

Kinect(キネクト)の深度情報を利用した作物個体群の受光態勢の評価

誌名	植物環境工学
ISSN	18802028
著者名	浜本, 浩 黒崎, 秀仁 岩崎, 泰永
発行元	日本植物工場学会
巻/号	27巻2号
巻号補足	
掲載ページ	p. 97-101
発行年月	2015年6月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



Kinect (キネクト) の深度情報を利用した作物個体群の受光態勢の評価

浜本 浩^{1*}・黒崎秀仁²・岩崎泰永¹

¹ 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構野菜茶業研究所

470-2351 愛知県知多郡武豊町字南中根 40-1

² 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構近畿中国四国農業研究センター

765-0053 香川県善通寺市生野町 2575

Estimation of Light-Intercepting Characteristics of Plants Based on Kinect Sensor Depth Data Measurements

Hiroshi HAMAMOTO^{1*}, Hideto KUROSAKI² and Yasunaga IWASAKI¹

¹NARO Institute of Vegetable and Tea Science, 40-1 Minaminakane, Taketoyo, Aichi 470-2351

²NARO Western Region Agricultural Research Center, 2575 Ikano, Zentsuji, Kagawa 765-0053

Abstract

Plant foliage depth data obtained with a Kinect for Windows sensor were used to estimate the light-intercepting characteristics of tomato and paprika plants. As a qualitative measure of plant growth, we calculated plant cover ratios per unit area (R_a), defined as the ratio of the area of a horizontal projection of the foliage for a unit plant to the floor area occupied by the plant. To obtain an additional metric for the light-intercepting characteristics of the plants, termed R_p , R_a values were calculated at 1 cm increments starting from the top of a plant to provide an integrated value, R_a' ; R_p was then calculated by taking the distance from the plant top to the point at which the value of R_a' was 80 % of the R_a value for the plant and dividing this distance by the vertical distance from top to bottom of the plant foliage. Analyses using dummy plants and tomato plants showed that R_a values increased and R_p values decreased as the total foliage area increased and light was less able to penetrate downward through the array of leaves. Changes in leaf angle also affected R_a and R_p values. Dummy plants with their leaves horizontal had larger R_a values and smaller R_p values than when the leaves were inclined downward. A comparison of data at sunrise and sunset for paprika plants cultivated in a greenhouse showed that R_a values were larger and R_p values were smaller at sunrise, compared with their respective values at sunset. These relationships are in agreement with changes in leaf attitudes, which were more horizontal at sunrise and slightly drooped at sunset.

Keywords: depth data, Kinect for Windows, light-intercepting characteristics, paprika plants, tomato plants

2014 年 10 月 9 日受付

2015 年 1 月 26 日受理

Corresponding author: Hiroshi Hamamoto
(ham@affrc.go.jp)

* 現: 野菜茶業研究所安濃本所 514-2392
三重県津市安濃町草生 360

緒 言

作物個体群の受光態勢は葉面積や葉の傾斜, 空間分布
などに左右される。受光態勢を評価するための指標には, 個

体群の生育する土地面積当たりの葉面積である葉面積指数 (LAI) と群落内の光の透過しやすさを表す吸光係数¹⁾がよく用いられる。しかしこれらは葉面積の計測時に植物体の破壊的調査が必要である²⁾。一方、植物体を破壊しない非破壊的の評価方法としては、葉の表面に感光紙³⁾や日射計フィルム^{4,5)}を葉層別に貼り付け、一定期間後回収し、色の褪せ方から推定した受光量を各層で比較する方法がある。しかし、これは時間と手間がかかり、長期間にわたり繰り返し測定することは容易でない。小型のフォトダイオードを層別に葉に付けて計測、比較する方法⁶⁾もあるが、多点計測するにはコストや設置の手間がかかる。

そこで、本研究では、深度データを面的に収集できるセンサーである Kinect (キネクト) を用いて、比較的安価かつ非破壊的に作物個体群の受光態勢を評価することを試みる。Kinect は赤外線プロジェクターと赤外線カメラからなる深度センサーを搭載する。センサーから対象物までの直線距離ではなく、センサー前面からの鉛直距離を測定することから‘深度’という用語が用いられている。本センサーはゲーム用のコントローラーとして開発され、プロジェクターから所定のパターンで赤外線を照射し、その歪みや広がりから、カメラに映る多数の点において深度を測ることが可能である⁷⁾。黒崎ら⁸⁾は、本センサーを栽培温室内に設置し、作物体の深度データをテキストファイルに保存するプログラムを作成し、作物生長のモニタリングに応用した。深度データは作物体のうち Kinect の発した赤外線を受けている部分で採取できるため、このプ

ログラムと Kinect で構成する計測システムは、作物個体群の受光部分を三次元的に記録できると考えられる。本研究ではこのシステムで記録した深度データを表計算ソフトで読み取ることで、受光態勢の解析を行った。本研究は農水省委託プロジェクト研究「施設園芸における熱エネルギーの効率的利用技術の開発」で実施した。

材料および方法

センサーには Kinect for Windows (L6M-00020, マイクロソフト) を使用した。本センサーで面的に得られる深度データの解像度は 320×240、視野角は水平方向 57°、垂直方向 43°である。

緑色画用紙で面積 100 cm² の模造葉を作成し、長さ 90 cm の支柱に針金を用いて固定して、①水平に近い角度で模造葉を等間隔の葉間で 7 枚取り付け付けた株、②葉数 7 枚で垂直方向の葉の取り付け角度を 45°以上下垂させた株、③取り付け角度はそのまま葉を 14 枚にした株、の 3 種の疑似作物を作成した。この疑似作物を直径 18 cm、高さ 15 cm のポットに土を詰めて支柱を差し込んで固定した。水平方向の葉の取り付けは、直上から見たときに、1 株の中で全く同じ角度に取り付ける葉ができないよう配置した。特に、7 葉疑似作物の場合には上から 1～4 葉は互いに重ならないよう、5～7 葉も互いに重ならないよう配置した。14 葉疑似作物の場合も、上から 1～4 葉、5～8 葉、9～12 葉、13～14 葉は互いに重な

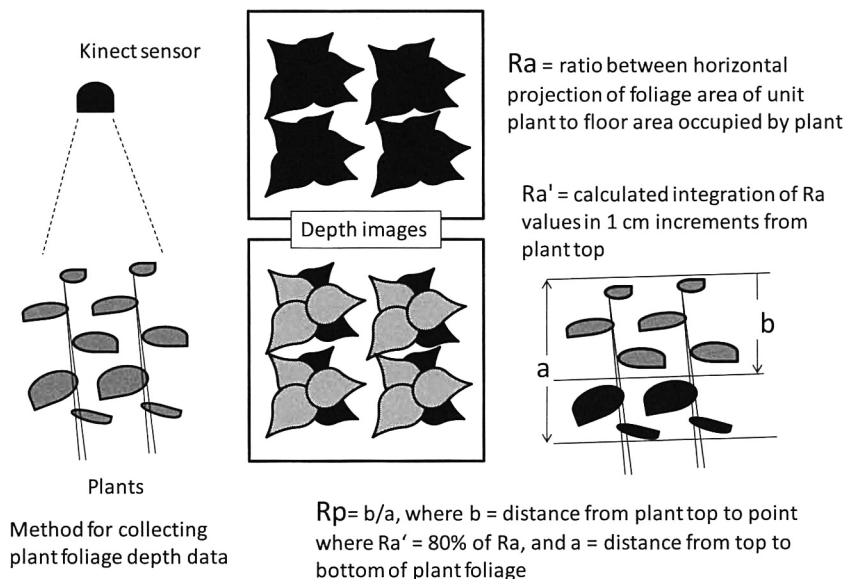


Fig. 1 Plant foliage depth data acquisition and light-intercepting characteristic metrics R_a and R_p .

らないよう角度を調整した。またポットに固定した疑似作物は、床面 6 m×3.6 m、高さ 2.6 m、部屋中央とそこから長辺方向に 1.8 m 前後の 3 箇所に 32 W 昼白色蛍光灯が 2 灯ずつ設置されている実験室内で、床面に 4 株を 1 辺 30 cm の正方形に配置して個体群を形成し、室内灯を点灯した状態で、光透過率算出用に、この正方形の中央床面と疑似作物上方の光合成有効量子フラックス (PPF) を光量子計 (ML-020P, 英弘精機) で測定した。測定後、疑似作物個体群を床から約 2 m 上方から Kinect で撮影した。1 回の PPF 測定と Kinect 撮影が終わるたびに、疑似作物を固定したポットを 4 株とも少しずつ回転させ葉の位置を変え、測定と撮影を繰り返した。こうして、①～③のそれぞれにつき、8 回 PPF 測定と Kinect 撮影を行った。

また、温室内で直径 21 cm、高さ 17 cm のポットで栽培している、草高 57 cm 前後、葉長 2 cm 以上の葉が 12～14 枚着生したトマト (りんか 409, サカタのタネ) を 70×100 cm の同一スペース内に 6 株および 8 株配置し、2014 年 3 月 11 日薄暮時に、床から 2.7 m 上方から Kinect で 5 回撮影した。翌 3 月 12 日 11 時 (曇天) に個体群上方と下部 (作物の地際レベルの 4 箇所) で PPF を測定し、光透過率を算出した。撮影と PPF の測定後、作物は解体し、葉面積を葉面積計 (AAC-400, 林電工) を用いて測定した。さらに、別の温室で養液栽培しているパプリカ (スペシャル, ENZA ZADEN) も、2013 年 6 月 4 日～8 日にかけて、4 時と 19 時に約 3 m 上方から撮影した。床から作物の地際までの高さは約 50 cm、この期間の作物の草高は 60～80 cm であった。

Kinect で撮影した作物の深度データは表計算ソフト (Excel 2010, マイクロソフト) で読み取った。表計算ソフトのシート中の各セルに深度のデータが数値で記録されており、作物体の写っているセルと背景の床面が写っているセルが識別できる。まず、上方からみた水平受光面の大小を示す指標として、通路部分を除いた撮影領域で葉の投影面積 (セル数) が占める割合 (Ra) を算出した (Fig. 1)。もう一つの指標として、作物個体群への光の浸透性の評価も行うべく、Ra を深度別に分解して、作物個体群の Kinect で測定した最高点から 1 cm ずつ積算したものを Ra' とし、これが Ra の 80 % の値になるまでの距離を葉の分布している距離で除した割合 (Rp) を算出した (Fig. 1)。この値が大きいほど作物個体群への光の浸透性が大きいことを示す。葉の分布している距離の上端は Kinect で測定した最高点を用いたが、下端は葉の相互遮蔽により Kinect で検知できない場合も考慮して、床もしくは地際から最下位葉までの距離を実測して把握した。本研究では、Ra と Rp を受光態勢評価の項目とした。

結果および考察

疑似作物の実験では、水平に近い角度で等間隔に 7 葉取り付けた株を基準とすると、葉を下垂させた場合、Ra は半減し、総葉面積は同じでも上方からみた受光面は小さくなることが示された。一方、Rp は大きくなっており、葉の下垂で群落内への光の浸透性が増加すると推察された。実際、実測の光透過率も増加した。葉数が倍になった場合は、Ra が大きくなった。Ra の増加は、葉の垂直方向の着生角度が変わらずに総葉面積が増加しているためと考えられたが、葉同士の相互遮蔽があるため、総葉面積のように倍増はしなかった。Rp は実測した光透過率同様に低下した (Table 1)。Fig. 2 には疑似作物個体群の深度別の Ra'/Ra を示す。深度の増加に伴い Ra'/Ra は増加するが、個体群構造によってその変化パターンが異なり、同じ Ra'/Ra 値に水平 14 葉疑似作物が深度の最も小さい位置で、下垂 7 葉疑似作物が一番大きい位置で達し、水平 7 葉疑似作物はその中間になった。Ra'/Ra の変化パターンは個体群構造を反映していると考えられるが、1 に近づくとそれより深度の大きい位置に葉が存在してもあまり変化しない。それより深度の大きい位置の葉は Kinect の赤外線を受けにくくなっているともいえる。こうした葉の存在は作物群の受光態勢を悪化させる要因になると考えられる。これも評価に組み入れるために、本研究の Rp では、ある一定の Ra'/Ra (0.8) になるまでの個体群の深度長を葉の分布する長さで除する処置を行った。

Table 1 Leaf area, light penetration, Ra, and Rp values for groups of four dummy plants, each with 7 or 14 leaves oriented horizontally or angled downward.

	Orientation		
	Horizontal (7 leaves)	Downward (7 leaves)	Horizontal (14 leaves)
Total leaf area (cm ² /4 Plants)	2800	2800	5600*
LAI	0.3	0.3	0.5*
Light penetration	0.37	0.51*	0.25*
Ra	0.22	0.10*	0.31*
Rp	0.47	0.65*	0.40*

Each group of four dummy plants was spaced within a square 30 cm on each side. Each dummy leaf had an area of 100 cm². Light penetration was calculated as the ratio of photosynthetic photon flux (PPF) measured above the four plants and at the center of the floor area among them (data in the table show average of 8 measurement). Asterisks (*) indicate values that differ significantly ($p < 0.05$ using a t-test ($n = 8$)) from those for the group with 7 leaves oriented horizontally.

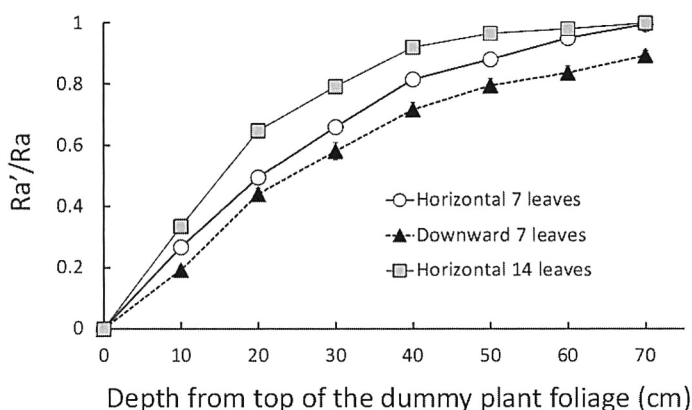


Fig. 2 Relationship between Ra'/Ra and depth from top of the dummy plant foliage. Standard error bars ($n=8$) smaller than symbols are not shown.

Table 2 Total leaf area, light penetration, Ra , and Rp values for groups of six and eight tomato plants placed within equal areas.

	Six plants	Eight plants	t-test
Total leaf area ($\text{cm}^2/6$ or 8 Plants)	7120	10047	—
LAI	1.0	1.4	—
Light penetration	0.33	0.25	—
Ra	0.51	0.55	*
Rp	0.50	0.46	*

Plants were grown in 21 cm diameter plastic pots placed in 60 cm $\times$ 35 cm greenhouse floor areas. Total leaf area was measured with a leaf area meter. Light penetration was calculated as the ratio of PPF above the plants and the average of PPF measurements at floor level inside (4-point average) and outside each group of plants. Asterisks (*) indicate significant difference ($p<0.05$ using a t-test ($n=5$)) between values for the six- and eight-plant groups.

トマトの撮影データから受光態勢を評価すると、8株配置は6株配置と比較して、 Ra が大きくなり、 Rp が小さくなった。これは、先の疑似作物群を用いた実験で葉数を増加させた場合と同様の傾向であった。実測データでも Kinect 深度情報からの評価と同様、8株配置は6株配置と比べて植被率を上昇させる総葉面積は増加し、光の透過率は低下した (Table 2)。なお、 Ra を株数で除することで1株当たりの Ra を算出すると、8株配置では0.07、6株配置では0.09であり、個々の株においては、6株配置の方が平均的に Ra も大きく、受光に有利と考えられる。

パプリカの4時と19時の撮影データからは、 Ra が早朝に増加し、薄暮時に減少することを繰り返しつつ、成長に伴って漸増していく一方、 Rp は逆に早朝の減少と薄暮時の増加を繰り返し、漸減していく傾向がみられた。測定期間平均では

Table 3 Ra and Rp values for greenhouse paprika plants at 4:00 and 19:00.

	Time		t-test
	4:00	19:00	
Ra	0.87	0.76	*
Rp	0.23	0.28	*

Each value represents the average of values measured from July 4–8, 2013. Asterisks (*) indicate significant difference ($p<0.05$, t-test ($n=5$)) between 4:00 and 19:00 measurements.

Ra は4時が19時より大きく、 Rp は19時が4時より大きくなった (Table 3)。これは、薄暮時には早朝に比べて葉が下垂する傾向にあったこと (目視で確認) が影響したと考えられる。疑似作物を用いた実験同様、葉の下垂は植被率を下げ、群落内への光の浸透を促進することがうかがえる (Table 3)。

Ra や Rp は Kinect の深度データを元に算出しているが、この深度データは Kinect の発する赤外線が当たっている部分でしか収集できない。その意味では Ra も Rp も光源からの直達光に対する受光態勢を示す指標になる。しかし、散乱光が主体の曇天時や複数光源からそれぞれ違った角度で直達光が到達する室内実験での光透過率と Rp の処理区間の大小関係は同じであり、Table 1の葉数の異なる株の場合や Table 2の株数が異なる場合から考えられるように、同一作物で同一時間帯であれば総葉面積 (受光面積) の大きい場合に Ra も大きい傾向があった。

本研究での受光態勢評価の問題点は、作物の草高が高くなると、上部の葉が下部の葉に比べて相対的に大きく写るため、 Ra を過大に、 Rp を過小に評価する可能性があることで、この点は、なんらかの補正が必要か検討の余地がある。

Kinectと作物群上部があまり近接しないように配置することも必要であろう。また、本研究ではRpを求める際、分母にRa'がRaの80%に達するまでの長さをとったが、80%という閾値が実用上最適なのかの検討やRaやRpという指標を組み合わせて受光態勢を総合的に判断する手法の開発も今後の課題である。

Kinectは元来ゲーム用のコントローラーで、価格も2万円程度(本研究で使用した機種の後継機も同等の価格)と比較的安価であるが、通常のカラー写真のようなRGB画像のほか、深度情報を面的に得ることができるなど、取得できる情報量は多い。制御ソフトウェアはマイクロソフトのKinect SDK(フリーソフト)とVisual Studioなどを用いて作成、改良することができる。本研究では一活用例を提唱したが、このセンサーは、作物の生長モニタリングにも使用可能で⁸⁾、施設園芸作物の生育診断や環境制御のシステムに組み込むことで(黒崎ら、特許出願中)、多種の用途に利用することが可能と考えられる。

摘 要

深度データを面的に収集できるKinect for Windowsを用いて、作物個体群の受光態勢を評価することを試みた。Kinectで撮影した作物の深度データを表計算ソフトで解析し、作物の占有する区画における葉の写っている面積割合(Ra)を算出した。Raは上方からみた水平受光面の大小を示す。また、これを深度別に分け、作物個体群の最高点から1 cmごとに積算し(Ra'),これがRaの80%の値になるまでの距離を葉の分布している距離で除した割合(Rp)を算出した。Rpは作物個体群への光の浸透性の強弱を示す。模型による疑似作物個体群やポット栽培のトマト個体群を用いた解析では、総葉面積(受光面積)の大きい場合にRaも大きくなり、個体群の光透過率が低い処理ほどRpが小さくなった。

また、パブリカ個体群では、Raが早朝増加、薄暮時減少、Rpが早朝減少、薄暮時増加を繰り返したが、これは薄暮時には早朝と比べて葉が下垂したためと考えられた。

引用文献

- 1) Monsi M, Saeki T. On the factor light in plant communities and its importance for matter production. *Ann. Bot.* 95: 549–567. 2005.
- 2) 大川泰一郎, 高瀬陽子, 石原 邦, 平沢 正. ダイズ品種エンレイとタチナガハの収量, 乾物生産の異なる要因の生理生態学的解析. *日本作物学会紀事*. 68: 105–111. 1999.
- 3) 中嶋樹人, 前原為徳, 山中弘久, 野元房子. タバコ群落の構造と受光態勢に関する研究 第1報 栽植密度試験(その1). *日本作物学会九州支部会報*. 34: 35–37. 1970.
- 4) 磯田昭弘, 吉村登雄, 石川敏雄, 中村康志, 野島 博, 高崎康夫. 簡易積算日射計フィルムによるイネ群落の受光態勢の解析. *千葉大学園芸学部学術報告*. 43: 39–43. 1990.
- 5) Watanabe S, Nakano Y, Okano K. Effect of planting density on fruit size, light-interception and photosynthetic activity of vertically trained watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. et Nakai) plants. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 72: 497–503. 2003.
- 6) Nishimura S, Koizumi H, Tang Y. Spatial and temporal variation in photon flux density on rice (*Oryza sativa* L.) leaf surface. *Plant prod. Sci.* 1: 30–36. 1998.
- 7) Khoshelham K. Accuracy analysis of Kinect depth data. *ISPRS Archives*. XXXVIII–5/W12: 133–138. 2011.
- 8) 黒崎秀仁, 岩崎泰永, 浜本 浩, 田中幹人, 梅田大樹. Kinect センサを利用した植物の成長モニタリング. In: 日本生物環境工学会2014年東京大会講演要旨. 東京. 9月8日–11日. 284–285. 2014.