

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24380145

研究課題名(和文)生育データサンプリングの最適化による篤農眼の情報化

研究課題名(英文) Optimization of weekly plant growth measurement for visualization of plant growth balance

研究代表者

仁科 弘重 (Nishina, Hiroshige)

愛媛大学・農学部・教授

研究者番号：70134509

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：栽培管理者は、トマト植物体の茎頂(茎の先端)から50 cm以内(直近の2週間程度で形成された部位)の枝葉を目視で観察し、樹勢(草勢)とよばれる指標で生育の良否を判断するが、この目視による評価を補完する目的で1週間に1回程度の頻度でテープメジャーやノギスを用いた生育調査(茎径や茎伸長速度など)が行われている。しかし、この生育調査データが栽培管理戦略の策定に十分に活用されていないのが現状である。本研究では、トマトの樹勢を把握するための生育調査プロトコルの確定とユーザーインターフェースの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Growers evaluate the growth balance of tomato plant by their visual observation. In addition, they use simple data on plant's growth, e.g. stem elongation rate, stem diameter and leaf size, which is measured weekly by using measuring tape and caliper. In this study, we established the mathematically examined measuring protocols for the weekly plant measurement and developed a visual user interface for intuitive understanding of tomato plant's growth balance.

研究分野：生物環境工学

キーワード：農業情報 生体情報 生育診断 見える化 ICT

### 1. 研究開始当初の背景

太陽光植物工場は、太陽を光源として利用して大規模な農産物生産を行う施設であり、わが国においても、トマト等の果菜類の周年栽培に利用されている (Fig. 1)。



Fig.1 太陽光植物工場におけるトマトの周年栽培

太陽光植物工場において通年での4定(定時・定量・定品質・定価格)の食料生産を達成するためには、時々刻々と変化する環境条件、さらには、季節的な環境の変化(夏季の強日射と高温、冬季の寡日射と低温)に適切に対応し、植物体の生育状態を一年中良好に維持する必要がある。ただし、太陽光植物工場では、同一作型(同一の播種日、収穫開始・終了日)の場合でも、同一の環境条件が繰り返されることはあり得ない。そのため、環境条件と植物体の生育状態を常時監視し、そのときの植物の状態に合わせた環境制御・栽培管理戦略の策定となる。

栽培管理者(現場)レベルでの生育診断では、『樹勢(growth balance)』という指標が国内外を問わず広く用いられている。「樹勢」は、「強い」「弱い」などの形容詞を用いて定性的に表現され、「樹勢が良い」とは、植物体が現在の環境条件に合った良好な生育状態にあることを意味する。熟練した栽培管理者(篤農家)は、茎径や茎伸長速度等を参考にしながら、目視観察と経験に基づいて樹勢を正確に判定する。つまり、この樹勢判定プロセスの自動化は、「篤農家の“目”の情報化」であり、篤農技術の情報化のファーストステップであると位置づけられる。

### 2. 研究の目的

篤農家は、トマト植物体の茎頂(茎の先端)から50 cm以内(直近の2週間程度で形成された部位)の枝葉を目視で観察し、樹勢を評価し、その評価に基づいて適切な栽培管理・環境制御を行っているが、現状では、樹勢の定義さえも不明確である。本研究では、樹勢判定の自動化を目的として、茎径および茎伸長速度の測定法と解析法の最適化、樹勢の数値評価指標策定を行った。

### 3. 研究の方法

トマトの樹勢把握のための代表的指標である茎径および茎伸長速度に着目し、商業的太陽光利用型植物工場で栽培されているトマト約1,000個体を対象とした多個体計測を

行い、これらの計測データの有用性について統計的な検証を行った。

#### (1) 茎径の測定法と解析法の最適化

多個体計測に先立ち、生産現場レベルにおける茎径計測に適した計測器具を決定するため、ノギスとテープメジャーを用いて茎径の計測を行った。

愛媛大学植物工場研究センターの植物工場Bで栽培されているトマト(*Solanum lycopersicum* L., 品種: TY 桃太郎さくら、定植後8ヶ月経過)8個体(P-1~8)を対象として、茎頂から15 cm下の主茎の茎径を計測した。なお、計測対象部位をマーキング (Fig. 2-A) し、6名の計測者(H-1~6)が同一個体の同一部位を計測するようにした。

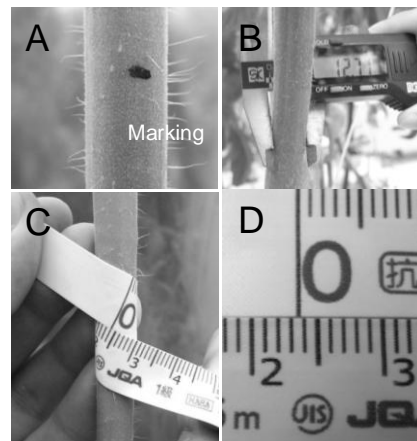


Fig.2 ノギスとテープメジャーを用いたトマト茎径計測

①ノギスによる茎径の計測: デジタルノギス (BLD-100, (株)新潟精機)を用いて、マーキング部の最大径(計測者の目視により判断)を0.1 mmの読み取り精度で計測した (Fig. 2-B)。

②テープメジャーを用いた茎径の推定: テープメジャー (KA-15, アズワン(株): グラスファイバー入りで伸縮性が極めて小)を、マーキング部の茎の周囲に緩みの無いように巻きつけ、茎の周囲長を0.2 mmの読み取り精度 (Fig. 2-D)で計測した (Fig. 2-C)。次に、得られた周囲長を円周長とする真円の直径を算出した。

③デジタル画像を用いた茎断面積と茎断面の重心距離差の計測: ノギスおよびテープメジャーを用いた茎径計測の直後に、マーキング部の主茎を水平に切断し、デジタルカメラを用いて茎断面のデジタル画像を撮影した (Fig. 3)。次に、Visual Basic.NETで作成したプログラムを用いて断面積と重心距離差を求めた。断面積(AS)の算出には、 $AS = NS / NR \times AR$ を用いた。ここで、NSは茎断面のピクセル数、NRは同一画像内に撮影された一定面積のリファレンス領域のピクセル数、ARはリファレンス領域の面積である。重心距離差(DP)の算出には、 $DP = (P_{MAX} - P_{MIN}) / MP$ を用いた。ここで、 $P_{MAX}$ は茎断面の重心と輪郭画素までの距離の最大値、 $P_{MIN}$ は茎断面の

重心と輪郭画素までの距離の最小値, MP は茎断面の重心と全輪郭画素までの平均距離である。なお, 重心距離差を算出するための前処理として, 茎断面デジタル画像 (Fig. 4-A) の 2 値化 (Fig. 4-B), 茎断面の重心決定, 茎断面の輪郭画素抽出 (Fig. 4-C) を行った。Fig. 4-D は, 上記アルゴリズムで決定した外接円 (半径 = PMAX) と内接円 (半径 = PMIN) を示している。

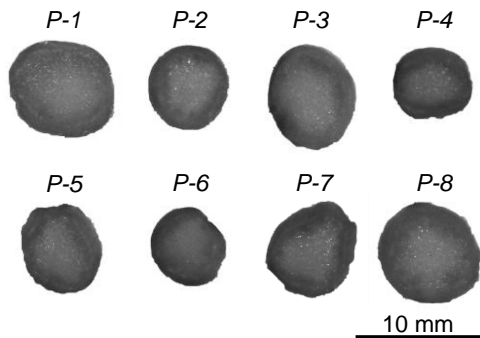


Fig.3 計測対象部の茎の断面のデジタルカラー画像

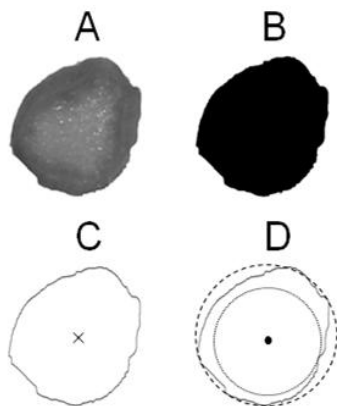


Fig.4 茎断面(A)の二値化画像(B), 抽出された輪郭(C), 輪郭の内接円と外接円(D)

## (2) 茎伸長速度と茎径のマニュアル計測値の信頼性の検証

太陽光植物工場において, トマト植物体の茎伸長速度と茎径は, 1 週間に 1 回のペースで数万個体 (母集団) のなかの 8~16 個体を対象として計測されている (従来法)。これまで, このような方法で計測された値が母集団の茎伸長速度と茎径を示す値として十分に信頼できるか否かについての統計的検証は行われておらず, このことが, これらの生体情報が栽培管理に活用されない一因になってきたと考えられる。そこで, 商業的太陽光植物工場で栽培されているトマト 1,000 個体以上を対象とした多個体計測を行い, 従来法で得られる茎伸長速度と茎径の計測値の信頼性を検証した。

Fig. 5 は, 計測フィールドとした世羅菜園 (株) (広島県) の外観と計測対象領域を示している。計測対象領域は, 170 m (E-W) × 76 m (N-S) であり, 約 30,000 個体のトマト (*Lycopersicon esculentum* Mill., 品種: ラ

ウンド 3, 播種: 2012/6/11-12, 定植: 2012/7/31-8/1) が栽培されている。この領域において, 一定間隔 (4.8 m [E-W] × 2.25 m [N-S]) で, 1,224 個体を対象として茎伸長速度および茎径を冬季 (2012/11/29 および 12/2) と夏季 (2013/9/22 および 9/29) に計測した。計測にはテープメジャーを用い, 計測技術に習熟した 7 人の計測者が分担して計測した。茎伸長速度は, 誘引ひもに茎頂位置をマーキングすることで 1 週間の茎伸長量を計測して求めた。茎径は前述した方法で計測した。

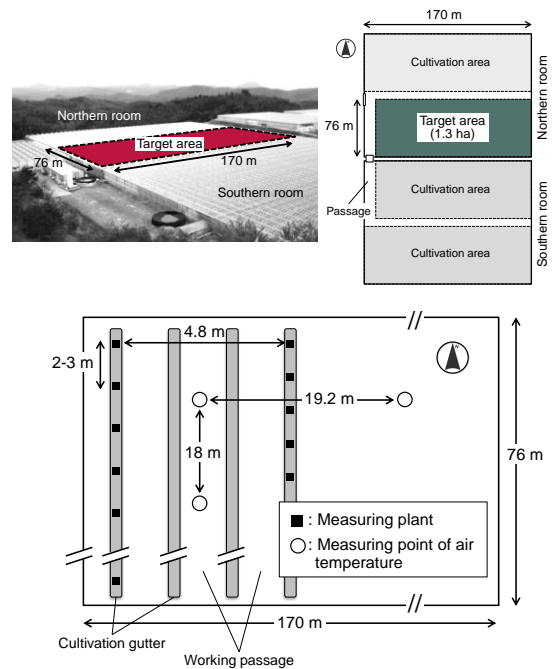


Fig.5 計測フィールドとした太陽光植物工場(世羅菜園(株), 広島県)の外観と計測対象領域

## 4. 研究成果

### (1) 茎径の測定法と解析法の最適化

Fig. 6-A に, 計測者毎 (H-1~6) のノギスとテープメジャーで計測した茎径の平均値を示す。計測者毎のノギスとテープメジャーで計測された茎径の平均値に有意差は認められず, さらに, 計測者間にも有意差は認められなかった。これは, 計測対象個体の茎径のバラツキが, 計測器具間および計測者間の計測誤差に比べて十分に大きかったためであると考えられる。

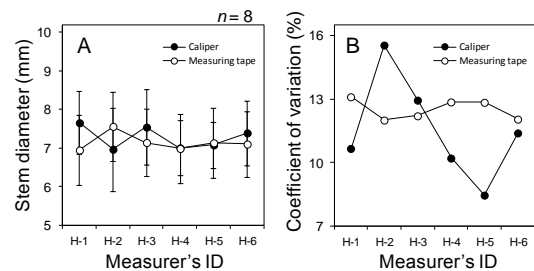


Fig.6 計測者毎 (H-1~6) のノギスとテープメジャーで計測した茎径の平均値 (A) と変動係数 (B)

Fig. 6-B に、計測者毎のノギスとテープメジャーで計測した茎径の変動係数を示す。ノギスの変動係数が計測者毎に大きく変動している ( $\pm 2.2\%$ ) にもかかわらず、テープメジャーの変動係数は全計測者でほぼ同じ ( $\pm 0.4\%$ ) であった。この結果は、テープメジャーを用いることで、計測者が代わってもトマトの茎径を一定の精度でモニタリングできることを示していた。

Fig. 7-A に、植物体毎 (P-1~8) の 6 名の計測者によって得られた茎径計測値の変動係数を示す。P-2 を除き、テープメジャーを用いた場合の変動係数がノギスを用いた場合よりも小さかった。この結果は、テープメジャーを用いた茎径計測の方が、ノギスを用いた計測よりも計測者に起因する誤差が小さいことを示していた。一方、P-2 のノギスの変動係数がテープメジャーよりも小さかった理由を明確にするために、計測対象部の茎断面の円形度を、重心距離差を用いて比較した。Fig. 7-B に、P-1~8 の茎断面の重心距離差を示す。P-2 の重心距離差が他よりも明らかに小さいことが分かる。この結果は、茎断面の形状が真円に近い場合に限り、ノギスを用いた方が計測者に起因する誤差を、テープメジャーを用いた場合よりも小さくできる可能性を示唆していたが、太陽光植物工場のトマトの茎断面の円形度は重心距離差が 0.2 以上のものが多いため、実用上はテープメジャーを用いた茎径計測を行うことが望ましいと考えられる。

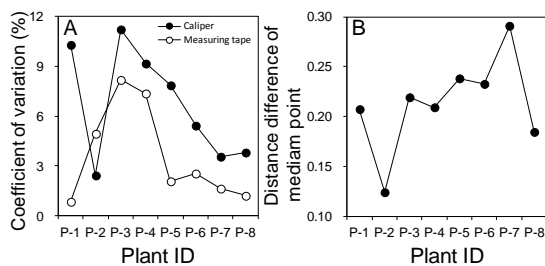


Fig.7 植物体毎 (P-1~8) の 6 名の計測者による茎径計測値の変動係数(A)と茎断面の重心距離差(B)

## (2) 茎伸長速度と茎径のマニュアル計測値の信頼性の検証

Fig. 8 に、冬季 (2012/12/2) の茎伸長速度 (A) と茎径 (B) の計測値のヒストグラムを示す。明確な正規分布が確認された。このほかの計測についても正規分布が確認された。そこで、標本平均から母平均を求め、標本の不偏分散から母分散を決定した。母集団の統計値 (母平均と母分散) を用いることで、計測対象標本数と得られる標本平均の信頼性 (95% 信頼区間) を統計的に評価したところ、標本数が 8 の場合でも、最も母分散が大きかった冬季 (2012/12/2) において  $\pm 12.9\%$  の正確さで母平均を推定でき、標本数が 16 では、 $\pm 5.5\%$  という高い精度で母集団の生育状態の把握が可能であることが分かった。このこと

は、8~16 個体の実用的な茎伸長速度および茎径の計測であっても、母集団の生育状態を把握するために十分な精度を有した生体情報を得ることができることを示していた。

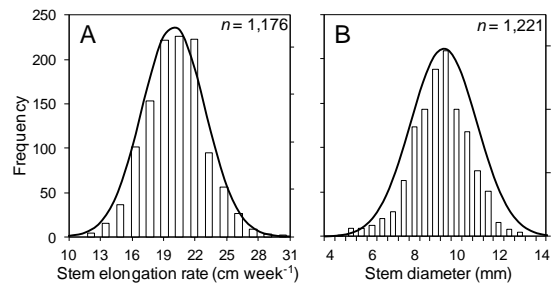


Fig.8 冬季 (2012/12/2) の茎伸長速度 (A) と茎径 (B) の計測値のヒストグラム

## (3) 茎伸長速度と茎径の不均一分布

栽培エリア全体を網羅するように多個体計測を行い、生育状態の不均一分布の把握を試みた。計測フィールド、茎伸長速度および茎径の計測方法は 3.2 と同様とした。なお、計測対象領域の気温分布を把握するために、2013/2/20-27 と 2013/9/22-29 にボタン型温度ロガー (1921G, (株)KN ラボラトリーズ) を用いて計測対象領域の気温分布を計測した。ボタン型温度ロガーは計測対象領域内に一定間隔 (19.2 m [E-W]  $\times$  18 m [N-S]) で合計 36 個配置した。

Fig. 9 に、茎伸長速度の分布を示す (茎径、夜間平均気温の分布図は省略)。茎伸長速度と茎径は、ノイズ低減のために  $3 \times 3$  の平滑化フィルタを適用した。夜間平均気温は 21:00~翌 3:00 の平均気温とした。

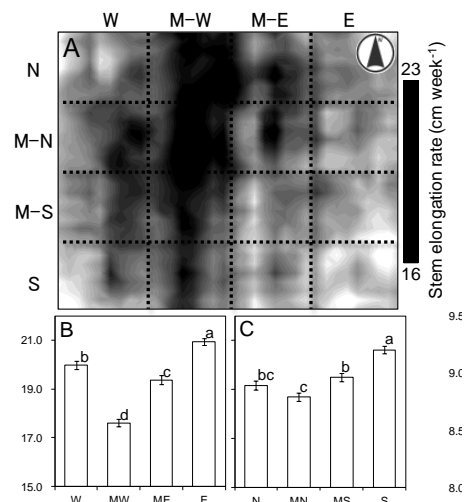


Fig.9 茎伸長速度の分布 (A)、東西方向 (W-E) の分布 (B) および南北方向 (N-S) の分布 (C)

この結果は、茎伸長速度と茎径が栽培領域内で不均一であることを示していた。具体的には、中央西寄りの茎伸長速度が小さく、茎径が大きい傾向が確認された。東西・南北方向の生育状態の不均一性を詳細に評価する

ために、東西方向に4等分(E[東側], M-E[中央東より], M-W[中央西より], W[西側]), 南北方向に4等分(N[北側], M-N[中央北より], M-S[中央南より], S[南側])して統計的に解析した。茎伸長速度は、中央西より[M-W]が有意に小さく(Fig.9-B), さらに、南側[S]が有意に大きいことが分かった(Fig.9-C)。茎径は、西半分([W]および[M-W])が、東半分([E]および[M-E])よりも大きかったが、南北方向の勾配は認められなかった。これらの茎伸長速度と茎径の分布特性は、夜間気温の分布特性に対応していることが確認された。

#### (4) 樹勢の見える化

生育調査によって得られた基本的な生体情報を用いて描画される「生育スケルトン」とそれを用いた直観的な樹勢把握法を開発した。生育スケルトンの描画に用いる生育調査データは、茎伸長速度 [cm week<sup>-1</sup>], 茎径 [cm], 葉数 [枚] (茎頂から50 cm以内にある葉の数), 葉面積指標 [cm<sup>2</sup>] (葉の全長と全幅の積)である。Fig. 10 に生育スケルトンの模式図を示す。

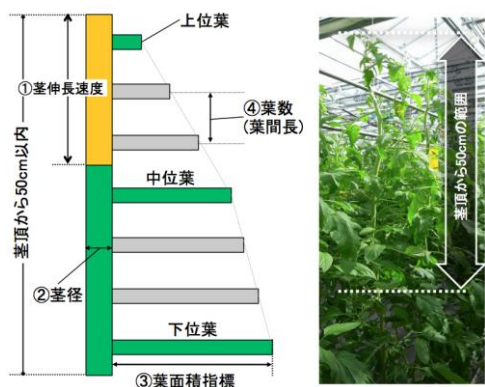


Fig.10 生体情報に基づいた生育スケルトンの描画

茎頂から50 cm以内を描画するため、高さは固定される。茎伸長速度は別色で表されており、茎径や葉面積指標は、変化量を容易に判別できるように係数を乗じて大小関係を強調表示(デフォルメ)してある。Fig. 11 に、愛媛大学植物工場研究センターで長期多段栽培されているトマトの4週間(2015/5/12~6/9)の生育スケルトンの変化を示す。茎伸長速度、茎径、葉の大きさや枚数の変化を直観的に把握することができる。

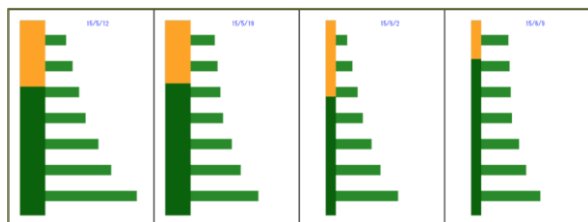


Fig.11 4週間の生育スケルトンの変化

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

1. 橋田 祐二・高橋 昭彦・高橋 憲子・仁科 弘重・高山 弘太郎. 高軒高温室における夜間気温および養液濃度の違いがパプリカの生育と収量に及ぼす影響. *Eco-Engineering*, 28(2), 29-36, 2016. DOI: <http://doi.org/10.11450/seitaikogaku.28.29> (査読有)
2. 高山 弘太郎. 植物生育状態の把握と栽培管理への高度なフィードバックに向けた取り組み. *施設と園芸*, 172, 60-65, 2016. (査読無)
3. 橋田 祐二・高橋 昭彦・下元 耕太・高橋 憲子・仁科 弘重・高山 弘太郎. 高軒高温室における長期の加湿処理による飽差環境の違いがパプリカの葉の形態・光合成機能および収穫物に及ぼす影響. *Eco-Engineering*, 27(3), 91-98, 2015. DOI: <http://doi.org/10.11450/seitaikogaku.27.91> (査読有)
4. 高山 弘太郎. クロロフィル蛍光画像計測ロボットによる高精度植物生体情報計測—太陽光植物工場の知能化にむけて—. 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), 2015-CVIM-197(5), 1-4, 2015. (査読無)
5. 高山 弘太郎. 太陽光植物工場における農作物生産の品質管理. *品質*, 45(2), 19-23, 2015. (査読無)
6. 高山 弘太郎. クロロフィル蛍光画像計測ロボットによる植物診断. *ハイドロポニックス*, 29(1), 28-29, 2015. (査読無)

[学会発表] (計12件)

1. 高山 弘太郎. 太陽光植物工場における植物診断ロボットによる農作物生産の品質管理—日本とオランダにおける展開—. 標準化と品質管理沖縄地区大会 2015~グローバル視点からの標準化活動を目指して~. 2015/10/13, 沖縄産業支援センター (沖縄県那覇市)
2. 高山 弘太郎. 太陽光植物工場における植物診断ロボットによる農作物生産の品質管理. 標準化と品質管理全国大会 2015. 2015/10/6, 都市センターホテル (東京都千代田区)
3. 高山 弘太郎. 植物診断ロボットによる高精度成育状態把握と環境調節の知能化. 施設園芸新技術セミナー・機器資材展 in 中国四国 (主催: (社)日本施設園芸協会). 2015/10/1-2, 三木町文化交流プラザ (香川県三木町)
4. 高山 弘太郎. 太陽光植物工場の知能化に向けた高精度生体情報計測. 植物感染生理談話会. 2015/8/24-26, 道後メルパルク松山 (愛媛県松山市)
5. 高山 弘太郎. 植物診断ロボットが可能にする高精度成育状態把握と環境調節の知能化. 全国野菜園芸技術研究会愛媛大会.

2015/7/14-16, 奥道後 壺湯の守 (愛媛県松山市)

6. 高山 弘太郎. 光合成と蒸散の基本 (CO<sub>2</sub> 施用・飽差制御) と植物生体情報の活用. 高知県須崎農業振興センター環境制御技術講演会. 2015/7/14, くろしお集出荷センター (高知県須崎市)

7. 高山 弘太郎. 植物生育の基本 (光合成と蒸散) と植物診断ロボットの活用. JA 土佐あき園芸研究会「試験展示圃成績発表会」. 2015/7/9, JA 土佐あき本所 (高知県安芸市)

8. Kotaro Takayama. Daily Measurement of Tomato Plant's Biological Information with a Chlorophyll Fluorescence Imaging Robot. 2015 年植物工場技術に関する公開講座-3. 2015/6/26, 中国農業大学 (中国北京市)

9. 高山 弘太郎. 植物診断ロボットが可能にする太陽光植物工場の知能化. AGRI-COCOON 農学における情報利用研究フォーラムグループセミナー. 2015/6/18, 東京大学 (東京都文京区)

10. 高山 弘太郎. クロロフィル蛍光画像計測ロボットによる高精度植物生体情報計測 - 太陽光植物工場の知能化にむけて -. 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会 IPSJ SIG-CVIM: COMPUTER VISION AND IMAGE MEDIA コンピュータビジョンとイメージメディア研究会プログラム. 2015/5/18-19, 日本科学未来館 (東京都江東区)

11. 高山 弘太郎. 施設園芸栽培管理のための生体情報ビッグデータ. 農業工学会 第 31 回シンポジウム「ビッグデータによる農業のイノベーション」. 2015/5/12, 東京大学 (東京都文京区)

12. 高山 弘太郎. 植物生体情報計測ロボットによる太陽光植物工場の知能化. ビッグデータ×農業シンポジウム (主催: 四国総合通信局, 国立大学法人愛媛大学). 2015/4/14, 愛媛大学 (愛媛県松山市)

〔図書〕 (計 3 件)

1. 高山 弘太郎: 施設園芸・植物工場ハンドブック (共著), 576 頁, 第 VII 部 植物工場, 第 3 章 太陽光型植物工場における生体情報計測と環境制御, pp. 323-327, 農山漁村文化協会 (農文協), 2015.

2. 高山 弘太郎・大政謙次: 閉鎖生態系・生態工学ハンドブック (共著), 448 頁, 第 6 章 センシングと生態工学 6-5 植物工場におけるセンシング, pp. 367-371, (株) アドスリー, 2015.

3. 高山 弘太郎: スマート農業—農業・農村のイノベーションとサステナビリティ (共著), 399 頁, 生体情報計測の活用, pp. 181-183, 農林統計出版, 2014.

〔その他〕

1. 愛媛大学植物工場人材育成プログラムにおける活用

<http://igh.agr.ehime-u.ac.jp/jinzai.html>

2. 日本施設園芸協会における植物生体情報計測

<http://www.jgha.com/kensyu4.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仁科 弘重 (NISHINA, Hiroshige)

愛媛大学・農学部・教授

研究者番号: 70134509

(2) 研究分担者

高山 弘太郎 (TAKAYAMA, Kotaro)

愛媛大学・農学部・准教授

研究者番号: 40380266

(3) 研究分担者

羽藤 堅治 (HATOU, Kenji)

愛媛大学・農学部・教授

研究者番号: 50274345

(4) 研究分担者

高橋 憲子 (TAKAHASHI, Noriko)

愛媛大学・農学部・助教

研究者番号: 80533306