホ 1 の LAI と実測 LAI との関係

注 1) 供試樹数は 9 樹とし、同樹についてせん定前 5 樹、せん定後 9 樹を調査した。

2) スマホ LAI は畝に直交する 2 方向から測定し、その平均値を対象樹の LAI とした。

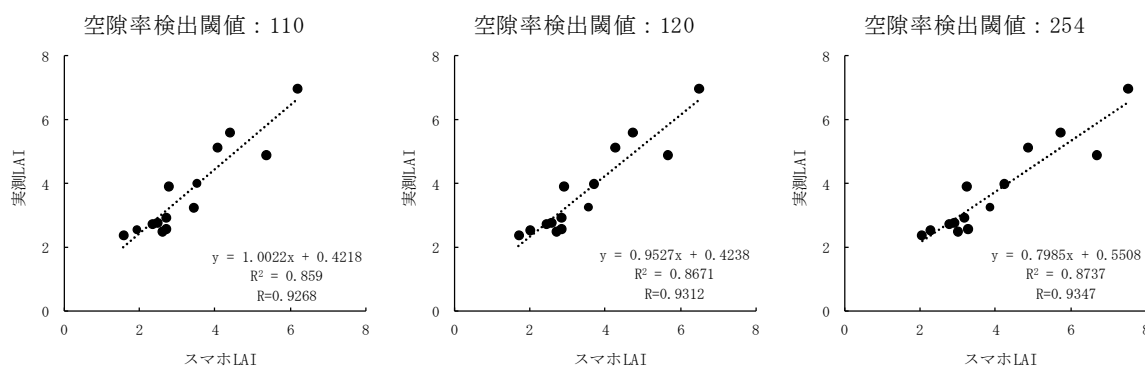


図 12 空隙率検出閾値を調整したスマホ 2 の LAI と実測 LAI との関係

注 1) 供試樹数は 9 樹とし、同樹についてせん定前 5 樹、せん定後 9 樹を調査した。

2) スマホ LAI は畝に直交する 2 方向から測定し、その平均値を対象樹の LAI とした。

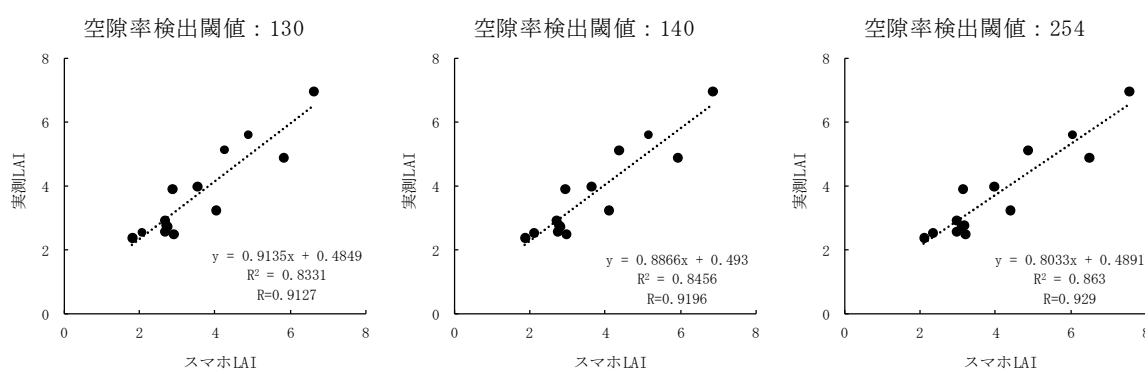


図 13 空隙率検出閾値を調整したスマホ 3 の LAI と実測 LAI との関係

注 1) 供試樹数は 9 樹とし、同樹についてせん定前 5 樹、せん定後 9 樹を調査した。

2) スマホ LAI は畝に直交する 2 方向から測定し、その平均値を対象樹の LAI とした。

考 察

これまでも、安価なデジタル機器を用いた LAI 推定に関する研究が行われており、カンキツ樹体⁷⁾や針葉樹林および広葉樹林²⁾において魚眼レンズを

装着したデジタルカメラを用いた LAI の推定方法や、ハウス栽培「デラウェア」においてデジタルカメラを用いた LAI の推定⁴⁾が報告されている。本研究では、LAI 測定機器として、広範に普及しているスマー

トフォンと魚眼レンズに着目した。

まず、LAI 推定アプリの測定方向を検討したところ、測定方向にかかわらずPCAと同等以上の精度で実測LAIを推定でき、1方向より2方向または4方向から測定して平均した場合に実測LAIとの相関が強くなった。1方向から測定した場合では、樹冠内の葉の分布が均一でないため、測定方向を増やすことで相関が強くなったと考えられた。2方向から測定する場合の位置は、畝に直交する2方向とすることで、より正確にLAIを推定できた。畝に平行に測定した場合、測定位置前後方に隣接する樹が重なった状態で写り込みやすく、対象樹以外の樹の影響を受け、精度がやや劣ったと考えられた。一方、4方向から測定した場合は畝に直交する位置から測定した場合と平行する位置から測定した場合の中間の値を示し、相関は強くなかったと考えられた。

一方、LAI 推定アプリでは撮影した画像を二値化してLAIを推定しているため、空隙率検出閾値を変更することでLAI推定値も変動する。試験1のようにスマホLAIの空隙率検出閾値を、初期設定値の254とした場合、実測LAIより高い値を示す傾向であった。これは、空隙率検出閾値が高すぎ、葉の隙間部分や影も葉として認識されたために、高い値を示したと考えられた。そこで、空隙率検出閾値を機種毎に調整した結果、スマホLAIは実測LAIの値に近づいた。ただし、3機種のうち、Galaxy S20 SC-51Aを用いた推定では空隙率検出閾値の調整によって、実測LAIとの相関が弱くなった。この要因としてアプリからスマートフォンのカメラ機能を制御することができないため、機種によっては撮影画像の明るさやコントラストが影響して、空隙率検出閾値の調整が十分に機能しない可能性が考えられた。

また、機種毎にスマホLAIと実測LAIの回帰式を用いて補正することで、より実測LAIに近い値を出力可能であると想定された。しかし、今後アプリの普及により、本試験で用いた機種以外で推定する場合、新たな機種で推定したスマホLAIおよび実測LAIを比較し、補正式を得る必要がある。生産者による実測LAIの測定は困難であるため、本試験では機種毎の補正についての検討は行わなかった。

以上より、ユズにおけるLAI推定アプリの測定および設定方法を確立した。なお、本研究結果は場内の開心自然形のユズにおける調査によって得られたものであり、樹形が未完成の場合や、園地条件(日当

たり、傾斜、周辺環境等)および測定条件(時間帯、天候等)によっては推定結果が不安定になる可能性がある。今後は、安定して推定できる条件を検討する必要がある。また、本研究で用いていない機種にLAI推定アプリをインストールしてLAIを推定する場合、機種毎に最適な空隙率検出閾値を検討する必要がある。

利益相反の有無

NECソリューションイノベータ株式会社と高知県農業技術センター果樹試験場は「植物評価装置、植物評価方法、及びプログラム」に関する特許(特開2022-136365)を出願している。西森、中野はこの特許の発明者である。他の著者に開示すべき利益相反はない。

参考文献

- 1) 高知県農業振興部(2023). 高知県の園芸. PP. 40-41.
- 2) 松山洋・藤原靖・島村雄一・泉岳樹・中山大地(2003). 全天写真から得られる葉面積指数とプラント・キャノピー・アナライザーによる実測値との比較. 地学雑誌 112(3): 411-415.
- 3) 谷本佑・廣瀬拓也・西森空・中野和彦・北沢知明(2024). 葉面積指数(LAI)を用いたユズのせん定の定量化. 高知農技セ研報. 33: 44-50.
- 4) 立石欣也・山本晴彦・岩谷潔・土谷安司・倉橋孝夫・門脇稔・金子奈々恵(2012). ハウス栽培におけるブドウ‘デラウェア’のデジタルカメラを利用した葉面積指数の推定. 園学研. 11(2):251-255.
- 5) Watanabe, J., M. P. Robert and K. Watanabe. (1997). The Evaluation of an Optical Method to Estimate Leaf Area of Grapevines. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 66(2):235-244.
- 6) 山本晴彦・岩谷潔(2022). デジタルカメラを利用したカンキツ樹の総葉面積の計測. 農業技術大系果樹編 第1-I巻. 技22の20-22の22.
- 7) 山本晴彦・鈴木義則・早川誠而(1995). プラントキャノピーアナライザーを用いた作物個体群の葉面積指数の推定. 日作紀. 64(2):333-335.
- 8) 山本一清(2003). LIA for Win32 (LIA32). フリーウェア <https://www.agr.nagoyau.ac.jp/~shinkan/LIA32/>.

Summary

In order to utilize the leaf area index (LAI) as an indicator of pruning amount of yuzu(*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka), we have jointly developed a smartphone application for LAI simple estimation (LAI estimation app) in collaboration with NEC Solution Innovators, Ltd.. We then examined the measurement and setting methods and verified their accuracy.

Measurements using the LAI estimation app are carried out as follows: Attach a fisheye lens to the front camera of your smartphone and point the top of your smartphone at the center of the tree from a position 1/2 the radius of the canopy. The estimated results will be displayed on the screen when you hold smartphone horizontally on the ground and take a picture from near the ground with the front camera facing upwards.

The measurements is taken from two directions perpendicular to the ridges.

The LAI measured using the LAI estimation app had a strong positive correlation with the actually measured LAI, and the accuracy was confirmed to be on the same level as the correlation between the LAI obtained from a plant canopy analyzer (PCA) and the actually measured LAI. In addition, by setting the binarization threshold to an appropriate value for each smartphone model, an LAI value closer to the actually measured LAI was obtained.

Key words: binarization, fisheye lens, PCA, pruning, smartphone application