

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：52501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H02308

研究課題名（和文）太陽光型植物工場のための任意ストレス付与可能な水蒸気飽差制御システムの開発

研究課題名（英文）Vapor Pressure Deficit Control System to Adjust Stress for Sunlight Type Plant Factory

研究代表者

栗本 育三郎（Kurimoto, Ikusaburo）

木更津工業高等専門学校・情報工学科・教授

研究者番号：00195562

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：細霧発生が遅れに影響されない水蒸気飽差制御システムを提案実装することで、我々の従来手法に比べて、目標水蒸気飽差に対して誤差を1/5（1.5%）に改善することができた。また、熱流体シミュレーション技術を用いて植物工場内の気温・流速・湿度・VPDの3次元的な分布および時間挙動、ミスト誘引によるゆらぎの発生と周期性を明らかにした。さらに、植物工場内平面9点にセンサーネットワークIoT（気温、湿度、水蒸気飽差など）を設置し、空間補間法（Kriging法）を適用し移動センサーにて検証したところ、空間水蒸気飽差推定において、平均二乗誤差0.039という高精度を実現できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

精度良く水蒸気飽差を一定化することが可能になり、植物群落へ最適なストレスをかけることで、糖度や形状など果菜類の品質調整をすることが実現できた。また、実験計測では得ることのできない、気流やVPDのデータの時空間分布を得ることができた。太陽光型植物工場シミュレータの基盤技術ができた。本シミュレータは、トマトだけでなくあらゆる果菜類ごとに最適な環境構築の提案が可能となる。さらに、空間水蒸気飽差のリアルタイム計測IoT技術と空間データ推定手法の確立により、空間の環境状況をリアルタイムで把握できると同時に生育状況とデータマイニングすることで、植物体からの蒸散量の調整が可能となる。

研究成果の概要（英文）：Our proposal control method of vapor pressure deficit, which is not influenced by the delay of the fog generation using the fine mist, has improved the error (1.5%) to 1/5 than our conventional method to a setting value of vapor pressure deficit. Moreover, three-dimensional distribution and time action of the air temperature, the flow velocity, the humidity, and the vapor pressure deficit in the plant factory, and the fluctuation and periodicity were clarified using thermal fluid simulation technology. Furthermore, nine IoT sensors were installed in the plant factory, when the space interpolation method (the Kriging method) was applied and verified by the mobile sensor, the estimate of space vapor pressure deficit has realized high accuracy of the mean square error 0.039.

研究分野：センサーネットワーク，計測制御工学，信号処理，システム情報学

キーワード：水蒸気飽差 VPD センサーネットワーク 太陽光型植物工場 シミュレータ 時間相関イメージセンサー
リングビュー光学系 IoT

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

太陽光を利用する太陽光型植物工場では、夏場の高温抑制のために細霧冷房を導入する施設が増えてきている。細霧冷房は加湿しながら冷却できるため空間の温湿度を同時に調整可能だが、これまでの霧の噴霧制御には経験的に調整されたオンオフ制御が用いられてきた。

植物工場で果菜類の収量増加を実現するには、光合成効率を高める必要がある。光合成には水とCO₂が使われ、これらの調整に気孔からのCO₂交換と蒸散が必要不可欠である。このCO₂交換と蒸散は植物周囲の空気の水蒸気飽差 (Vapour Pressure Deficit: VPD) に強く影響を受ける。水蒸気飽差が小さすぎるまたは大きすぎる場合には、気孔が閉じてしまうことで低CO₂ストレスや水ストレスを発症するため、水蒸気飽差は、栽培植物に適切な値に維持されることが望ましい。これまでに水蒸気飽差に着目した制御手法の模擬的特性解析もあるが、実地での実証例はない。申請者らは以上の先行知見に基づき、光合成に寄与するパラメータとして水蒸気飽差に着目し、農水省のプロジェクトで細霧冷房の噴霧圧を制御可能な気温・水蒸気飽差制御システムの構築と実証を行ってきた。実地での運用による結果、夏季・冬季ともに収量を10~20%増加させることに成功している。すなわち、VPDの時系列変動を考慮しつつ、目標値に精度良く収束させる制御を実現出来れば、植物の生育環境が最適化されると推測できる。一方で、VPDと植物の生育についての関係性はまだ十分に明らかになっていない。VPDを任意の目標値に安定して収束させることが出来れば、気孔コンダクタンスを意図的に任意の値に誘導することになり、植物にとって不適切な環境、すなわち任意のストレス環境を構築することも可能であると考えられる。つまり様々なVPD環境下における植物のストレス状態を計測することで、VPDとストレスの間の関係を明らかにし、生育に最適な環境となるVPDを導き出すことが可能となる。

2. 研究の目的

太陽光型植物工場において、高付加価値の果菜類生産が求められている。申請者らは、光合成に寄与するパラメータとして水蒸気飽差に着目し、細霧によって水蒸気飽差を制御するシステムの研究開発と実証を行ってきた。その結果、開発されたシステムは、夏季・冬季ともに収量を10~20%増加させることに成功した。しかし、一般的には外乱やむだ時間の影響で水蒸気飽差が時系列振動する問題があり、安定化させる報告例はない。本研究では、多点リアルタイム環境センシングに基づく植物工場シミュレータプラットフォームを開発し、環境のモデル化を行ない、モデルベース水蒸気飽差制御手法の確立を目指す。本手法により、植物生育に関して任意ストレス付与可能な水蒸気飽差制御が実現され、植物工場における収量や品質調整への応用が期待できる。これまで、申請者らは、VPDを一定に保つための制御として、古典制御の代表であ

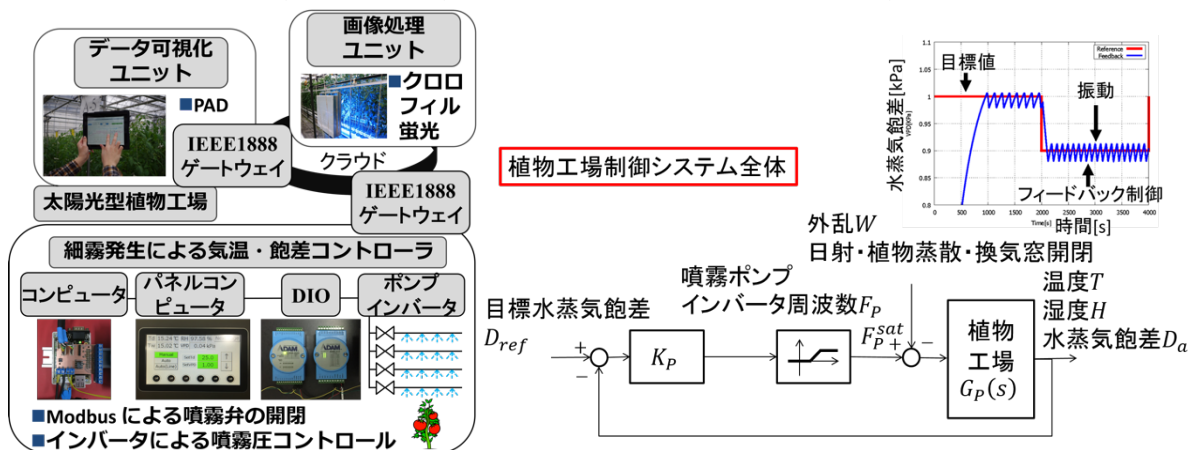


図1 これまで実装してきた植物工場の飽差制御システム

るP制御を導入し、目標VPDに収束させる制御を実装してきた。しかし、制御に用いるアクチュエータが霧の噴霧装置であるため、VPDを減少させる制御は能動的に行なえるが、VPDの増加は日射や換気などの受動的な効果に頼らざるをえない。また、入力指令から噴霧開始までにかかる時間と噴霧後から植物体への到着するまでにかかる時間の2段階のむだ時間が含まれる。これらの影響により、目標値近傍で振動が発生してしまう。(図1参照)

申請者らは、この振動を軽減するため単純な差分値を用いた傾き検出による振動軽減手法を提案し、実地実験により一定の軽減効果が得られることは確認している。しかし、VPDの目標値が変わるたびにパラメータの調整が必要であり、様々な植物種への適用は難しい。パラメータ調整を自動化するための適応モデルの構築も試みているが、パラメータが複雑に関与しており、まだ最適解を導き出すまでに至っていない。また、モデルを構築するためには、正確なむだ時間を計測し蓄積したデータから数理モデル化を行なう必要がある。申請者らの研究グループでは、未

知らぬ間に時間を補償する通信外乱オブザーバを可変むだ時間に拡張したハイパスフィルタ適用型通信外乱オブザーバに関する研究成果を有しており、この手法をVPD制御に適用することで、上記の問題を解決できる可能性があることがわかってきた。本申請研究は、まさにこの研究成果を上記の手法に適用したものである。

3. 研究の方法

本研究課題では、太陽光型植物工場のVPDを一定値に制御するため、センサ配置や計測条件の検討と制御の理論評価を行なうためのシミュレータの作成、サーボを導入し目標追従制御、データ駆動制御による収束精度の向上を実施する。具体的に、以下の3項目について、シミュレーションと実地実験を繰り返す。

(1) 植物工場シミュレータプラットフォームの開発

① 植物工場のセンシングシステムの開発

シミュレータの検証のために、植物工場施設内の複数地点にセンサネットワークを構成し、長時間の定点観測を行なう。測定する環境データは、温度・湿度・光量子・空間水分量、二酸化炭素濃度とし、計測地点の位置情報と合わせてサーバに時系列記録できるシステムを開発する。さらに、シミュレータ内で植物体の影響を模擬するために、蒸散に関する情報を植物体から収集する。本申請研究においては、サップフローメーターや熱画像による植物体の蒸散状態に関係すると考えられる茎内水流量や葉表面の温度状態といった物理量を取得し、植物体全体としての蒸散量の推定を試みる。

② 植物工場の熱流体シミュレータの開発

三次元非定常熱流体解析に基づく熱流体シミュレータによって植物工場を模擬したシミュレーション環境を構築する。センシングによって得られた各地点の環境データに基づいて、細霧冷房による水噴霧の気化プロセス、工場内温度やVPDの変化を観察できるシミュレータを開発する。

(2) むだ時間補償に注目した提案制御手法の開発

むだ時間を補償可能な制御手法の代表的なものはスミス法であるが、この手法で十分な性能および安定性を有する制御を実現するためにはむだ時間の正確な同定が必要である。そこで、本研究課題においては、むだ時間の同定を必要としない「通信外乱オブザーバ」CDOB (Communication Disturbance Observer)を導入する。「通信外乱オブザーバ」では、可変むだ時間や非線形要素に対応できないため、申請者らの研究グループが開発した「ハイパスフィルタ適用型通信外乱オブザーバ」CDOB-HPF (Communication Disturbance Observer with High-Pass Filter)により性能向上を試みる。提案した制御方法と飽差制御シミュレーション結果を示す。(図2参照)

ハイパスフィルタ通信外乱オブザーバを植物工場へ適用

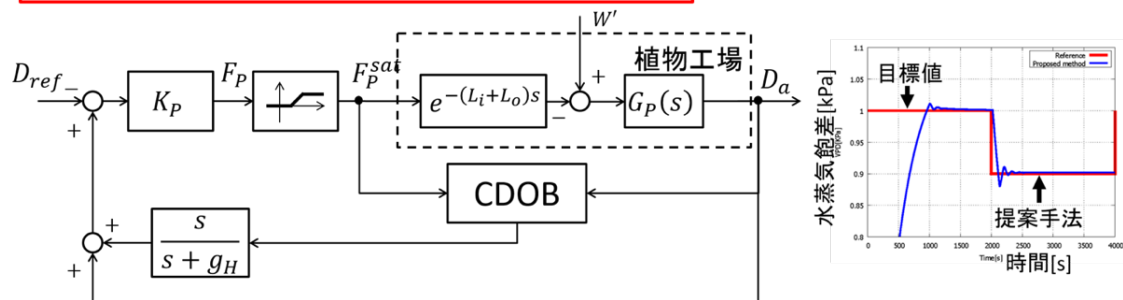


図2 ハイパスフィルタ適用型通信外乱オブザーバ植物工場適用と飽差制御シミュレーション結果

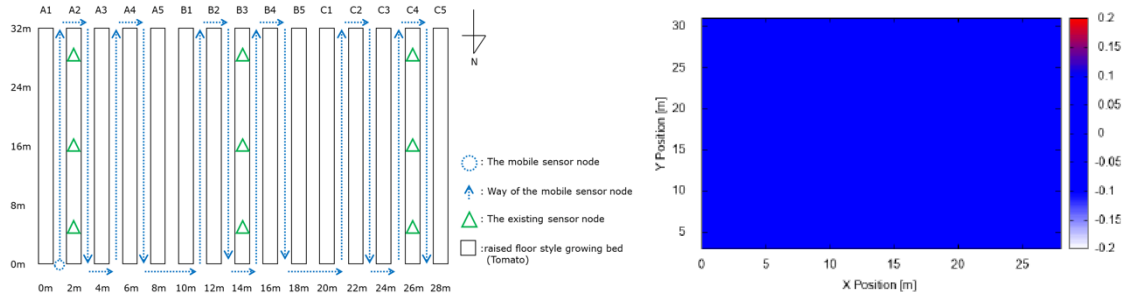
(3) 果菜類評価手法の開発

対象物体と撮像装置間の距離や物体表面の向きの影響を受けない法線ベクトル及び反射率分布を得られる時間相関カメラと近赤外を含む4波長LEDをリング状に配置したリングビュー光学系を用いて、正確な反射率分布からトマト果実の品質を評価する手法を開発する。

4. 研究成果

太陽光型植物工場において日射シールドを実現する強制通風筒にVisara HMP155温湿度センサを装着した多点リアルタイムIoT環境センシングシステムを開発し、太陽光植物工場の平面9点に設置し、Webブラウザにてリアルタイム観察を実現できた。また、施設外と群落並びに通路のH2O/CO2濃度をLicor Li-850を用いた10点リアルタイムIoT環境センシングシステムを開発し、ブラウザ上で観察できるようにした。空間のVPD分布の推定法としてKriging補間法を提案して、実際の植物工場で有効性を検証し、令和1年9月に、国際会議SICE Annual Conference 2019で発表し、As a finalist in the Poster Presentation Awardを受賞した。秋に行なった実験

において最大誤差0.07 [kPa], 最低誤差0.00 [kPa], RMSEは0.039と高精度を実現できた. (図3参照)



Kriging 補間法による VPD 誤差

図3 太陽光型植物工場内9点環境IoTと移動環境IoTセンシングシステムによる Kriging 補間法の検証

熱流体シミュレーションソフトウェアとHPC環境(並列計算機)により,太陽光型植物工場の細霧発生シミュレータプラットフォームを開発し,空間中の気温・流速・湿度を数値予測できる環境を整え,太陽光型植物工場の細霧発生時のVPDの変化をシミュレートすることが可能となった.これにより,大域的な旋回する気流が存在することや,細霧噴霧時に気流に誘引されたVPDの振動が生ずることが判明した.(図4参照)

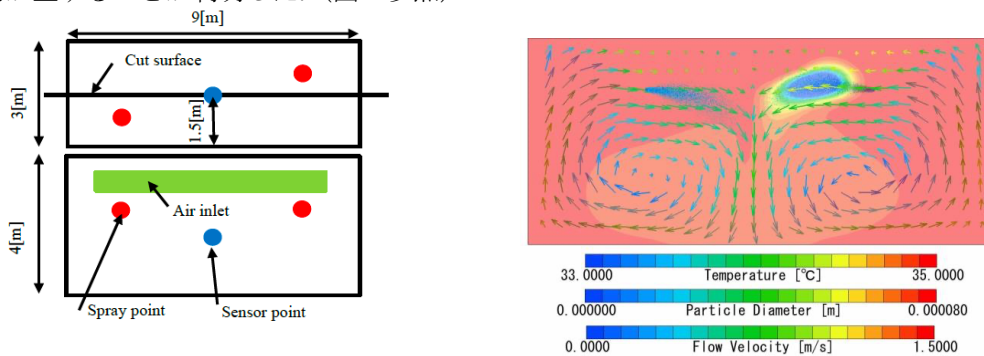
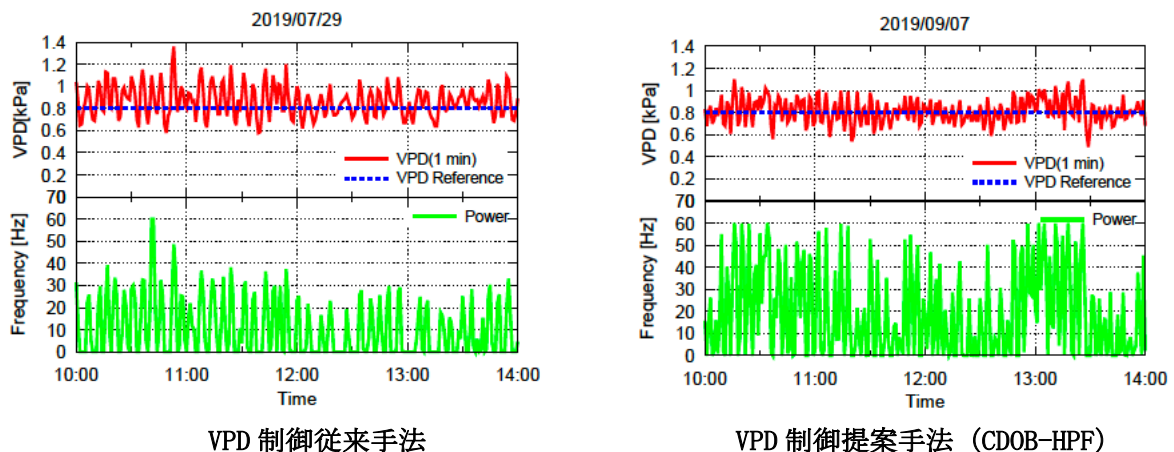


図4 太陽光型植物工場モデルにおける噴霧600 sec後の断面流速ベクトル図と気温コンタ図

実際の植物工場のモデルを構築し伝達関数を求め,水蒸気飽差安定化制御の基本実験を行なった.実施に当たっては,申請者らが考案した「ハイパスフィルタ適用型通信外乱オブザーバ」CDOB-HPFを水蒸気飽差制御シミュレータに入れ安全性を検証後,実システムへ試行導入を行ない,実稼働並びにシステムに導入することができた.図5に示すとおり,提案手法では,従来手法よりインバータの動作周波数が高く噴霧が多くなるためVPDを目標値付近に維持が可能となり,提案手法が優位であることがわかる.植物体へのストレス軽減が期待できる.誤差は1/5程度減少し,提案手法によって精度を向上させることが出来た.(図5参照)



VPD 制御従来手法

VPD 制御提案手法 (CDOB-HPF)

図5 太陽光型植物工場 VPD 制御従来手法と提案手法検証

トマト果実の品質を評価するため、時間相関イメージセンサと近赤外を含む単色 LED4 光源からなるリングビュー光学系を構築し、近赤外光のトマト果実法線ベクトルから正確な反射率を求め、混合正規分布により特徴を分類する手法を提案した。令和 2 年 12 月計測自動制御学会で発表し、優秀講演賞を受賞した。970[nm]の波長の光の照射で得た反射率の度数分布図をもとに作成した混合正規分布から得られる標準偏差と平均値を用いた。その結果、糖度の高いトマトは標準偏差が 0.035 より大きい範囲に、糖度の低いトマトは標準偏差が 0.035 より小さい範囲に位置する傾向と、糖度の高いトマトは平均値が大きくなる傾向を示し、品質評価の手法となることが判明した。(図 6 参照)

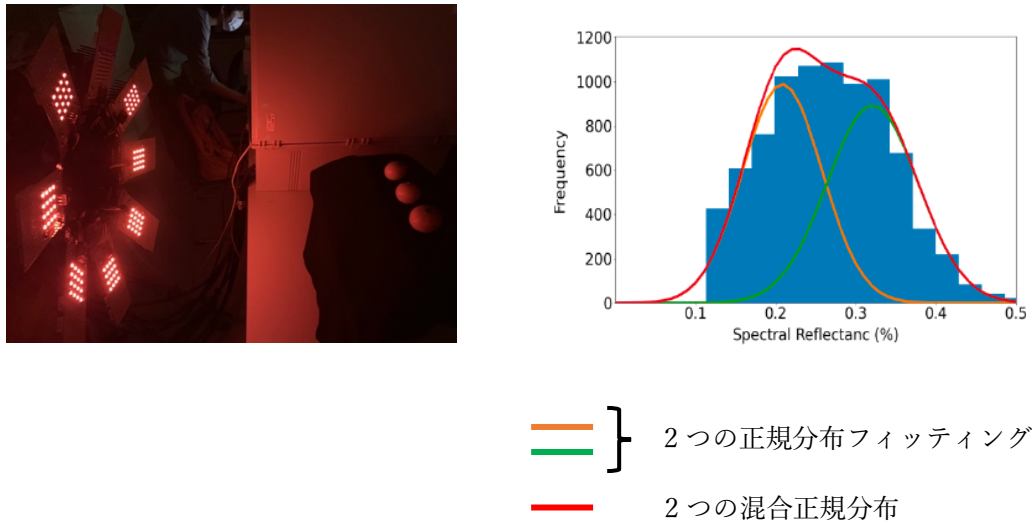


図 6 時間相関イメージセンサーとリングビュー光学系を用いたトマト法線ベクトル検出による正確な近赤外反射率度数分布と混合正規分布による分類手法の検証

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuichi Itoh, Yosuke Asano, Masao Maruyama, Ikusaburo Kurimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 System identification of fine mist cooling system in sunlight type plant factory with Thermo-Fluid Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2020	6. 最初と最後の頁 1924 - 1927
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Chihiro KAGEYAMA, China SASAKI, Hiroshi IWATA, Yosuke ASANO, Yuichi ITOH, Ikusaburo KURIMOTO	4. 巻 -
2. 論文標題 Construction of Spatial H2O/CO ₂ Measurement IoT System for Sunlight Type Plant Factory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2020	6. 最初と最後の頁 1921 - 1923
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takashi KOGA, Ken'ichi YAMAGUCHI, Hiroshi IWATA, Ikusaburo KURIMOTO	4. 巻 13
2. 論文標題 Kriging Interpolation Evaluation of Vapor Pressure Deficit in Plant Factory with Solar Light	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 131 - 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/jcmsi.13.131	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takashi Koga, Ken'ichi Yamaguchi, Hiroshi Iwata, Ikusaburo Kurimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Kriging Interpolation for Vapor Pressure Deficit in Plant Factory with Solar Light	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2019	6. 最初と最後の頁 1000 - 1003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 渡邊孝一, 浅野洋介, 栗本育三郎	4. 巻 73(4)
2. 論文標題 異業種での映像情報メディア利用〔第29回〕太陽光型植物工場における環境計測制御のための不可視情報の可視化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会誌	6. 最初と最後の頁 719 723
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mitsuru BABA, Ikusaburo KURIMOTO	4. 巻 -
2. 論文標題 Measurement and Evaluation of Ripening Process of Immature Tomato with Correlation Image Sensor and Ringview Optical System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2018	6. 最初と最後の頁 1245 - 1249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Iwata, Ikusaburo Kurimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Active Sensing Platform for Mathematical Analysis in Plant Factory with Solar Light	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2018	6. 最初と最後の頁 1273 - 1275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuko Kakazu, Hiroshi Iwata, Ikusaburo Kurimoto, Daichi Moriuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of the Handy Type LID System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2018	6. 最初と最後の頁 1245 - 1249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 西村 朋也, 栗本 育三郎
2. 発表標題 時間相関イメージセンサ及びリングビュー光学系を用いたトマトの品質評価
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奈良学, 伊藤裕一, 浅野洋介, 丸山真佐夫, 栗本育三郎
2. 発表標題 数値流体解析を用いた太陽光型植物工場における細霧冷却効果の検証
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 影山稚紘, 佐々木千奈, 岩田大志, 浅野洋介, 伊藤裕一, 栗本育三郎
2. 発表標題 太陽光型植物工場における空間H2O/CO2濃度観察IoTシステムを用いたトマト定植後の解析
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木千奈, 影山稚紘, 岩田大志, 浅野洋介, 伊藤裕一, 栗本育三郎
2. 発表標題 トマト栽培における局所空間H2O/CO2濃度観察IoTシステムを用いた信号解析
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 影山稚紘, 渡邊孝一, 浅野洋介, 伊藤裕一, 栗本 育三郎
2. 発表標題 太陽光型植物工場における空間H2O/CO2濃度観測IoTの開発
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 構勇海, 渡邊孝一, 浅野洋介, 伊藤 裕一, 栗本育三郎
2. 発表標題 太陽光型植物工場における移動ピークルを用いた環境計測システム
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤正英, 二村紗世, 浅野洋介, 渡邊孝一, 栗本育三郎
2. 発表標題 隣接する太陽光型植物工場の出力差に基づくパラメータ同定
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野洋介, 渡邊孝一, 伊藤正英, 伊藤裕一, 栗本育三郎
2. 発表標題 太陽光型植物工場における細霧発生に伴う変動むだ時間を補償する水蒸気飽差制御
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗本育三郎, 構勇海
2. 発表標題 農福工連携 第2報 - 太陽光型植物工場における移動ピークルの試作 -
3. 学会等名 日本福祉工学会第23回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Vincent LEE, Ikusaburo KURIMOTO
2. 発表標題 Environmental Monitoring IoT System in an Artificial Plant Factory -Measurement of Dissolved Oxygen, Temperature, Relative Humidity and Vapor Pressure Deficit-
3. 学会等名 International Workshop on Effective Engineering Education(IWEEE) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chihiro KAGEYAMA, Kouichi WATANABE , Yousuke ASANO, Yuichi ITOH , Ikusaburo KURIMOTO
2. 発表標題 Spatial H2O/CO2 Concentration IoT System
3. 学会等名 International Workshop on Effective Engineering Education(IWEEE) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奈良学, 伊藤裕一
2. 発表標題 太陽光型植物工場における温湿度環境の数値流体解析
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第59回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mitsuru BABA, Ikusaburo KURIMOTO
2. 発表標題 valuation of Ripening Process and Shape of Tomato with Correlation Image Sensor and Ringview Optical System
3. 学会等名 International Workshop on Effective Engineering Education (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白坂誠浩, 浅野洋介, 伊藤裕一, 渡邊孝一, 栗本育三郎
2. 発表標題 太陽光型植物工場における噴霧位置切替制御の熱流体シミュレーションによる検証
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飛澤雄己, 渡邊孝一, 岩田大志, 栗本育三郎
2. 発表標題 太陽光型植物工場の水蒸気飽差制御における環境データの多点リアルタイム計測IoTシステムの構築
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 嘉数(大野)裕子, 岩田太志, 栗本育三郎, 福地健一
2. 発表標題 コマツナの栽培日数に伴う385nmを励起波長とした蛍光強度比の変化について
3. 学会等名 日本生物環境工学会2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	伊藤 裕一 (Itoh Yuich) (60396900)	木更津工業高等専門学校・機械工学科・准教授 (52501)	
研究分担者	浅野 洋介 (Asano Yousuke) (70390416)	木更津工業高等専門学校・電気電子工学科・准教授 (52501)	
研究分担者	岩田 大志 (Iwata Hiroshi) (50613139)	奈良工業高等専門学校・情報工学科・准教授 (54601)	
研究分担者	渡邊 孝一 (Watanabe Kouichi) (20549315)	木更津工業高等専門学校・情報工学科・准教授 (52501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------