

光合成評価に必要な光量子束密度の画像計測方法

佐藤朱里^{†1} 塚田正人^{†1}

本稿では、植物の光合成において重要な光情報である光量子束密度 (PPFD) を高精度に計測する画像計測方法について述べる。本方式は、色較正されたカメラで参照物体を撮影し、画像として観測された参照物体の色情報から、天候によって刻々と変化する太陽光の分光放射照度を推定し、物理量である PPFD を算出する。植物群落に参照物体を複数設置しそれらを撮影することで、複数地点の PPFD を容易に同時観測ができ、農業の実用に適した計測方法であると言える。実験において、本方式によって専用の光量子センサと同等精度 (5%以内) での PPFD の計測を実現できることが確認された。

Measurement of PPFD by using a color image for photosynthetic evaluation

AKARI SATO^{†1} MASATO TSUKADA^{†1}

The paper describes an image sensing method to measure Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) which is significantly important in photosynthetic reaction of plant. In our approach, PPFD can be measured by calculating spectral irradiance of daylight which fluctuates hour by hour according to weather condition changes, from the color information of a reference object in an image captured by a camera. PPFD at different points can be simultaneously measured by capturing reference objects which are set in a plant community. In the experiments, we confirmed that the proposed method can achieve high performance which is equivalent to quantum sensors on the market.

1. はじめに

農作物の高収量化を実現するために、一般的に栽培時において実や葉の剪定、水や肥料、光量の調整など様々な工夫が行われている。多くの場合それらは熟練者の勘や経験に基づいているため、技術の継承が難しいなどの問題がある。一方、ICT を導入し栽培に必要な温度・湿度・光量などの情報を定量的に計測し、それらの情報に基づいて栽培を行う ICT 農業への転換が進みつつある。農業技術の先進国であるオランダでは、施設園芸への ICT の導入が進んでおり、温度、光量、二酸化炭素などを数値で把握し、植物の成長に最適な環境を保つ栽培が可能となっている。例えばトマトの栽培では、オランダでは一般的な施設生産現場において安定的に 60kg/m² 以上を実現する生産技術が確立されている[1]。これは日本の施設トマトの 2~3 倍の収量 (単位面積当たり) に当たる。

農作物の栽培に必要なとされる情報は数多くある。中でも、光情報は植物成長に必須である光合成と関連が深いため、最も重要な情報の一つである。農作物の成長に大きく影響する光量を正確に計測し、それに基づき葉全体に効率よく光が当たるように葉の剪定を行うなどの制御を行うことで、農作物の高収量化が実現できるとされている。

光合成は、クロロフィルが光量子を吸収することで起こる反応である。光量子 1 つ 1 つが持つエネルギーは波長によって異なるが、このエネルギーの違いは光合成の反応に

影響しない。このため、一般的に植物の光合成に関する研究では、光量として光量子束密度(Photosynthetic Photon Flux Density, 以下では PPFD と表記する)という光量子の密度が用いられている。しかし、PPFD の計測機器は高価である、広大な農地を同時に多地点計測することが難しいなどの問題があるため、実際の栽培現場では PPFD の計測は行われていないのが現状である。PPFD を栽培現場で手軽に計測する方法があれば、計測した PPFD に基づいて栽培環境を制御し、高収量化につなげることが可能であると考えられる。本稿では、カラー画像を利用することで、多地点の PPFD の同時観測を可能とする高精度な画像センシング方式を提案する。

2. カラー画像を利用した光量子束密度計測

2.1 従来の PPFD 計測方法

PPFD は単位時間・単位面積当たりの光量子の数 (単位: $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) を表す。単位波長当たりの光のエネルギー量を表す分光放射照度 $ir(\lambda)$ から算出することが可能である。分光放射照度と PPFD には次式の関係が成り立つ。

$$\text{PPFD} = \frac{10^6}{hcN_A} \int_{400}^{700} ir(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

但し h , c , N_A はそれぞれプランク定数、光速、アボガドロ数を表す。

現在の PPFD の計測方法は、光量子センサを用いるのが一般的であるが、波長ごとの光の強さを計測する精密な専用センサであるため、高価であるという問題がある。また、

^{†1} NEC 情報・メディアプロセッシング研究所
Information and Media Processing Laboratories, NEC Corporation

PPFD を求める簡易方式として計測された放射照度を定数倍することで PPFD に変換する方法が提案されているが [2][3]、この方法は 2 通りの太陽光下 (太陽光と青空、青空のみ) の場合のみに対応しているため、実際に栽培現場で用いるには不十分である。

2.2 PPF 算出アルゴリズム

天候変動に影響を受ける太陽光の下で、高精度に PPF を求めるには、刻々と変動する太陽光の分光分布をその都度求める必要がある。本提案方式は、撮影画像の色情報から分光放射照度を求めることで、式(1)の通りに PPF を正確に算出する。つまり、カメラを使ってセンサと同等の方法で PPF を算出する。

カラー画像を利用した PPF 計測の手順を図 1 に示す。カメラは事前に色較正されていることとする。

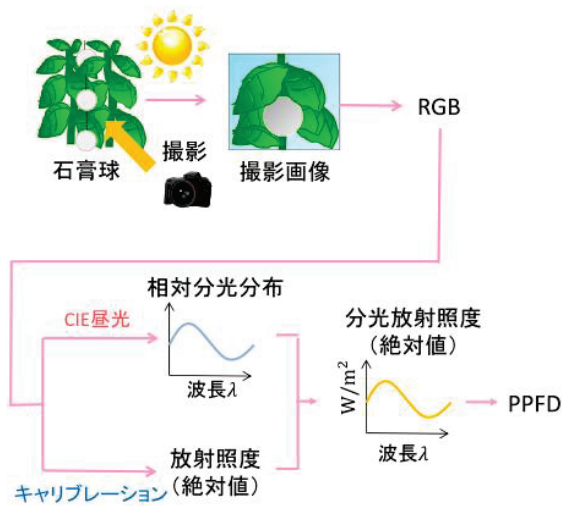


図 1 PPF 算出アルゴリズム

図 1 に示した手順をまとめると以下ようになる。

- ① 参照物体をカメラで撮影
- ② 撮影画像中の石膏球の任意の位置の色情報を取得
- ③ CIE 昼光モデルを用いて相対分光分布を算出
- ④ カメラの色特性から放射照度を算出
- ⑤ ③, ④の結果から分光放射照度を算出
- ⑥ 式(1)から PPF を算出

植物群落内に設置された参照物体の画像の色情報から相対分光分布と放射照度を算出し、分光放射照度を求める。分光放射照度から式(1)を用いて PPF を算出する。参照物体は完全拡散反射・完全白色の性質を有するものとする。参照物体が白色であるため、画像から取得した参照物体の色情報は、照射される光の色情報であるとみなすことができる。

以下では各手順の詳細について説明する。

2.3 分光分布の算出

撮影画像の色情報を基に、変動する太陽光の相対分光分布を求める。

標準の太陽光の分光分布を表す CIE 昼光モデルによると、相対分光分布 $S_D(\lambda)$ は次式で表される [4]。

$$S_D(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad (2)$$

ここで、 $S_D(\lambda)$ は 560nm での値を 100 とした相対分布である。また、 $S_0(\lambda), S_1(\lambda), S_2(\lambda)$ はそれぞれ太陽光の平均ベクトル、第一・第二主成分ベクトルを表し、 M_1, M_2 は太陽光の色度 x, y を用いて次式で与えられる。

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703x + 5.9114y}{0.0241 + 0.2562x - 0.7341y}$$

$$M_2 = \frac{-0.0300 - 31.4424x + 30.0717y}{0.0241 + 0.2562x - 0.7341y}$$

完全白色である参照物体を用いることにより、撮影画像の参照物体面の色度 x, y から算出した相対分光分布 $S_D(\lambda)$ は、参照物体面での太陽光の相対分光分布と一致する。

2.4 放射照度の算出

画像の輝度 Y は相対的な値であるが、絶対的な物理量である PPF を求めるには輝度値 Y を手掛かりに放射照度を絶対値で算出する必要がある。

これを実現するために、カメラの色較正において、カメラパラメータ (シャッタースピード、絞り)、カメラへの入射光量である放射輝度、および、カメラ出力である輝度 Y の関係を記録し、カメラの入出力応答特性を求めておく。図 2 はカメラ特性の一例である。本手法では、参照物体面の反射特性が完全拡散反射であるため、放射輝度に π を乗ずることで放射照度に変換できる [5]。すなわち、画像中の参照物体上の輝度 Y から参照物体表面での放射照度 IR が算出できる。

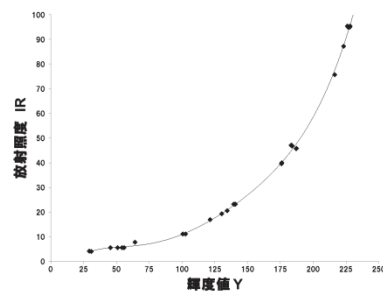


図 2 カメラ応答特性の例

2.5 PPF の算出

相対分光分布 $S_D(\lambda)$ と放射照度 IR を式(1)に代入することで、分光放射照度 $ir(\lambda)$ が得られる。

$$ir(\lambda) = \frac{IR}{\int_{400}^{700} S_D(\lambda) d\lambda} S_D(\lambda) \quad (3)$$

$ir(\lambda)$ を式(1)に代入することで PPF が得られる。

3. 実験結果

本提案方式の有効性を示すために、実環境における PPFD の計測実験を行った。本実験は晴天時の屋外で実施した。参照物体には石膏球を使用し、色較正されたデジタルカメラ(D300, Nikon)でこれを撮影した。

分光放射輝度計(CS1000, コニカミノルタ)で石膏球面の分光放射照度を計測し、式(1)に従って PPFD に変換した値を真値とする。参照物体の撮影画像から提案方式によって算出した PPFD の推定値を真値と比較した。

図 3 に PPFD の推定値と真値との比較結果を示す。横軸は PPFD の真値、縦軸は PPFD の推定値である。平均誤差率 2.58% であり、最大でも誤差率 5% 以内を達成している。これは市販の光量子センサの誤差率（カタログスペック）と同等の精度である。

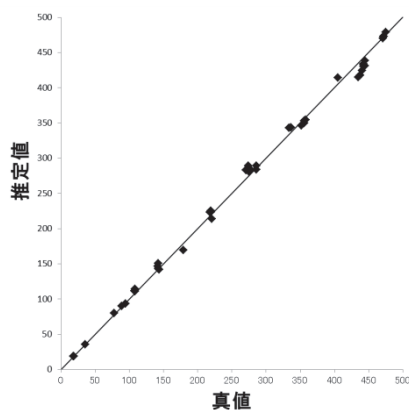


図 3 PPFD 計測結果

4. PPFD 計測システム

4.1 葉面積指数の算出

葉面積指数 (Leaf Area Index, 以下では LAI と表記する) は、地表の単位面積当たりの全ての葉の面積の和を指す (単位: m^2/m^2) ものであり、植物の栽培において重要な指標であるとされている。例えば、LAI が 0 から徐々に増加すると光の吸収量が増え、LAI が 3.0 程度になると葉が全ての光を吸収し、それ以上 LAI が増えても利用できる光がなくなるため、光の吸収量は変化しない。LAI と作物の収量の関連については様々な研究がされており [6][7][8]、高収量を実現する一手法として農作物の LAI を調節することは有効であると考えられている。

LAI を直接求めるには実際に単位面積当たりの葉の面積を計測しなければならないため、多大な労力を要するが、光量から LAI を計算する手法として門司、佐伯らの方法が知られている [9]。具体的には、以下の式で LAI を算出する。

$$I_j = I_i e^{-KF} \quad (4)$$

但し F は位置 i と位置 j の間の LAI を示し、 I_i, I_j は位置 ij での光量を示し、 K は植物の吸光係数を示す。

図 4 に示すように、植物群落の垂直方向の何カ所かの位

置で光量を計測することで、その間の LAI を算出することが可能である。本稿で提案したカラー画像を利用した PPFD 計測方法を用いれば、算出した PPFD から植物群落内の LAI を算出することが可能であると考えられる。

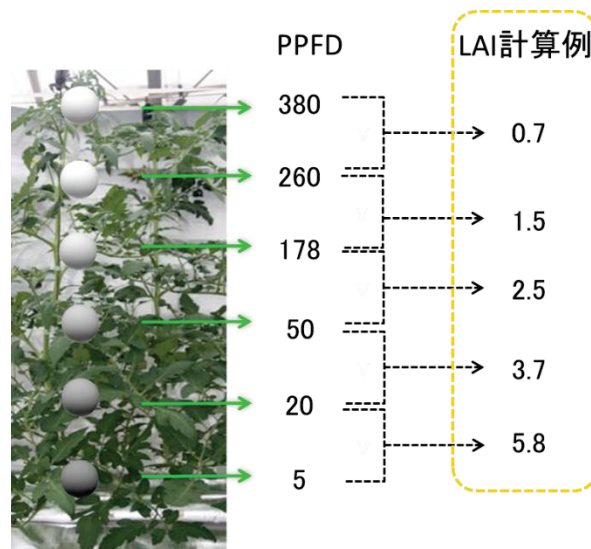


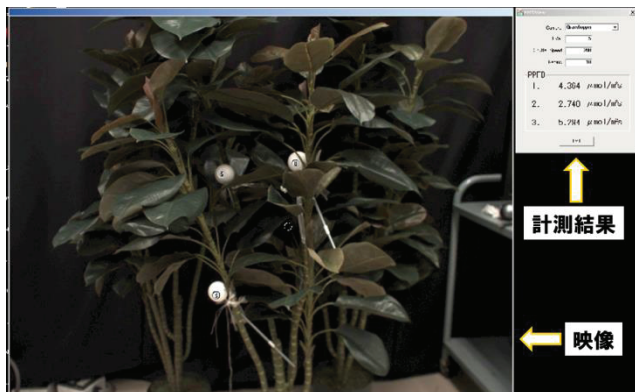
図 4 LAI の計算例

図 5 は本提案手法を利用して、実際に PPFD を計測するシステムである。PointGrey 社の USB カメラ (Flea3) を使用している。PC 上でリアルタイムに PPFD を計測することが可能である。

植物の近傍に設置した石膏球を、PC に接続したカメラで撮影すると、PC のモニタに撮影映像が表示される。映像中の石膏球の任意の位置を指定すると、その位置での PPFD がリアルタイムに計測され、結果表示画面に数値が表示される。現在のシステムでは 3 か所同時計測が可能であるが、これはさらに増やすことも可能である。



(PPFD を計測している状況)



(PC 上での表示画面)

図 5 PPFD 計測システム

5. まとめ

本稿では、植物の光合成において重要な光情報である光量子束密度 (PPFD) をカラー画像から計測する方法を提案した。色校正されたカメラで撮影された参照物体の色情報から、天候によって刻々と変化する太陽光の分光放射照度を推定することで、高精度に PPFD を推定することができる。複数設置した参照物体をカメラで撮影することにより、PPFD を容易に同時計測でき、農業の実応用に適している。

実験により、本提案方式によって画像から計測された PPFD の精度は、専用の光量子センサと同等精度 (5%以内) を達成していることを示した。また、USB カメラと PC で PPFD を計測するシステムを紹介し、栽培現場での PPFD 把握が可能であることを示した。今後は計測した PPFD に基づく光合成評価や環境制御などに活用していく予定である。

参考文献

- 1) エベ・フューヴェリンク (編著), 中野明正・池田英男他 (監訳): トマト オランダの多収技術と理論, 農文協 (2012)
- 2) Thimijan, R. W. and Hein, R. D. : Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion, HortScience, Vol.18, No.6, pp.818-822 (1983)
- 3) Henderson, S. T. and Hodgkiss, D. : The spectral energy distribution of daylight, Br. J. Appl. Phys., Vol.14, No.3, pp.125-131 (1963)
- 4) Judd, D. B. et al.: Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature, JOSA, Vol.54, No.8, pp.1031-1040 (1964)
- 5) Jensen, H. W.(著), 苗村健(訳): フォトンマッピング, オーム社 (2002)
- 6) Zekki, H. et al.: Validation of a Photosynthesis Model through the Use of the CO₂ Balance of a Greenhouse Tomato Canopy, Annals of Botany, Vol.84, No.5, pp.591-598 (1999)
- 7) Scholberg, J. et al. : Growth and Canopy Characteristics of Field-Grown Tomato, Agronomy Journal, Vol. 92, No. 1, pp.152-159 (2000)
- 8) Heuvelink, E. : Evaluation of a Dynamic Simulation Model for Tomato Crop Growth and Development, Annals of Botany, Vol. 83, No. 4, pp.413-422 (1999)
- 9) Monsi, M. and Saeki, T. : On the Factor Light in Plant Communities and its Importance for Matter Production, Annals of Botany 95, pp.549-567 (2005), Originally published as : Japanese Journal of Botany 14, pp.22-52 (1953)