

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01695

研究課題名(和文) 次世代農業支援のための高機能センシング技術の開発

研究課題名(英文) Advanced Sensing Technology for Supporting Next-generation Agriculture

研究代表者

谷口 倫一郎 (Taniguchi, Rin-ichiro)

九州大学・システム情報科学研究院・教授

研究者番号：20136550

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,430,000円

研究成果の概要(和文)：高品質な農作物を効率よく生産するために、主に3つの対象 栽培されている農作物の生育状況、耕地等生育環境、農作業の実施状況をセンシングし、その結果を適切に統合することが必要である。従前より開発されてきた各種センシング技術に加えて、農作物栽培現場内の微気象環境、植物形質発現・生体、農作業履歴等を時間的・空間的に詳細・リアルタイムかつ簡便に計測できるセンシング技術、およびセンシングされた情報を統合し、農業生産に必要な情報の可視化技術等の研究・開発が極めて重要となる。本研究では、主に、植物生体計測、圃場環境計測、農業者計測、センサ情報融合とヒューマンインターフェースの4つについて研究を進めた。

研究成果の概要(英文)：In order to efficiently produce high-quality farm products, it is important to observe the three subjects - the growth situation of cultivated crops, the cultivation environment such as cultivated land, the operational situation of agricultural work - and to integrate those results appropriately. In addition to various sensing technologies that have been developed in the past, sensing technologies that can measure micro-meteorological environment, appearance of plant growing process, agricultural work history, etc. in agricultural crop cultivation site in time and space. It is also important to integrate sensed information and to develop visualization technology for information which is necessary for agricultural production. In this research, we mainly carried out research on plant growth observation, odor-based field environment measurement, farm worker measurement, sensor information fusion and human interface.

研究分野：情報工学

キーワード：農業へのICT応用 圃場センシング ハイパースペクトルセンシング 匂いセンシング 農作業認識 植物生体計測

1. 研究開始当初の背景

日本の農業は、欧米に比べると、小規模施設での生産が圧倒的に多い。従って、欧米のような高度環境制御システムが導入されている施設は極めて少なく、栽培管理のコスト低減は十分に行われていない。小規模施設が生き残るには栽培管理の省力化・低コスト化だけでなく、高収入につながる高付加価値（高品質で安心安全）農作物の生産を志向する必要がある。しかし、現状では、多くの農業現場では、経験と勘による栽培管理が中心であり、高付加価値農作物を効率的に生産できるようにはなっていない。それは、農作業の手順が形式知化されていないためと言われているが、この問題を解決するためには、農作物生産に関わる様々な情報を詳細にセンシングし、それに基づいて農作業にかかる手順を容易に形式知化できるようにする必要がある。つまり、高品質な農産物を高い歩留まりで効率よく生産することができる、新しい農作物生産センシング技術を確立することが必要である。センシング技術開発の観点から見れば、農業応用という重要な出口からのバックキャストに他ならない。

2. 研究の目的

高品質な農作物を安定して効率よく生産するために、主に3つの対象—栽培されている植物（農作物）の生育状況、耕地等生育環境、農作業の実施状況—をセンシングし、その結果を適切に統合することが必要である。特に、従前より研究・開発されてきた各種の圃場センシング技術、農作物栽培支援システム等の基盤技術に加えて、農作物栽培現場（本研究では温室等の園芸施設を想定）内の環境（微気象環境）、植物形質発現・生体、エネルギー、農作業履歴等を時間的・空間的に詳細・リアルタイムかつ簡便に計測できるセンシング技術、およびセンシングされた情報を統合し、農業生産に必要な情報の可視化技術、園芸施設等の最適制御技術、生産者の要求に柔軟に対応できるソフトウェアやインタフェース技術等の研究・開発が極めて重要となる。本研究では、主に、植物生体計測、圃場環境計測、農作業計測、センサ情報融合とヒューマンインターフェースの4つについて研究を進める。

3. 研究の方法

前項で述べた4項目について、以下のよう

(1)植物生体計測：画像から植物形質評価、葉色診断、病変診断等を行うためのハイパースペクトルセンシングおよび3Dセンシング技術の開発を進めた。

(2)圃場環境計測：植物の生育状況や圃場の環境を観測するため、植物、微生物・昆虫、薬剤等から発せられる匂いを検知する匂いセンシング技術の開発を進めた。また、圃場環境を低コストで安定に計測するシステム

の開発も行った。

(3)農業者計測：農業者を継続的に計測するモーションセンサおよび位置センサによる活動センシング技術の開発を進めた。

(4)センサ情報融合とヒューマンインターフェース：上記(1)、(2)、(3)やその他既存のセンサで得られる計測データから農作物栽培支援情報を獲得するセンサ情報融合技術および獲得した情報を可視化する技術の開発を進めた。

4. 研究成果

(1)植物生体計測

ハイパースペクトルイメージングは光をより細かい波長成分に分解して取得する。従ってハイパースペクトルイメージングでは人間やRGBカメラでは捉えられない情報まで取得することができる。取得された対象の詳細なスペクトル情報は特徴分析や物体の識別に有用であるため、ハイパースペクトルイメージングは様々な分野で応用されている。その有用性から様々なハイパースペクトルイメージング手法が提案されてきたが、それらの手法は大きく三種類の分光方式に分けられる。

一つ目はプリズムやグレーティングなどの光学素子により分光する手法である。光学素子は高価であり、撮影方式には一般的にラインスキャン方式が採用されるため、対象の二次元情報の取得にも時間がかかる。二つ目は特定の波長のみを通すフィルタをセンサ前に配置して分光する手法である。異なる波長特性をもつフィルタを切り替えながら撮影することでスペクトル情報を取得する。対象の二次元情報の取得に適しているが、フィルタホイールによる実装では装置が大型になる。三つ目は特定のスペクトルを持つ照明を用いて分光する手法である。異なる波長特性をもつ照明を切り替えながら撮影することでスペクトル情報を取得する。フィルタ方式同様対象の二次元情報の取得に適しているが、環境光の影響を受けやすく、照明の切り替えが目立ち人間を不快にさせるという問題がある。

ここでは、農業応用の観点から、観測の高速性、装置の簡素性に重点を置き、三つ目の手法をベースとしたLEDアクティブ照明によるハイパースペクトルイメージングシステムを開発した。プロトタイプとして、650nm、830nm、940nmの波長をもつ3種のLEDで照明を行うシステムを構築し、植物の健康度を知る上で必要な、植物の葉に含まれる葉緑素（クロロフィル）量を推定した。一般にはSPADメータと呼ばれる計測器で測定するが（図1にハイパースペクトルセンシングで得られたVegetation IndexとSPAD値の相関を示す）、これは点単位での計測であり、空間的な分布を求めるのには手間がかかる。一方、ハイパースペクトルセンシングの手法を

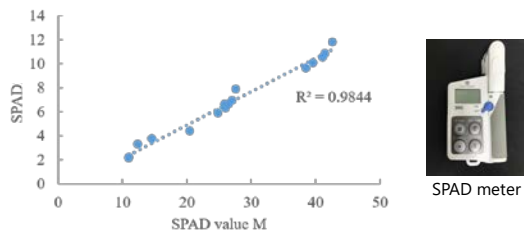


図1 : Vegetation Index と SPAD 値

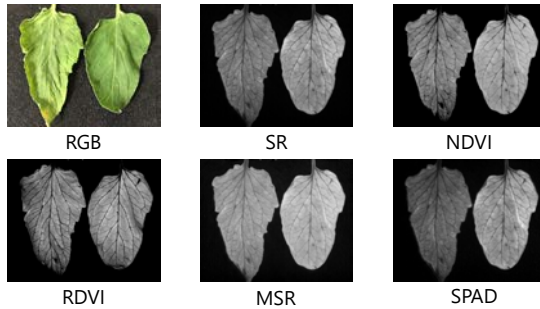


図2 : ハイパースペクトルセンシング

用いると、面単位での計測が可能になるので(図2)、葉の詳細な状態を簡便に計測できることになる。

3Dセンシング技術に関しては、植物生育特徴量である草高、葉の向き、葉の面積(視認できている部分)等を計測することを目的に、RGB-Dカメラ(Microsoft社製Kinect Ver. 2.0使用)を用いた植物体計測システムを開発した。計測された深度(Depth)情報には対象物表面における外部光の反射と照射光との干渉によるノイズ等を含んでいたため、深度情報は複数回撮影した平均値を用いた。高さおよび面積が実測できる立方体状の木片を使った計測試験では、高さに1mm程度、面積に7%程度の誤差を有することを確認した。次に、供試植物にはコマツナを用い、簡易水耕栽培キットを用いて実験室内にて栽培を行った。本実験では栽培期間中の温湿度の制御は行わず、ハロゲンランプにより7:00~20:00の補光のみを実施した。Kinectは栽培ベッドの上方90cmに設置し、30分間隔で植物体の撮影を行った。その結果、栽培日数に対して草高が徐々に増大していく様子を計測できていることを示した。しかしながら、植物体の姿勢は生長によって常に変化するので、例えば、葉の曲がりが大きくなった場合に草高が減少するなど正しく計測できない事例も発生した。加えて、赤外線の反射特性の影響によって草高が正しく計測できない場合も一部確認された。

また、成長予測や植物形質評価等の実現には植物の3D形状データベースの構築が急務であり、その点にも注力した(図3)。

(2) 圃場環境計測

植物は生育状況に応じて生体内の遺伝子発現や代謝状態を反映した揮発性化学物質(bVOC)を生成する。例えば、トマトは成熟

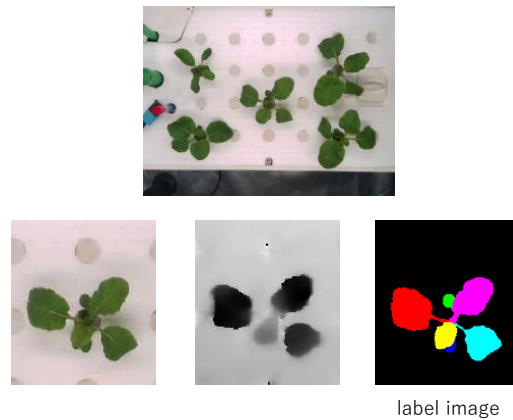


図3 : 小松菜3D画像データベースの構成

状態に合わせて bVOC 6-methyl-5-hepten-2-one (MHO) を発生し、トマト果実特有の匂いを持つ。また、テルペン類は植物が出す代表的な bVOC であり、匂いによる生物間コミュニケーションに用いられる多様な bVOC が存在する。中でも cis-jasmone (CJ) は植物が病害虫に侵されたときに発生するテルペンであり、植物ホルモンであるジャスモン酸由来の物質である。CJ を測定することで、植物の生育状態に関する重要な情報を得ることができる。CJ のモニタリングが可能な化学センサの実現は高い価値があり、CJ センサを LSPR (localized surface plasmon resonance) と分子鑄型 (molecularly imprinted; MI) 技術により実現した。LSPR は金属ナノ粒子のプラズモン共鳴がナノ粒子周囲の誘電率により吸収波長と吸光度を変化させる現象で、高感度に化学物質を検知できる。また MI 技術として MI ゼルゲル (MISG) マトリクスにより実現した。用いたマトリクス材料は tetrabutoxy titanium を重合した酸化チタン骨格 SG である。機能性モノマーとして trimethoxyphenylsilane (TMP), trimethoxy (2-phenylethyl) silane (TM2P), benzyltriethoxysilane (BTE) を用い、検知対象テルペンに最適な MISG を重合した。MISG 層は金ナノ粒子をガラス表面に固定した基板上にスピコートで作製し、MISG 層へのテルペン類吸着を LSPR で検出した。また、金コロイドを MISG 中に配合し、LSPR 増強により感度を向上させた(図4)。

図5に4種類の MISG-LSPR センサの応答結果として、鑄型構造を持たない SG を基準としたテルペン類 (CJ, α -pinene, limonene, γ -terpinene) の吸着量を示した。TMP を用いた MISG-TMP が CJ 吸着量と選択性が高かった。機能性モノマーを用いていない MISG は CJ 選択性は高いが、吸着量が少なく、センサ性能は高くなかった。これらのセンサ応答の差を用い、テルペン類の識別も可能であった。以上、化学物質情報の農業 ICT 応用が可能とする、植物の生育状態に関する情報を検知できる植物 bVOC センサの開発に成功した。

低コストの圃場環境情報モニタリングシ

システムについては、データ集約・送信装置（低価格カード型コンピューター：Raspberry Pi B+）、温湿度センサ、照度センサ、CO2 センサを用いて開発した。温湿度センサは正確な計測を行うために乾電池で、照度センサは運用の自立化のため小型太陽電池（数日間無充電運用を想定）でそれぞれ稼働する仕様とした。施設園芸では、温湿度センサおよび CO2 センサをデータ集約・送信装置に直に搭載した。計測された情報は、5 分間隔でデータ集約・送信装置に無線伝送（Zigbee を使用）され、3G 回線を介してクラウド上のサーバに転送・保存される。さらに、サーバ内の情報は PC やスマートフォンなどでいつでも確認できる。本システムをイチゴハウス（2 棟）に設置し実証試験を行った。その結果、製作した環境計測装置は、乾電池駆動の温湿度センサは 6 カ月から 1 年程度の期間連続計測できる性能を、小型太陽電池で駆動する照度センサは太陽光により発電した電力で問題なく動作することをそれぞれ確認した。

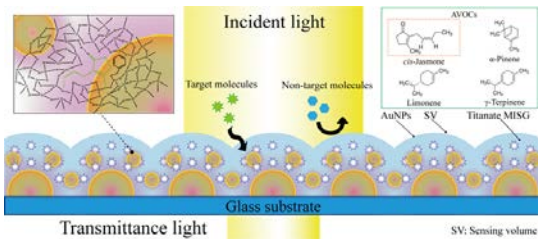


図 4：MISG-LSPR センサの構造

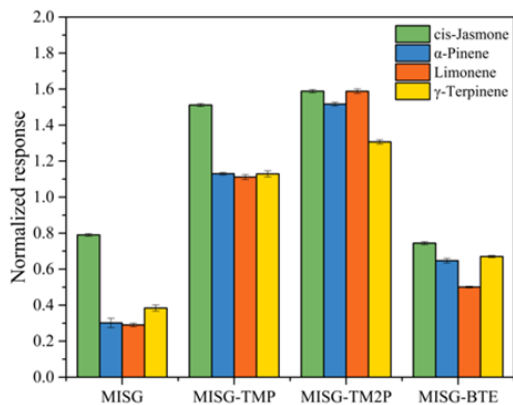


図 5：MISG-LSPR センサのテルペン類応答

(3) 農作業計測

実環境においては、同じ農場であっても、場所ごとに温度や湿度など環境条件にばらつきがあり、収穫量も異なる。ここでは、場所ごとの収穫量を獲得するために、農作業者の位置と収穫動作を計測している。具体的には、位置計測のために農場内にビーコンを設置している。また、収穫動作の計測のために農作業者が装着した IMU センサが搭載された腕時計型デバイスを利用している。そして、計測した位置と収穫動作を合わせることで可視化を行っている（図 6）。

位置推定に関しては、農作業エリアを小区

画に区切り、区画単位での位置推定を行う手法を開発した。農場内に複数台のビーコンを設置し、スマートフォンで受信したビーコンの電波強度から、農作業者の作業している区画の推定を行った。推定精度を高めるための工夫として、農作業者が移動可能なエリアを限定したり、短時間で区画の大きな移動はないという、制約を与えることで高い精度でエリア単位での位置推定を行うことができた。

収穫動作の計測に関しては、IMU センサが搭載された腕時計型センサを利用して、農作業者の農作業中の両腕の加速度を計測し、加速度の時系列データから収穫動作をしている時刻の認識を行った。認識には、Random Forest を用いて行い、認識に用いる特徴量は波形の大きさと傾きを考慮したものとなっている。

取得した農作業情報を収穫に関して区画ごとに可視化を行い（図 7）、提案手法の精度評価を行った。区画ごとの収穫量の真値と推定値の絶対誤差平均は 0.7[個/区画]となった。誤差そのものはまだ十分に低いとは言えないが、農作業者にこの結果を提示したところ、農作業者がハウスに対して直感的に把握している状態、すなわちどの区画で収量が多いかと合致していることを確認した。

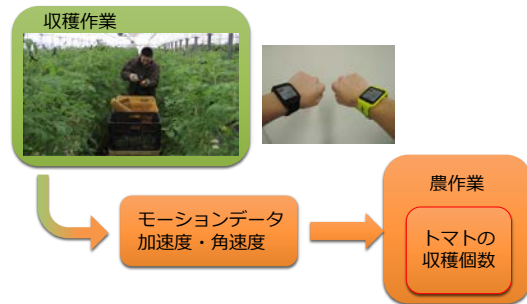


図 6：農作業計測に基づく収穫量の詳細化

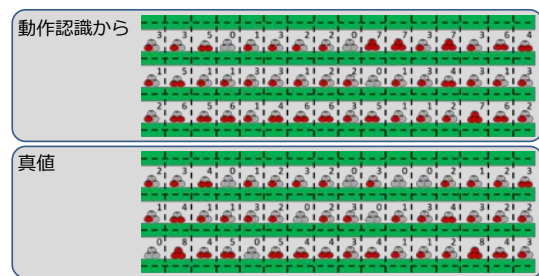


図 7：獲得した収穫量マップ

(4) センサ情報融合とヒューマンインターフェース

圃場環境や作物生育状態の時空間計測を VR 体験可能なシステムを開発することを最終目的に、その基盤技術としての無線走行制御可能な移動台車に環境計測用センサと全天球カメラを搭載した計測装置を開発した。本装置は画像計測部と走行制御部で構成される。画像計測部には、圃場内の様子を記録するため全天球カメラと RGB カメラを用いた。

走行部の制御には Raspberry Pi を採用し、インターネット経由で装置を操作させながら、圃場環境情報と画像情報を計測できるようにした。収集した情報は全てサーバ内に転送・保存した。本装置の性能は九州大学内の実験用ハウスで走行実験を行い、移動台車の走行特性、計測した情報の転送性能および全天球カメラおよび RGB カメラを用いて撮影した画像情報の特性について調べた。走行実験は同一路面上を 5 回走行させた際の直進性を調べた。計測結果は全長約 3m の走行で 2.94cm のズレを生じた。このため、ズレを補正する制御の導入が必要であることがわかった。また、全ての走行実験において計測された環境情報および画像情報はサーバへ正しく転送できることを確認した。全天球カメラで圃場内を撮影した場合、1 ショットで広範囲の栽培ポットの画像情報を得ることができるため、RGB カメラよりも効率よく作物の状態を確認できた。全天球画像は一部に注目して拡大することが可能で、同範囲の RGB 画像と比べても果実部を認識するには十分な精度を有していた。全天球カメラは圃場内の空間情報を記録するカメラとして有用であった。

また、ヒューマンインターフェースに関しては、収穫量などが直感的に分かるような歌詞システムを構築した (図 7)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

[1]岡安 崇史, 農業・植物フェノタイピング研究における映像技術の利用, 映像情報メディア学会誌, Vol. 72, pp. 260-263, 201, 査読付。

[2]Li.Shang, C.Liu, B.Chen, K.Hayashi, Development of molecular imprinted sol-gel based LSPR sensor for detection of volatile cisjasmone in plant, Sensors & Actuators B, Vol.260, pp.617-626, 2018., 査読付。

[学会発表] (計 31 件)

[1]M.Ohsaki, H.Nagahara, R.Taniguchi, Hyperspectral imaging for measuring vegetation indices, Int. Workshop Frontiers of Computer Vision (IW-FCV2018), 2018.

[2]S.Sakurai, H.Uchiyama, A.Shimada, D.Arita, R.Taniguchi, Two-step Transfer Learning for Semantic Plant Segmentation, 7th Int. Conf. Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM2018), 2018.

[3]橋本, 有田, 島田, 内山, 谷口, 農作業者の腕動作認識によるトマト収穫量の空間分布の可視化, 信学技報パターン認識・メディア理解 (PRMU2017-134), 2018.

[4]Y.Hashimoto, D.Arita, A.Shimada, H.Uchiyama, R.Taniguchi, Visualization of spatial distribution of tomato yields based on action

recognition, Int. Workshop Frontiers of Computer Vision (IW-FCV2018), 2018.

[5]L.Shang, C.Liu, K.Hayashi, Localized surface plasmon resonance modified with molecularly imprinted sol-gel sensor for cis-jasmone vapor detection, IEEE Sensors 2017, 2017.

[6]M.Ohsaki, H.Nagahara, T.Ikeda, R.Taniguchi, Hyperspectral imaging using flickerless active LED illumination, 13th Int. Conf. Quality Control by Artificial Vision (QCAV2017), 2017.

[7]谷口 倫一郎, サイバーフィジカルシステムに基づく社会サービスの構築について(招待講演), 日本工学アカデミー九州支部講演会, 2017.

[8]高場, 岡安, 吉永, 有田, 北野, 安武, 植物栽培空間の高密度計測・可視化手法の開発, 農業情報学会年次大会, 2017.

[9]境, 岡安, 吉永, 有田, 谷口, 井上, 平井, 光岡, RGB-D 画像を用いた植物生育特徴量の計測とその精度評価, 農業情報学会年次大会, 2017.

[10]高場, 岡安, 吉永, 有田, 谷口, 安武, 北野, 井上, 平井, 光岡, 農業情報の可視化・共有のための仮想現実技術の応用, 農業食料工学会九州支部, 2017.

[11]岡安, 高場, 有田, 吉永, 谷口, 井上, 平井, 光岡, 圃場環境・植物生体計測のための小型移動ロボットの開発, 農業食料工学会年次大会, 2017.

[12]H.Uchiyama, S.Sakurai, M.Mishima, D.Arita, T.Okayasu, A.Shimada, R.Taniguchi, An Easy-To-Setup 3D Phenotyping Platform for KOMATSUNA Dataset, Int. Conf. Computer Vision Workshop (CVPPP2017), 2017.

[13]Daisaku Arita, Human sensing for smart agriculture (invited), Int. Sym. Frontier of Science, Technology and Engineering, 2017.

[14]H.Uchiyama, S.Sakurai, Y.Hashimoto, A.Hanasaki, D.Arita, T.Okayasu, A.Shimada, R.Taniguchi, Sensing technologies for advanced smart agricultural systems, Int. Conf. Sensing Technology (ICST2017), 2017.

[15]T.Okayasu, A.Nugroho, A.Sakai, D.Arita, T.Yoshinaga, R.Taniguchi, M.Horimoto, Affordable Field Environmental Monitoring and Plant Growth Measurement System for Smart Agriculture, Int. Conf. Sensing Technology (ICST2017), 2017.

[16]王, 商, 吉岡, 佐々, 林, 分子認識蛍光マイクロビーズによる光学的な植物 BVOC 情報の測定. 電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティクス研究会, 2017.

[17]Takashi Okayasu, Community-based approaches by ICT-using farmers towards 2050s (invited), AASSA - SCJ Workshop "Role of Science for Inclusive Society," 2017.

[18]櫻井, 内山, 谷口, FCN を用いた葉領域分割, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, 2017.

[19]王, 吉岡, 佐々, 林, 植物 BVOC 検知のための蛍光性 MIP マイクロビーズの開発, 第 33 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2016.

[20]A. Sakai, T.Okayasu, T.Yoshinaga, A.P.Nugroho, D.Arita, E. Inoue, Y. Hirai, M. Mitsuoka, Effective investigation of 3D feature value extraction for plant body surface using rgb-d sensor (invited), Int. Symp. Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering, 2016.

[21]A. P. Nugroho, T.Okayasu, R. Taniguchi, E. Inoue, Y. Hirai, M. Mitsuoka and L. Sutiarsa, Quantification of 2D Lateral Leaf Motion on Mature Plants Foliage using Optical Flow to Study the Circadian Rhythms (invited), 2nd Int. Symp. Agricultural and Biosystem Engineering, 2016.

[22]橋本, 有田, 島田, 岡安, 内山, 谷口, スマートデバイスを用いた農作業情報の自動計測, 第 19 回画像の認識・理解シンポジウム, 2016.

[23]Y. Hashimoto, D.Arita, A. Shimada, T. Okayasu, H. Uchiyama, R. Taniguchi, Farmer position estimation in a tomato plant green house with smart devices, Int. Symp. Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering, 2016.

[24]Y. Hashimoto, D.Arita, A. Shimada, T. Yoshinaga, T. Okayasu, H. Uchiyama, R. Taniguchi, Measurement and Visualization of Farm Work Information, Int. Conf. Agriculture Engineering, 2016.

[25]王, 山下, 吉岡, 劉, 林, 光学的センシングによる植物匂い物質の可視化, 電子情報通信学会総合大会, 2016.

[26]Takashi Okayasu, Trials on ICT application for typical small and medium scale farmers in Japan agriculture, Asian Workshop on Smart Sensor Systems, 2016.

[27]橋本, 有田, 島田, 内山, 谷口, スマートデバイスを用いた農作業者の動作認識, 電子情報通信学会総合大会, 2016.

[28]橋本, 有田, 島田, 内山, 谷口, スマートデバイスを用いた農作業者の位置推定, 電子情報通信学会総合大会, 2016.

[29]王, 山下, 吉岡, 劉, 林, 分子鋳型ポリマー蛍光ナノビーズを用いた植物匂いの可視化, 第 32 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2015.

[30]H. Wang, S. Yamashita, H. Yoshioka, C. Liu, K. Hayashi, Visualization of Plant Odor with Molecular Imprinted Polymer using Fluorescent Nano Beads, International Conference on Bioelectronics, Biosensors, BioMedical Devices, BioMEMS/NEMS and Applications

2015, 2015.

[31]Takashi Okayasu, Agricultural informatics in Japan (For typical small and medium scale farmers) (invited), 11th Int. Workshop Nondestructive Quality Evaluation of Agricultural, Livestock and Fishery Products, 2015.

〔図書〕(計 1 件)

[1]T.Okayasu, A.P.Nugroho, D.Arita, T. Yoshinaga, Y.Hashimoto, R.Taniguchi, Sensing and Visualization in Agriculture with Affordable Smart Devices (in Smart Sensors at the IoT Frontier), Springer-Verlag GmbH, 2017.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷口 倫一郎 (TANIGUCHI, Rin-ichiro)
九州大学・大学院システム情報科学研究
院・教授
研究者番号: 20136550

(2) 研究分担者

林 健司 (HAYASHI, Kenshi)
九州大学・大学院システム情報科学研究
院・教授
研究者番号: 50202263

有田 大作 (ARITA, Daisaku)
長崎県立大学・情報システム学部・教授
研究者番号: 70304756

岡安 崇史 (OKAYASU, Takashi)
九州大学・農学研究院・准教授
研究者番号: 70346831

島田 敬士 (SHIMADA, Atsushi)
九州大学・大学院システム情報科学研究
院・准教授
研究者番号: 80452811

内山 英昭 (UCHIYAMA, Hideaki)
九州大学・大学院システム情報科学研究
院・助教
研究者番号: 90735804

吉永 崇 (YOSHINAGA, Takashi)
公益財団法人九州先端科学技術研究所・オ
ープンイノベーション・ラボ・研究員
研究者番号: 10598098