

温室における複数の環境パラメータを配慮した 省電力な温度の制御手法

柴 智瀚¹ 杉本 一彦² 串田 高幸¹

概要：既存の温室制御システムは、ユーザとのインタフェースを備える一方で、ユーザの介入、高消費電力と制御対象(温度)外の環境パラメータ(湿度、二酸化炭素濃度)に影響を与える問題がある。本研究の目的は、IoT(Internet of Things) デバイス側で環境パラメータと制御機器の多対多の関係をもとに制御のタイミングを決め、ユーザからの操作を要らず、自動的に低消費電力な制御システムを設計することである。また、通信側はIoT向けのBLEを使用することによって、通信回数を削減することで消費電力を削減する。さらに、制御の方は一般的なエアコンで温度制御と違い、窓の開け閉めを利用することにより制御機器の消費電力を減らす。実験では、小型のケースを使用して温室環境をシミュレートし、温室内外の環境を監視するために、温室の内外で2つのIoTデバイスを同時に設置した。温室内のIoTデバイスは内部環境に応じて温室外のデバイスに通知する。温室外のデバイスは窓を開閉する用のサーボモータが備えている。評価は、本研究による二時間の温室内の温度曲線と温室外の温度曲線を比べ、制御回数と制御時間をもとに既存の加熱設備の消費電力量を比較する。結果は、同じ温度変化区間における加熱マットによる消費電力量は8.8Wh、提案手法による消費電力量は 9.6×10^{-3} Whである。

1. はじめに

背景

農業は古くから人類の基礎産業とされてきた。最近、質と量の面での食品需要の高まりにより、農産物の工業化と集約化の必要性が時間とともに重要になる。農業施設は多く存在する。これらの施設を設立する目的はたくさんあるが、その中で最も重要なのは、作物に影響を与える可能性のある環境条件から作物を保護することである。環境パラメータ(温度、湿度と二酸化炭素濃度)は、野菜の植え付け日と生産量および品質に重要な役割を果たす[1]。近年、温室外の影響を避けられる効率的な作物生育の方法の一つである温室栽培は世の中に注目を浴びている。温室栽培は科学的な管理方法を実装し、作物の防災能力を向上させ、病気や害虫の予防、環境汚染と炭素排出の削減、収量を増やすことができる[2][3][4]。温室管理は作物の最適な生育環境を保つために温室内の環境を常に監視しなければならない。IoTは、環境パラメータを継続的に監視するための有効なツールの一つであり、農業セクターを近代化するための多くの革新的なソリューションを提供している非常に有望なテクノロ

ジーである[5]。IoTによる温室監視システムは温室内の環境を制御または維持することができる。例えば日射量を増やすことで、作物の光合成を改善し、成長率を高めることができる[6]。また、IoT監視システムはリアルタイムデータを継続的に取得し、農薬の使用、人件費の投入、温室内のエネルギーと資源の利用率を減らし、それによって生産量と品質が高められる[7][8][9]。

WSN(ワイヤレスセンサーネットワーク)は有線通信の代わりに数多くの無線センサーと接続し、配線の時間とコストを削減するメリットがある。急速に発展していくIoTのトレンドに合わせて、ほとんどの継続的な監視アプリケーションは、有線ネットワークからワイヤレスの低電力短距離通信に移行している[10]。温室では、気候条件の継続的な監視と管理が不可欠であるため、低消費電力の通信方式が求められている。さまざまな通信規格の中で、消費電力が少なく、通信距離が短く、堅牢性が高いという特徴をもっているIoT向けに設計されたBLEは、温室のIoTデバイスの自動処理に最適な通信技術である[11]。

課題

温室のIoTは、近年多くの学者の注目を集めているが、インタフェースと自動化に焦点を当てる一方で、植物自体の生育環境とそれを制御する機器の関係に注意されていない

¹ 東京工科大学コンピュータサイエンス学部
〒192-0982 東京都八王子市片倉町1404-1

² 東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科コンピュータサイエンス専攻
〒192-0982 東京都八王子市片倉町1404-1

問題がある [12][13]. 通常, 作物の生育環境パラメータ (温度, 湿度, 二酸化炭素濃度) と制御機器の関係は 1 対 1 ではなく, 1 対多または多対多である. たとえば図 1 の示すように, 作物が最適な生育の温度範囲から外れると, 温度を制御するスプリンクラーまたはファンを利用するべきである. しかし, 冷却に使用されるアクチュエータの 1 つであるスプリンクラーでは, 適切な温度に下がると同時に, 湿度が上昇するか, 植物の成長に適した湿度を超えることもある. 温度を制御するために加熱設備を使って, 最終的には水の飽和水蒸気量が上昇し, 逆に相対湿度が下がっていく危険性がある.

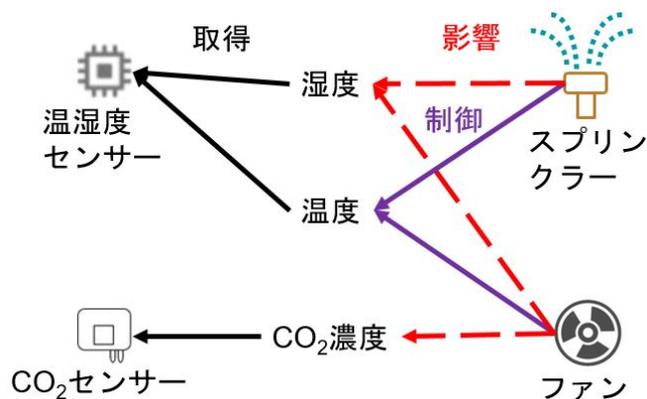


図 1 温度制御に伴う湿度のバランスが崩れる問題

温室における IoT の多くの例では, 温室環境を制御するための研究で複数の制御機器が使用されている. たとえば, 同じ温室内で, 換気扇とスプリンクラーを同時に使用して, 環境全体を制御する [14]. ただし, これらの制御機器は, 前述のように 1 つの環境パラメータを制御するだけでなく, 複数の制御機器を使用するための最も省電力的な方式を見つける方法についてもほとんど言及されていない. これらの制御機器と環境パラメータの関係が適切にモデル化されていない場合, 制御機器が再度トリガーされるか, 複数の制御機器が同時に稼働されて, 屋内環境のバランスが維持されることになる. 最悪の場合, 図 2 のように悪循環の発生にさえつながる可能性がある.

各章の概要

第 2 章以下の各章の概要について説明する. 第 2 章では本稿の関連研究について紹介する. 第 3 章では前述した課題を解決する方法を具体的に提案し, ユースケースも説明する. 第 4 章では実際の実装と実験を紹介する. 第 5 章では本稿が提案した方法の評価と分析である. 第 6 章では本稿の提案と実装について検討または議論する. 最後に第 7 章で結論を出す.

2. 関連研究

M. Danita らは, IoT デバイスの Raspberry PI に基づい

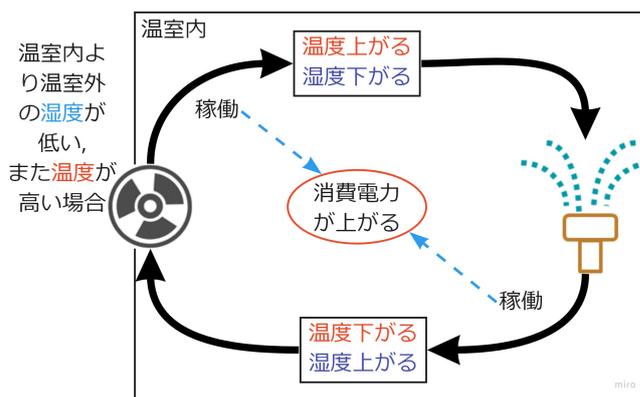


図 2 制御側の悪循環

て, 温室に複数の場所で温室データを取得し, Thingspeak クラウドと Web ページを介してデータの保存と可視化を実現した [15]. データ取得に関するセンサーは, 温湿度センサー DHT11 と土壤水分センサー YL69 を使用して, 温室を複数の部分に分割し, データを 1 つずつ収集した. 彼らは実験作物をほうれん草として設定し, ほうれん草に適した生存温度と湿度のしきい値をモデル化した. しきい値を超えると, 冷却ファンまたはウォーターポンプを使用してモデルに従って環境を制御する. ただし, この研究では, 冷却ファンとウォーターポンプが環境にどのように影響するか, および作物がほうれん草ではない場合やほうれん草が異なる成長期間にある場合でも, モデルに適用できるかどうかについては検討していない問題がある.

P.V.Vimal らは, 環境パラメータを監視し, 最適な植物の成長と収量を達成するために, 低コストの Arduino ベースのシステムを設計した [12]. 彼らは DHT11 センサー, 土壤水分センサー, LDR センサー, pH センサーを使用して, それぞれ温度, 湿度, 含水量, 光強度, 土壤 pH 値の正確な値を提供した. その後, すべての環境パラメータがオフラインおよびオンラインで Android フォンに送信される. センサーのデータはあらかじめ定義されたしきい値を超えると, ユーザーに SMS を送信して通知する. 次にユーザーは SMS で制御アクチュエータ (冷却ファン, 排気ファン, ウォーターポンプ, 照明機器, モーターポンプ) を介して環境パラメータを調整することで温室環境を制御できる. すべての環境パラメータはイーサネット経由でサーバーに送信され, データベースに保存される. したがって, ユーザーは Android スマホのアプリケーションを介してパラメータを監視および制御できる. しかし, ユーザーが通知にすぐに対処できない場合があることについてまだ課題が残る.

Dewi らは, IoT 技術に基づく温室モニタリングシステムを設計した [13]. このシステムでは, 温湿度センサー DHT22, 土壤温度センサー DS18B20, および光強度センサー BH1750 を使用して環境データを取得し, データは MQTT プロトコルを介してゲートウェイとローカルサーバーに送信され, データベースに保存する. 受信したデー

タは、Node-RED ダッシュボードを介してブラウザに表示され、かなりの成功率のデータ受信が得られた。しかし、この研究には、温室内の環境をどのように制御するか、そしてどの制御方法を使用するかという課題がまだある。

3. 提案方式

この章では具体的な提案手法とユースケースについて説明する。

提案方式

本研究は湿度と二酸化炭素濃度を作物の最適な生育範囲内に維持した状態で、温室内の温度を調整する。そのため、作物とアクチュエーターの間に多対多の関係を確立し、最初にどのアクチュエーターを使用するかを指定する必要がある。本研究では、サーボモータを使用し、窓を開閉することで温室内外の空気を交換し、冷暖房の効果を実現した。そのため、窓の開閉による環境影響パラメータについても検討する必要がある。例えば本研究では、窓の開閉は主に空気の対流によって引き起こされることを考慮して、環境パラメータは湿度、温度、二酸化炭素濃度として設定する。

提案の流れは図3に示す。温室内の温度を監視する前に、作物の最適生育範囲を決める必要がある。さまざまな作物に柔軟に対応するために、まずユーザーから温度、湿度、二酸化炭素濃度の最大値と最小値を手動で入力してもらう。これに基づいて、温室内外の温度に応じて温度の対応表が確立される。対応表を図4に示す。図4では、温室の内部は、最高温度より高い温度、最低温度より低い温度、および最高温度と最低温度の中間に分けられている。同じことが温室の外でも当てはまり、3行3列の対応表が作成できる。温室内の温度は設定された温度の最大値より高いまたは最小値より低い時に、温室外の湿度と二酸化炭素濃度をまず調べる。温室外の湿度と二酸化炭素濃度は設定された湿度と二酸化炭素濃度の最大値より低いかつ最小値より高い時に、最適な生育範囲内として判定する。温室外の最適な生育範囲内ではない場合は窓が開かないという何もしない待機状態にする。温室外の湿度と二酸化炭素濃度は最適な生育範囲内の場合は、引き続き温室外の温度を調べ、図4の対応表をもとに窓を使用して温度を制御するかどうかを決定する。たとえば、図4の①(A)の自然換気の場合、つまり、温室内の温度が最小値より低く、温室外の温度が最大値より高い場合、窓を開いて温度を制御する。そうではない場合は、待機状態にする。窓を開けて制御しても、待機状態にしても、新しいラウンドの温室内の温度を監視する前に10分間待つ。

温室の特徴は、基本的に温室外と相互作用しない閉鎖環境を提供することであることを考えると、窓を開ける最大時間を指定する必要がある。この研究では、最適な窓の開放時間と窓開放による温度制御の効率を調査するために、

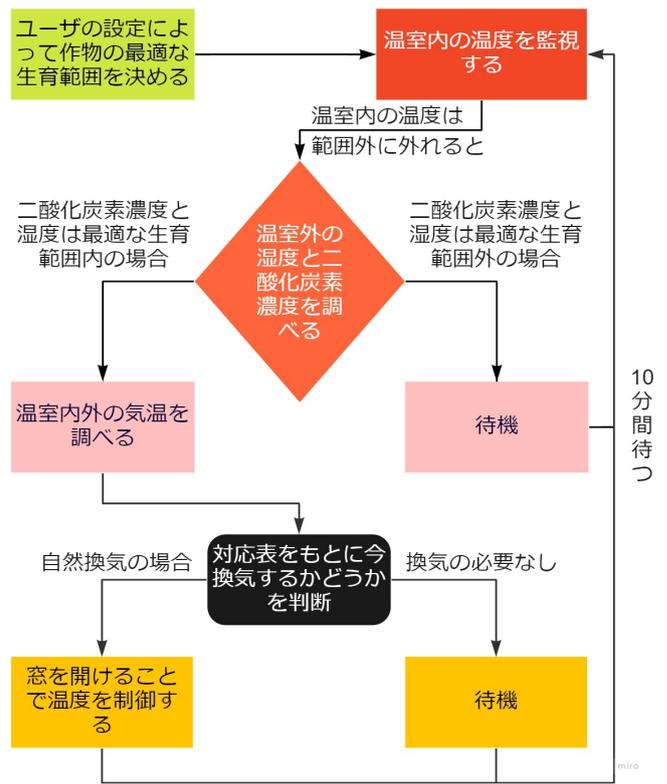


図3 提案流れ

		温室外		
		①温度の最大値より高い	②温度の最大値より低いかつ最小値より高い	③温度の最小値より低い
温室外	Ⓐ温度の最大値より高い	クーラーを利用	なし	自然換気
	Ⓑ温度の最大値より低いかつ最小値より高い	自然換気	なし	自然換気
	Ⓒ温度の最小値より低い	自然換気	なし	ヒーターを利用

図4 3行3列の温度対応表

基礎実験を複数回行った。東京工科大学構内の日当たりの良い場所にて、2021年7月16日、2021年7月26日、2021年7月28日の3日間に各日約2時間実験した。基礎実験では、温室内外ともIoTデバイスのESP32、温度センサーのbmp280を使用し、ブレッドボード上で回路を作成した。図5に示すように、温室内外の温度変化曲線は、窓の開閉により変化し、最終的に温室外と温室内の気温が近い値になる傾向がある。いくつかの基礎実験のデータに基づいて、約10分の窓開放時間は、温室内の温度を温室外の温度とほぼ同じにすることができると結論付けられるため、一回における窓の開閉時間は最大10分に設定される。

ユースケース・シナリオ

本節では前節で先述した提案を用いた具体的なユースケース・シナリオについて説明する。図6の示すように、この温室では、温湿度のセンサーを使用して周囲の温度と湿

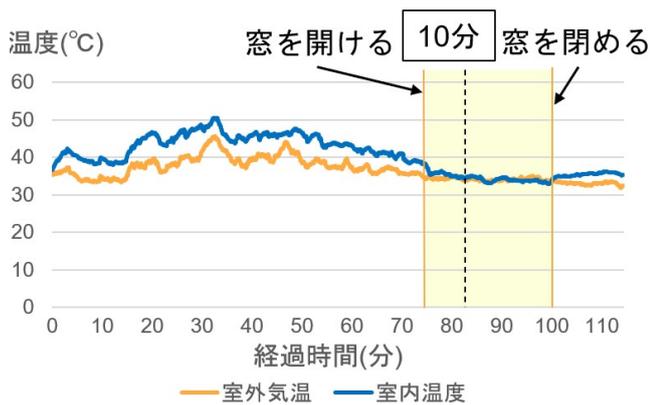


図 5 基礎実験の温度変化曲線

度を監視し、二酸化炭素濃度センサーを使用して二酸化炭素濃度を監視している。また、加熱設備とスプリンクラーを使用して、温室内の温度と湿度を制御する。

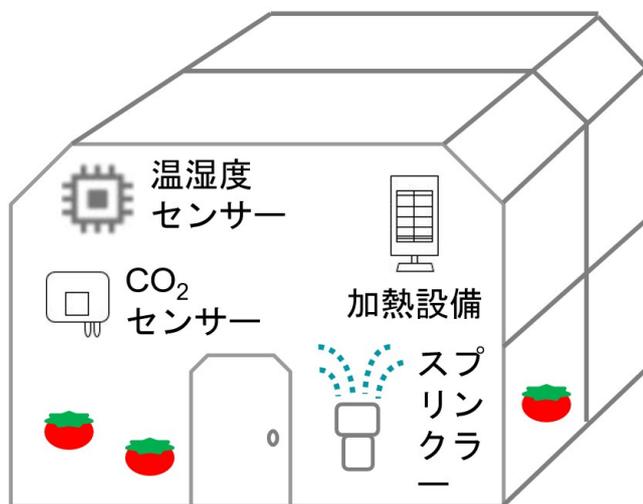


図 6 温室内の制御機器とセンサー

前述の通りに制御機器と環境パラメータの対応関係は多対多である。この温室には加熱設備だけではなくスプリンクラーも温度データを制御できる。温室内の温度をすばやく上げることができる加熱設備とは異なるが、スプリンクラーの温度への影響は無視できない。またはスプリンクラーは主に温室内の湿度を上げるために使用されが、加熱設備による温度の上昇に伴う湿度低下も注意しなければならない。この二つの制御機器の消費電力と稼働率もそれぞれ違うので、消費電力と稼働率のバランスをとって、農作物の生育環境に影響を与えずに、消費電力の削減にも繋がるソリューションを選択するべきである。

また最適生育範囲の設定は対象農作物による変わる。例えばトマトの収量は主に気温に依存する。より暖かい温度とより多くの日射量の下で、トマトの収量は増加する。弱い日射量(夏の日射量の15%)はトマトの生産に大きな影響を与える恐れがある。温室トマトの収量を増やすためには適当な温度を維持する必要がある。摂氏 22 °C~27 °C,

相対湿度約 49%~60% の非常に高い湿度で正常に成長できる [16].

4. 実装と実験方法

この章では提案方式をもとに開発したソフトウェアの実装と実験方法について説明する。

実装

本節では提案の実装手法について述べる。図 7 は提案した手法をソフトウェアとして実装した際に構築するイメージ図である。温室内外で使用する IoT デバイスの役割は全く異なるため、温室内の IoT デバイスと温室外の IoT デバイスについて以下に分けて説明する。提案の部分で述べたように、まず、システム全体を実行するとき、ユーザーは最初に作物の最適な生育範囲(最大値および最小値)を入力する必要がある。その後、温室内の環境データ記録プログラム(THCwrite.py)は、4秒ごとに温室内の温度、湿度、二酸化炭素濃度の記録を開始する。同時に、環境データ監視プログラム(monitor280.py)は同時に温室内の環境を監視する。温度データがあらかじめ設定された最大値または最小値を超えると、このときの温度データが BLE 送信プログラム(BLE.temp.py)に送信され、BLE を通して温度データがブロードキャストされる。

温室外はその後のデータ比較を容易にするために環境データを記録するためのプログラム(bme280write.py)も4秒ごとに温室内の温度、湿度、二酸化炭素濃度を記録する。同時に、BLE 受信プログラム(BLE.observ.py)は10秒ごとに周囲の BLE デバイスをスキャンする。温室内の IoT デバイスによってブロードキャストされたデータパケットが見つかったら、温室内の IoT デバイスと BLE の接続を確立し、GATT 中のデータを読み取る。データパケット内のデータを分析した後、温室外の環境の湿度と二酸化炭素濃度が最適な生育範囲内にあるかどうかに応じて、現在の窓を開くのに適しているかどうかを最初に判断する。その後、データパケット内の温度データが最大値または最小値を超えると、データは温度関係の照合プログラム(ref.py)に送信され、温室内外の現在の温度がどのケースに属しているかを参照する。今どのケースに属するのは、温度関係の照合プログラムで判断される。自然換気のケースは、窓で制御プログラム(pwm.py)を実行して窓を開く。窓で制御プログラムでは、パルス幅変調方式によってサーボモータを制御し、窓を開く。窓を開いてから10分後に窓が自動的に閉じ、温室内の環境が温室外の影響を受けないようにする。

実験用のデータを取得するため、micropython 上にデータの書き込みプロセスと最適な生育温度範囲外に外れる時に室外との BLE ブロードキャストプロセスを同時に実行しなければならない。しかし、micropython 上に window と同じようなクリックするだけで複数のアプリケーション

を同時に起動することはできないので、並行処理または並列処理で複数のプログラムを組むことが必要である。ただし、micropythonにはマルチプロセスがサポートされていないので、マルチスレッドでタスクをスケジューリングする方法しかない。micropythonはマルチスレッドと同等な機能を備えた軽量化されたuasyncioライブラリが提供されている。これによってほぼ同時に処理されたように見える非同期処理はできるが、BLEブロードキャストするためのメソッドgap_advertise自体はずっと動いているブロッキング関数の原因で、完璧なノンブロッキング処理が難しいと考えられる。実際に、温室内外のデータ記録プログラムとBLE通信プログラムはuasyncioで一つのプログラムにまとめられ、同時に稼働されている。

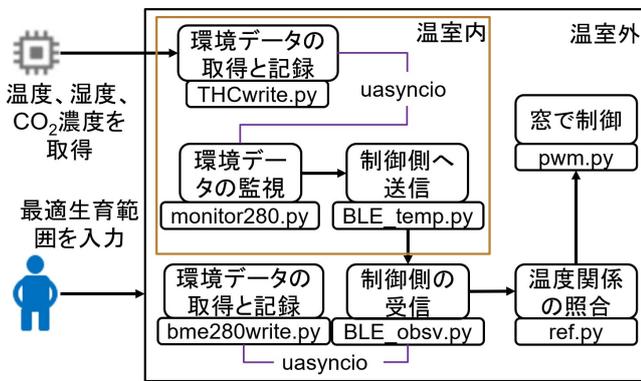


図 7 実行構成図

● 提案の対応表による実装方法

図 2 の温度対応表を用いて現在の温室内外環境を判断し、これを使用して温度制御用の制御機器を選択することが提案の部分に記載されている。実装では、制御側の受信プログラムが BLE を介して送信されたデータをユーザーが設定した温度の最大値および最小値と比較し、温度コード (tempcode) を介して判断結果を温度関係の照合プログラムに通知する。温度コードに基づく対応表を図 8 に示す。温度関係の照合プログラムは、温度コードと温室外の温度を比較して、サーボモータを使用して窓を開くかどうかを決定する。窓で制御するケース、例えば図 8 の温室内の温度コード (Innertemp code) と温室外の温度コード (Outertemp code) がそれぞれ 1 と 2 のケースに属すると、窓で制御プログラムが実行されて窓が開く。

● 低消費電力の BLE 通信の検討

ここで実装部分の BLE 送信と受信の低消費電力パターンについて説明する。提案に基づいて、温室内外の環境パラメータは設定された最大値および最小値を超える場合、温室外の IoT デバイスへ通知するという流れである。温度を例とする場合、一般的な考え方は温室内外の温度が最適な生育範囲外に外れると温室外に通

Innertemp code / Outertemp code	1. Innertemp > max_temp	2. max_temp > Outertemp > min_temp	3. Innertemp < min_temp
1. Outertemp > max_temp			pwm.py (サーボモータ制御プログラム)
2. max_temp > Outertemp > min_temp	pwm.py (サーボモータ制御プログラム)		pwm.py (サーボモータ制御プログラム)
3. Outertemp < min_temp	pwm.py (サーボモータ制御プログラム)		

図 8 対応表の擬似コード

知し、温度が最適な生育範囲内に戻ると送信を終了し BLE をオフにする。これを図 9 に示す。この方法では、温度が範囲外に外れる場合にまず温度情報を温室外の IoT デバイスに BLE で送信する。温室外の IoT デバイスは、送信側からパケットを受信し解析してから温室内外の温度として保存する。次に、保存されている温室内外の温度と現在の温室内外の温度を比較して、窓の制御プログラムを実行する必要があるかどうかを判断する。システムによる判断によって、10 分間の制御プロセスが実行される。制御プロセスでは、BLE が切断されていない場合、両側の BLE 通信チャンネルを継続的に占有するだけでなく、BLE 通信を維持するために必要な電力も消費する。さらに、温度が範囲内に戻ったときに BLE を切断すると、毎回異なる制御時間が発生するだけでなく、窓を長時間開けると、他の環境パラメータへの影響が高まる。

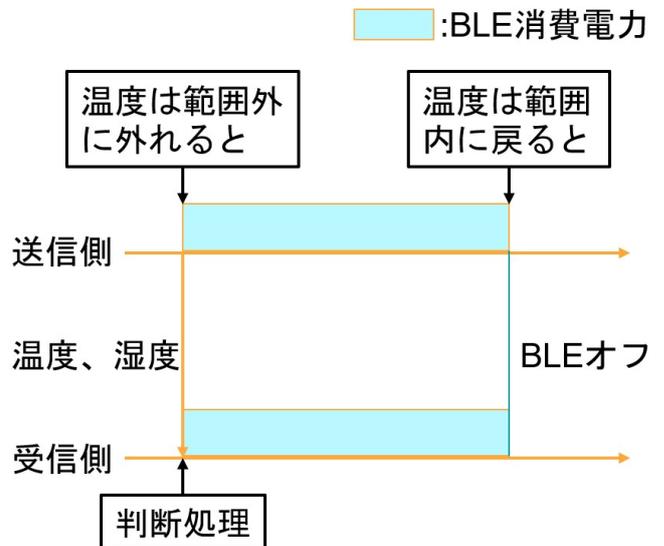


図 9 BLE 通信問題

上記の問題に対する一つの解決策があり、それは切断処理を入れることである。つまり、受信側がパケットを受信し、パケット内部情報を正常に解析するたびに、切断処理して BLE をオフにする。この方法は BLE の維持に必要な消費電力を削減できるが、受信側が最初のパケットを受信して制御プロセスをすでに実行していたため、これ以降に受信したパケットを有効に活用できない。言い換えれば、制御時間中にパケットを送信するために消費される電力が無駄になる。図 10 に示すように、固定された窓の開放時間 (制御時間) 内の BLE 消費電力にはまだ課題が残る。

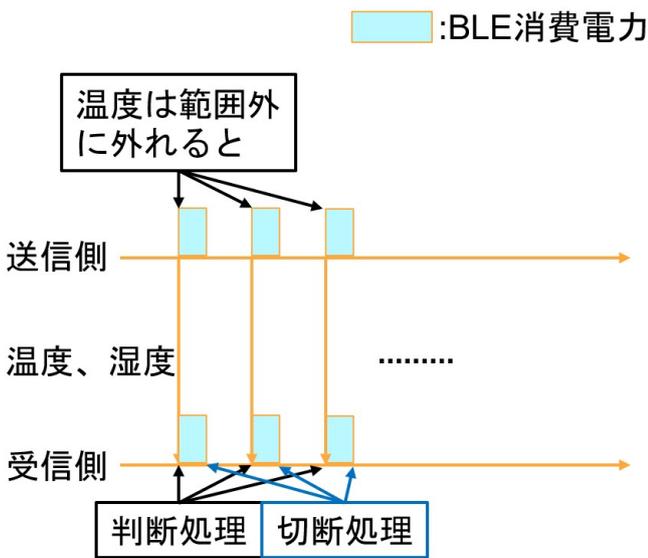


図 10 BLE 通信解決策と問題

したがって、今回の実装では、送信側がパケットを送信した後、受信側が切断したかどうかを検出する。受信側が切断処理をする場合、送信側はこれを基準として、受信側が制御の実行を開始したことを確認する。その後、送信側は BLE をオフにし、受信側と同じ制御時間 (10 分) を待機し、温室内の温度が後に新しいラウンドの BLE パケットを再度送信する必要があるかどうかを判断する。この方法で消費される電力も、図 11 に示すように、一回分の通信電力のみが消費されている。

実験環境

表 1 は実験用のハードウェアを示している。

表 1 ハードウェアリスト

IoT デバイス	ESP-WROOM-32
温湿度センサー	BME280
サーボモーター	SG90
二酸化炭素濃度センサー	CJMCU-811
電流/電圧/電力計モジュール	INA219

実験では上表の機材を基に図 12 のように構築され、2021

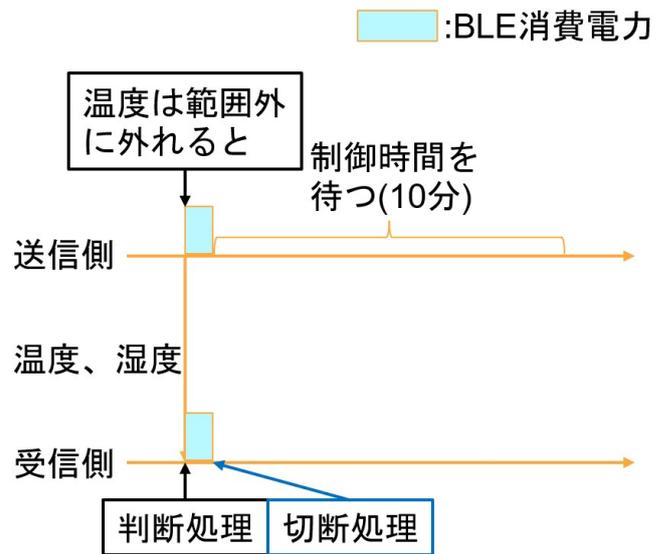


図 11 実装の BLE 通信流れ

年 11 月 26 日に東京工科大学のフーズフーで実験を行った。温室環境をシミュレートするために、小さなビニールハウスを使用した。温室内部では、IoT デバイス ESP-WROOM-32、温湿度センサー BME280 と二酸化炭素濃度センサー CJMCU-811 を配置した。一方で、温室外では、温室内部と同じ装置を使用することに加えて、消費電力をはかるための電流/電圧/電力計モジュール INA219 と天窓を自動的に開閉するための窓スイッチの代わりにサーボモーターと滑車の組み合わせを利用する。窓とサーボモーターの間には紐で接続されており、制御が必要な場合はサーボモーターが回転して紐を引っ張ることで窓の開閉を実現する。

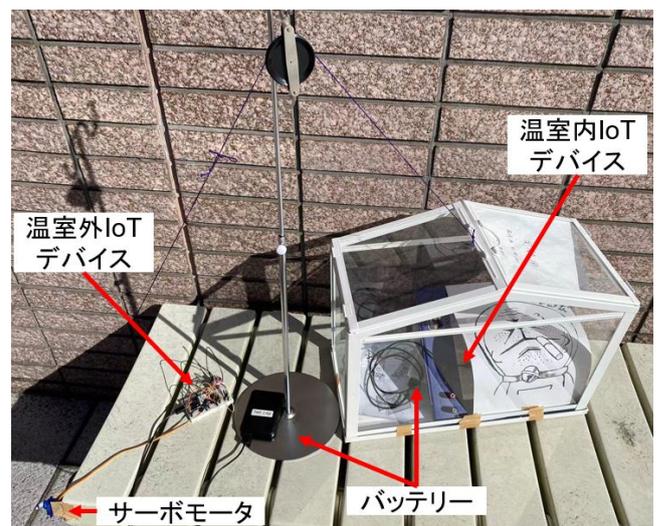


図 12 実験図

実験時間は 1 時間である。実験時の気候は晴れである。その結果は図 13 に示す。軸は温度を示し、横軸は経過時間を示している。図 13 の示す通り、最初の温室内部の温度は 25 °C くらい、温室外部の温度が 15 °C くらいであった。こ

の時の温度の最大値は 19 °C, 最小値が 16 °C と設定された。そのため, 最初の時に温室内の温度は最大値より大きく, 温室外の温度が最小値より低いので図 4 の①③である自然換気のケースに属し, 実験が開始した後にすぐ窓が開かれた。10 分経過したのち窓が閉められ, この時の温室内の温度は同じく最大値より大きく, 温室外の温度が最小値より低いので二回目の制御処理が始まった。その後同じ理由で三回目の制御処理があり, 合計 30 分で温室内の温度を最適な生育範囲内に戻ることができた。

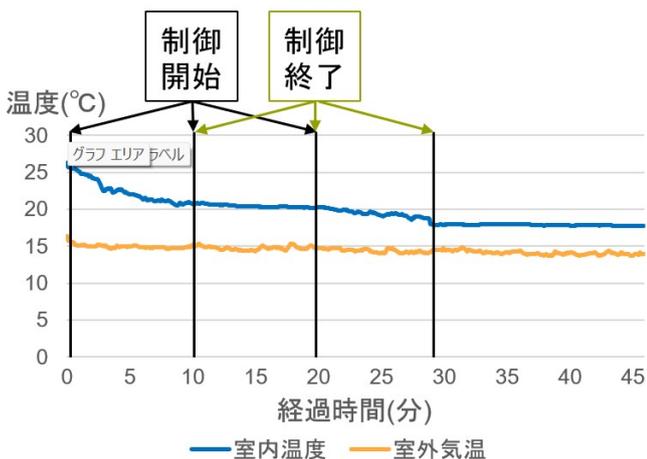


図 13 実験データ

5. 評価と分析

評価方法としては図 14 に示すように従来の生育問題が出る時にユーザーに通知して手動で制御する方式と本研究の提案手法を比べ, 以下の項目を比較して分析する。



図 14 評価方法

● 制御回数

図 15 は提案方法による温室内と温室外の温度を示している。実験の時間は 2021 年 12 月 6 日に 12 時 20 分から 14 時 20 分までの 2 時間である。気候は晴れである。縦軸は温度とサーボモータの消費電力を示し, 横軸は経過時間を示している。実験の時に最適温度の最大値を 35 °C, 最小値を 20 °C と設定された。図 15 によると実験が始まる時の温室内における温度が 15.8 °C となり, 窓の開放時間が毎回 10 分に固定されているの

で, 温度を 20 °C 以上に上げるために, 実験開始時から終了時まで合計一回で窓の開閉制御は行われた。窓を閉めた後に温度は最小値である 20 °C を上回り, 閉まったときに 26.8 °C になった。温室内の温度が最適な生育温度範囲内に戻ること保証した。また灰色の線は制御時のサーボモータの消費電力となるため, 図 15 から見るとサーボモータは起動しない時の平均消費電力が 17.5mW になり, 起動する時の平均消費電力は約 410mW である。

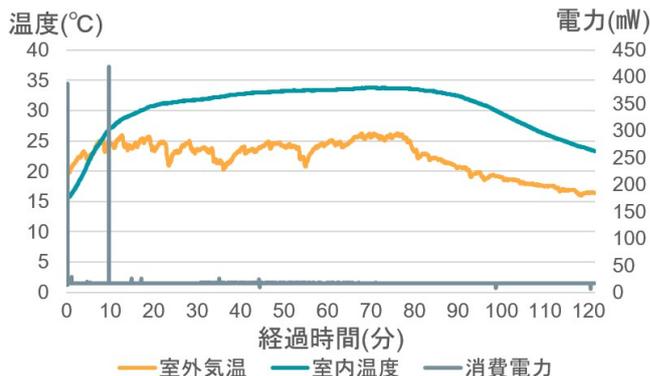


図 15 温室内外における温度と消費電力の遷移曲線

また, 図 15 と同じ時間の温室内の湿度と二酸化炭素濃度の変化曲線は図 16 と図 17 に示す。消費電力が高い時はサーボモータが作動するタイミングである。湿度は最大値を 40%, 最小値を 10%, 二酸化炭素濃度の最大値を 1200ppm, 最小値を 300ppm として設定された。窓を開けることによって, 室内の湿度と二酸化炭素濃度は大きく変化したことがわかった。その結果は制御時間内に湿度と二酸化炭素濃度を最適な生育範囲内に維持することができた。

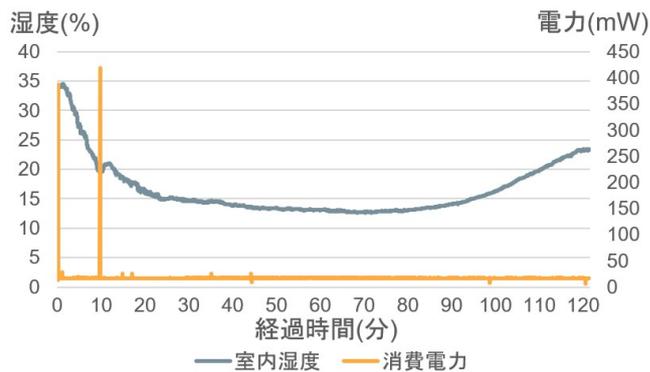


図 16 温室内における湿度と消費電力の遷移曲線

● 制御時間

図 18 は Hyindoor の YD-5015 加熱用マットによる温室内の温度遷移曲線を示している。縦軸は温度を示し, 横軸は経過時間を示している。これにより, これにより, 温度を 20.8 °C から 26.4 °C へ上昇させるために

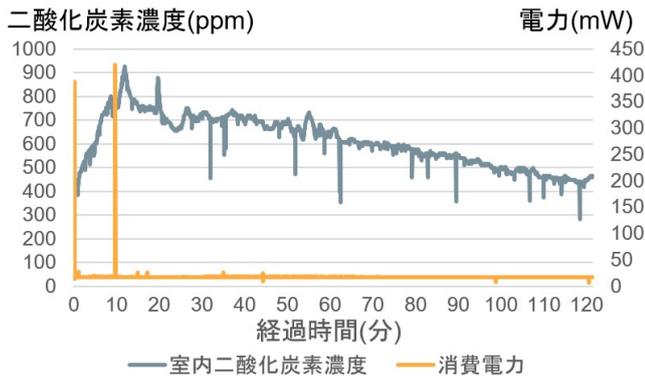


図 17 温室における二酸化炭素濃度と消費電力の遷移曲線

約 30 分かかったことがわかる。つまり、温度を 5.8°C 上昇させるための必要な時間は 30 分であると分かる。そして図 13 のデータによって、 11°C の温度差は 10 分以内に収まることと言える。窓の開閉による温度の変化量は温度と共に減少する。また、加熱マットによる温度変化と同じ温度変化区間 ($20.8^{\circ}\text{C}\sim 26.4^{\circ}\text{C}$) を見ると、窓の開閉による制御手法は 5 分以内、つまり一回の開閉でコントロールできる。これは必要な時間を 66.7% 削減する結果となる。しかし温度内外の温度による変化のため、実験データから見ると温度差が大きくなるほど制御時間は短くなる傾向がある。

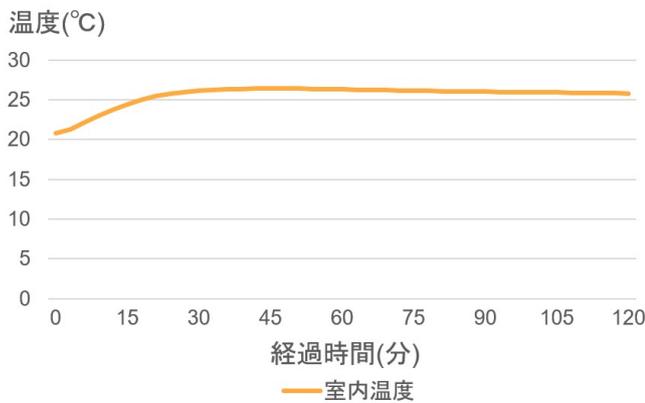


図 18 加熱マットによる温度遷移曲線

● 制御時間に基づく消費電力量

消費電力量を比較するために、サーボモータの消費電力もはかる必要がある。図 19 はサーボモータを 4 秒間隔で開閉する時の消費電力を示している。縦軸は消費電力を示し、横軸は経過時間を示している。流れとしてはまず窓を開け、そのまま 4 秒を待ってから窓を閉じる。窓の開閉時間は 4 秒をかける。また、下記の三つの式を使って提案手法による消費電力量と加熱マットによる消費電力量の差を求める。 Q_{ser} はサーボモータの消費電力量である。 P_{seron} は一回の動作中のサーボモータの平均消費電力、複数回の実験結果として、窓を開ける時の消費電力と窓を閉じる時の消費電力は

同じであることがわかる。つまり、 P_{seron} の平均値は図 15 と同じく 410mW になる。 t_{seron} は一回のサーボモータの作動時間、4 秒である。 N_{seron} はサーボモータが作動した回数、今回は一回の開閉しかないため、 $N_{seron} = 2$ である。したがって、一回開閉の作動時間は $t_{seron} \cdot N_{seron} = 8$ 秒になる。 P_{seroff} はサーボモータが作動しない時の平均消費電力、データによると、 17.5mW である。 t_{seroff} はサーボモータが作動しない時間、今回は $30 \cdot 60 - 8 = 1792$ 秒である。 Q_{mat} は加熱マットの消費電力量である。 P_{mat} は加熱マットの消費電力、Hyindoor の YD-5015 加熱用マットの消費電力は 17.5W である。 t_{mat} は加熱マットの作動時間、30 分である。 Q_{dif} は加熱マットの消費電力量とサーボモータの消費電力量の差である。サーボモータが作動する消費電力量は $P_{seron} \cdot t_{seron} = 0.9 \cdot 10^{-3}\text{Wh}$ になる。作動しない消費電力量は $P_{seroff} \cdot t_{seroff} = 8.7 \cdot 10^{-3}\text{Wh}$ であり、式 (1) により合計で Q_{ser} は $9.6 \cdot 10^{-3}\text{Wh}$ になる。また、式 (2) により Q_{mat} は 8.8Wh になる。最後の式 (3) により、 Q_{dif} は 8.79Wh になる。加熱マットのみの場合では常に高い消費電力であるのに対し、提案手法では窓の開閉が行われたときのみ電力が消費されているので全体として 8.79Wh が削減できた。

$$Q_{ser} = P_{seron} \cdot t_{seron} \cdot N_{seron} + P_{seroff} \cdot t_{seroff} \quad (1)$$

$$Q_{mat} = P_{mat} \cdot t_{mat} \quad (2)$$

$$Q_{dif} = Q_{mat} - Q_{ser} \quad (3)$$

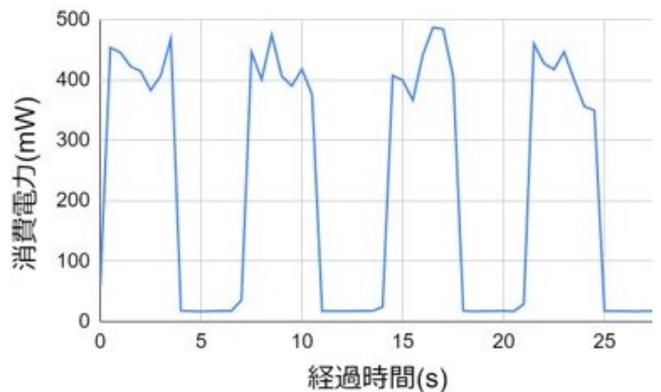


図 19 サーボモータの消費電力

6. 議論

植物は自分の最適な生育範囲内ではない環境ですぐに被害を受けるとは限らない。一般的に、植物は環境に耐性がある。多くの研究で、植物の耐性を改善する議論がなされている。たとえば、jagadishi らの研究では、インドのオリッ

サ州からの地方品種のイネは、洪水が発生して10~14日間の完全な水没に耐えることができると指摘した [17]. つまり、植物が不適切な生育環境にあるときから最適な生育環境に戻るまでの時間は、種によって異なる。言い換えれば、不適切な生育環境を最適な生育環境に制御するための許容時間は、異なる植物によってモデルを構築する必要がある。これには通常、結論を出すために、さまざまな植物自体を長期間研究する必要がある。本研究では、窓を開けて温度を制御する方法を検討したが、植物が温度変化に非常に敏感な場合、温室内外の温度に応じて窓を開けることによる適切な温度範囲内に戻る時間が遅すぎて植物の被害を引き起こす恐れがある。したがって、異なる作物のそれぞれの許容時間と時間を超える時間と伴う被害率をモデリングし、制御時間と許容時間を対応しつつ、作物が被害されないことを前提として、最も低い電力制御方法を選択する。例えば本研究の提案手法によると、窓を開けられる条件であっても、その後の窓の開きによる温度の変化を予測し、許容時間より長い時間が必要な場合は自然換気できない。

実際に温室外の温度は温室内の温度より低くても、窓を開けて温度が下がらない時がある。さらに温度は上がる時もある。これは冷空気が入るという熱対流ことによる降温が太陽放射という熱放射による温度の上昇と比べて、後者の影響がもっと大きいと考えられる。温室内の温度に影響する外部要素は主に外部気温による熱対流と熱伝導、太陽放射による熱放射が挙げられる。提案のところ述べてように、温室内の温度は生育の温度最大値を超える場合は窓を開けることで、制御を行うか、クーラを利用するか決定する。しかしどちらかも電力が消費されている。サンバイザーのような太陽光を遮断するものがなければ、自然界の太陽光を利用するだけは消費電力がなくなる。したがって、太陽光を利用することによりゼロ消費電力方式は検討すべきである。たとえば、太陽光センサーを使って、または地方の天気予報を利用しこれからの温度を予測する。上記の許容時間を配慮する上で、太陽光を利用した制御方式により、消費電力を最小限に抑えて温度を制御できる。

温室外の温度と温室内の温度の変動が少ない時に、Deep-Sleep モードにすることで消費電力をさらに削減することもここで議論をする。ここでは、特定の実行可能なスキームがいくつかの状況で要約されている。最初に気づかなければいけないのは、温室外の IoT デバイスが Deep-Sleep モードにするきっかけは、温室内の IoT デバイスに基づいている必要があるということである。温室内の IoT デバイスが温室外の IoT デバイスに通知する情報を持っている場合、温室外の IoT デバイスが Deep-Sleep モードになると、データの損失、データの再送信、時間内に処理できないなどの問題が発生する。これに基づいて、温室内の IoT デバイスのいくつかのケースが分析される。まず、室内温度が最大値と最小値の間にあり、最大値と最小値から離れている

時、例えば最小値 20 °C と最大値 27 °C を設定して、室内温度が 24 °C で変動が小さい場合は、IoT デバイスを適当に Deep-Sleep モードにして、消費電力量を削減できる。そして、このケースの情報を温室外の IoT デバイスに報告して、温室外の IoT デバイスも同時に Deep-Sleep モードを実行できるようにする。第二に、図 2 の温度対応表に今のケースは既存の加熱設備を利用する場合、温室内の IoT デバイスは温室外の IoT デバイスに通知して、温室外の IoT デバイスに短い Deep-Sleep モードを実行させることもできる。従って、この時点での室外環境の変化は、既存の加熱設備を使用することを決定したという現実を変えることはないからである。

7. おわりに

ユビキタスネットワーク社会の一環となる IoT は、各種センサーのデータ取得からクラウドサーバーへの送信、データベースへの保存、ユーザーへの通知と本場の制御を支えている。IoT によるモニタリングシステムの導入に伴い、人間で監視および制御する手間を省く今、あらゆる分野では IoT 技術による恩恵を受けている。異常が発生するたびに人の目で状況を判別し、手で調整する代わりに、IoT に基づくプログラムされた電子システムは実世界のデータによる正しい判断を下し、迅速な対応ができる。こうした基礎産業の自動化の進展も寄与している。本研究は農家の労力を軽減させ、作物の収量を向上させるように IoT デバイス側である軽量型の自動化システムを設計することが目標としている。

本論文では既存のほとんどの IoT 農業システムの不足点とユーザの負担を解決するために温室側で天窓の開閉によって温度を制御する提案方式を示した。また、天窓の開閉による影響される環境パラメータは複数存在するため、それぞれの環境パラメータを意識しながらの制御手法も紹介した。天窓の開閉による温度が確実に変化するかどうかに基づいての基礎実験をもとに、窓の開閉時間を決めた。また BLE の低消費電力パターンにも検討されていた。実験の結果は、同じ温度変化区間における加熱マットによる消費電力量は 8.8Wh、提案手法による消費電力量は 9.6×10^{-3} Wh である。

参考文献

- [1] Taha, F. M., Osman, A. A., Awadalkareem, S. D., Omer, M. S. and Saadaldeen, R. S.: A design of a remote greenhouse monitoring and controlling system based on internet of things, *2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCEEE)*, IEEE, pp. 1-6 (2018).
- [2] Iddio, E., Wang, L., Thomas, Y., McMorro, G. and Denzer, A.: Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 117, p. 109480 (2020).

- [3] Guo, Y., Zhao, H., Zhang, S., Wang, Y. and Chow, D.: Modeling and optimization of environment in agricultural greenhouses for improving cleaner and sustainable crop production, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 285, p. 124843 (2021).
- [4] Dan, L., Xin, C., Chongwei, H. and Liangliang, J.: Intelligent agriculture greenhouse environment monitoring system based on IOT technology, *2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City*, IEEE, pp. 487–490 (2015).
- [5] Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Umer, T. and Zikria, Y. B.: Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review, *Electronics*, Vol. 9, No. 2, p. 319 (2020).
- [6] Li, H., Guo, Y., Zhao, H., Wang, Y. and Chow, D.: Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 191, p. 106558 (2021).
- [7] Wang, C., Zhao, C., Qiao, X., Zhang, X. and Zhang, Y.: The design of wireless sensor networks node for measuring the greenhouse’s environment parameters, *International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture*, Springer, pp. 1037–1046 (2007).
- [8] Liao, M.-S., Chen, S.-F., Chou, C.-Y., Chen, H.-Y., Yeh, S.-H., Chang, Y.-C. and Jiang, J.-A.: On precisely relating the growth of *Phalaenopsis* leaves to greenhouse environmental factors by using an IoT-based monitoring system, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 136, pp. 125–139 (2017).
- [9] Gonda, L. and Cugnasca, C. E.: A proposal of greenhouse control using wireless sensor networks, *Computers in Agriculture and Natural Resources, 23-25 July 2006, Orlando Florida*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, p. 229 (2006).
- [10] Tafa, Z., Ramadani, F. and Cakolli, B.: The design of a ZigBee-based greenhouse monitoring system, *2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, IEEE, pp. 1–4 (2018).
- [11] Nouali, O., Moussaoui, S., Derder, A. et al.: A BLE-based data collection system for IoT, *2015 First International Conference on New Technologies of Information and Communication (NTIC)*, IEEE, pp. 1–5 (2015).
- [12] Vimal, P. and Shivaprakasha, K.: IOT based greenhouse environment monitoring and controlling system using Arduino platform, *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, IEEE, pp. 1514–1519 (2017).
- [13] Widyawati, D. K., Ambarwari, A. and Wahyudi, A.: Design and Prototype Development of Internet of Things for Greenhouse Monitoring System, *2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, IEEE, pp. 389–393 (2020).
- [14] Jayasuriya, Y. P., Elvitigala, C. S., Wamakulasooriya, K. and Sudantha, B.: Low Cost and IoT Based Greenhouse with Climate Monitoring and Controlling System for Tropical Countries, *2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, IEEE, pp. 1–6 (2018).
- [15] Danita, M., Mathew, B., Shereen, N., Sharon, N. and Paul, J. J.: IoT based automated greenhouse monitoring system, *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, IEEE, pp. 1933–1937 (2018).
- [16] Shinde, D. and Siddiqui, N.: IOT Based environment change monitoring & controlling in greenhouse using WSN, *2018 International Conference on Information, Communication, Engineering and Technology (ICICET)*, IEEE, pp. 1–5 (2018).
- [17] Jagadish, S., Septiningsih, E., Kohli, A., Thomson, M., Ye, C., Redona, E., Kumar, A., Gregorio, G., Wassmann, R., Ismail, A. et al.: Genetic advances in adapting rice to a rapidly changing climate, *Journal of Agronomy and Crop Science*, Vol. 198, No. 5, pp. 360–373 (2012).