

温室において天窓の開閉と温度の対応関係に基づいた 省電力制御

柴 智瀚¹ 高谷 悠太郎² 串田 高幸¹

概要: 季節を問わず安定した環境を提供できるビニールハウスは、必ずしも一定のビニールハウス内の環境、例えば温度と湿度を確保することができない。植物自体の新陳代謝はもちろん、外部の太陽光による昇温が温室の内部環境に影響を与える。そのため、複数のアクチュエータを使用して、一定の生態環境を維持する IoT システムで、温室内の環境指標を監視する必要がある。ただし、現在の温室 IoT システムのほとんどは、複雑な通信プロセスを備えており、多対多の関係を意識せずに省電力なソリューションが提供できない問題がよくある。この問題を解決するために、IoT デバイス側がアクチュエータと環境指数による多対多の関係を考慮し、省電力となる温度制御を行う方法を提案する。今後は、実際にゴーヤ苗を植えたビニールハウス内と外でそれぞれ温湿度と CO_2 濃度を監視し、必要に応じて天窓を開閉することで室内の温度を苗の適正生育温度に保つことができるかを実験する。そして、アクチュエータと環境指数が 1 対 1 で制御される従来の方法と比較し、消費電力をどれだけ削減できたかを評価する。

1. はじめに

背景

2011 年 10 月 31 日に世界人口は 70 億人に到達した。国際連合による 2037 年頃の世界人口は 90 億人を超えると予測されている [1]。全世界の人口が爆発的に増加すると共に、食糧の不足問題は徐々に深刻になっている [2]。その一方で、都市部への人口集中と並行する形で農地は耕作が行われずに荒廃になってしまい、農作物の減産に繋がり、食糧供給が足りない傾向がある [3]。従来の農業生産と比べ、ビニールハウスは位置、季節や天候に問わず、常に安定している栽培を提供し、一定の環境で農作物の栽培を行えるという大きなメリットがある。ビニールハウスを利用することにより、農作物の生産量の保証が得られ、農家にとって年間を通して安定した収入を得ることができる。ただし、ビニールハウスにしても内因と外因によって環境が変わる時もある。ビニールハウス室内の環境管理を怠ると室温が農作物の生育範囲外に外れたり害虫に被害されたり、最終的に農作物の減産に引き起こす危険がある [4]。

20 世紀末に誕生した IoT は、21 世紀から空前の速度で発展し、さまざまな研究分野で注目を集めている [5]。2004

年、日本の内務省は「いつでも、どこでも、何でも、誰でも」というインターネット環境にアクセスできることを期待し、u-Japan のコンセプトを提案した [6]。IoT を導入することによって、ビニールハウスの温度、湿度と言った環境データの取得、予め設定された最適な生育の基準範囲から外れる異常情報を監視し、アクチュエータを使って基準範囲以内に保つことができる。同時に進化し続ける WSN(Wireless Sensor Network) は、ビニールハウスの環境での分散データの取得および監視に非常に適している [7]。IoT を使って温度、湿度、 CO_2 濃度と光強度を監視して、それを自動的に調整する WSN モニタリングシステムを構築した事例もあげられる [8]。

IoT アーキテクチャによると、システムは主に知覚層、ネットワーク層、アプリケーション層で構成されている [9][10]。ビニールハウスの通信方式は図 1 に示すようにまとめることができる。ビニールハウス内には各センサによって、温湿度、土壌の水分状況、土壌温度、光強度、 CO_2 濃度といった環境データが取得される。ビニールハウス環境データは、ゲートウェイを介してサーバに転送される。サーバではデータを分類し、異常なデータをユーザに送信する。ユーザはクライアントデバイスを経由してビニールハウス内の環境状況を把握することができる。また、ユーザの指示によって、ファン、ヒーター、サンルーフモーター、給水電磁弁などのアクチュエータで制御する命令を同じ転送パスでビニールハウス内の制御ユニットに送信することができ

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

る [11][12].

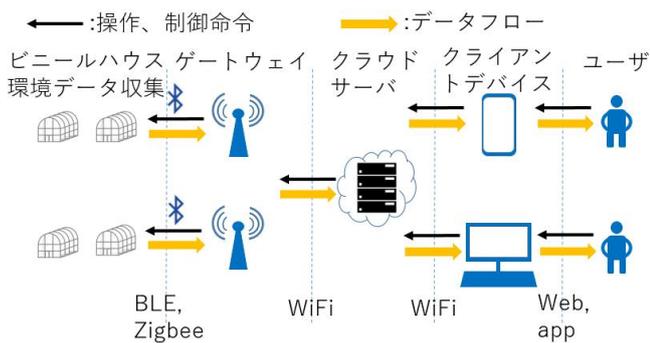


図 1 一般的なピニールハウスの通信方式

課題

上記のように、センサーデータは最初にゲートウェイに送信され、次にクラウド、クライアントデバイス、最後ユーザに送信される形になる [11][12]。次に同じパスに沿ってユーザからの命令を返すことは、ユーザに対する不必要な操作の負担が増加するだけではなく、このフローによる遅延も増加する。したがって、ほとんどの軽量操作は最後にIoTデバイス側で自動的に処理されるようになるべきである。これは、ユーザがデータに対する指示命令を出すことなく、より早いうちに異常データに対応できる。例えばセンサから取得したデータがある閾値を超えると直接にアクチュエータへ命令を出す(図2の赤線)。しかし、今ほとんどのIoTデバイス側の自動処理はシステムの構成に焦点に当たって、多対多のセンサとアクチュエータの対応関係を意識せずに、シンプルな1対1の関係で設計するのが大多数である [10][13][14]。例として、ヒーターは室内の温度データを変更できるが、天窗の開閉によって温室内外の温度差に応じて温度も変化できる。同時に、天窗の開閉もCO₂濃度や湿度に影響を与えるため、温度だけに注意を払うと室内の湿度が高すぎるという問題が発生する可能性がある。

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て、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

インドである農作物の過剰な灌漑と給水不足の問題に対して、点滴灌漑で植物の根に直接給水できるシステムを提案した [15]。タンクの水位を継続的に監視するために、超音

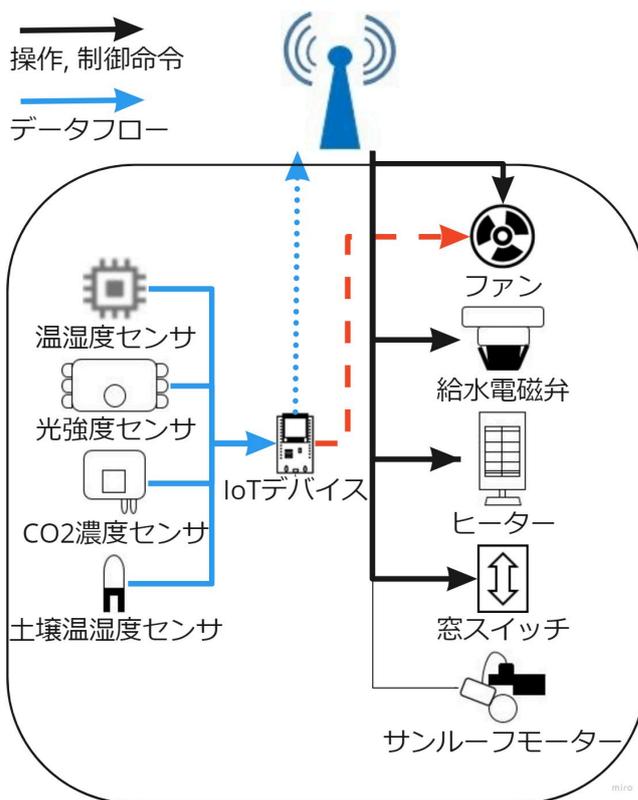


図 2 ピニールハウス内部の通信関係

波センサが装備されている。ピニールハウス内の温度を制御するために、温湿度センサーを設置し、湿度を測定している。温度が閾値を超えると、マイクロコントローラーがフォガーに取り付けられたリレーをトリガーする。リレーはミクロンサイズの小さな水滴を散布し、空気中に浮遊したままにして温度を下げる。これによる相対湿度はまた閾値に達すると要件に応じて冷却または加熱することで温度を調整できるペルチェモジュールが使用されている。しかし、この方法によってピニールハウス内の湿度に影響を及ぼす上に、消費電力問題も検討するべきである。

LIUらはIoTを用いる典型的なピニールハウスの環境モニタリングシステムを構築した [10]。このシステムには、知覚層、ネットワーク層とアプリケーション層三つに分かれ、ゲートウェイを中継としてピニールハウス内の環境データとユーザからの指示命令が伝送できるようにした。ただし、この研究では、zigbeeネットワークを使用する利点に焦点を当てており、温室内のスプリンクラーのみを使用した温度と湿度の制御方法の効率については調査していない。

Pallavi Sらは年間を通じて四半期に1回、ピニールハウス内の温度、土壌温度、CO₂濃度および照度を制御するために、農作物の種類に基づいて窓もしくはドアを開閉するシステムを提案した [14]。また、論文の中に植物の光合成は温度、湿度、CO₂濃度と光強度は不可欠な要素として考えられており、それをどの範囲内に維持する必要があるかについても言及した。ただし、土壌湿度に基づいて温室の窓

もしくはドアを開閉する方法についてのみ説明し、 CO_2 濃度と温度はモデル化されていない。また、土壌湿度に基づいてドアの開閉は温度と CO_2 濃度にどれほど影響しているのかも検討されていない。

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。

基礎実験

本稿の提案手法は、背景で述べた天窓の開閉によるビニールハウス内の温度を制御することが目標である。したがって、まずは天窓の開閉は室内の温度に確実に影響を与えているかどうかを確認するために、基礎実験を行った。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。基礎実験の天窓が開いた時の状態を撮影して図3に示す。ビニールハウス内のハードウェアとして、IoTデバイスのESP32、温度センサのbmp280を使用し、ブレッドボード上で回路を作成した。外部にはIoTデバイスのESP32と温度センサのbmp280を設置した。



図3 基礎実験の天窓が開く時

そして、ビニールハウスの天窓を閉めている状態を図4に示す。図3と同じ実験機材を使っているが、天窓は閉じている。そのため、内外の空気が分離され、対流が発生しない。これによって、空気の対流がある時にビニールハウス内外の温度に対照があるのか実験を行った。

基礎実験は内部と外部に2つのIoTデバイスが設置され、まどで閉じた状態で実験を開始した。約1時間後に天窓を開き、また約半時間後に天窓を閉めることで天窓の開閉は確実に室内の温度に影響しているかどうかを判別する。すべての実験は異なる時間に実施され、天気と周囲の環境も異なったが、結果は類似性があった。実験中の天気情報は表1に示す。すべての情報は気象庁によって取得される。



図4 基礎実験の天窓が閉まる時

まずは1回目の7月16日17時からの実験結果として、天

表1 実験時の天気情報

実験時間	降水量 (mm)	風速 (m/s)	日照時間 (h)
2021年7月16日, 17~18時	0.0	8.3~6.3	2
2021年7月26日, 11~12時	0.0	5.2~4.8	1.6
2021年7月28日, 13~14時	0.0	6.0~6.8	1

窓の開閉と温度の関係を図5に示す。縦軸は温度、横軸は実験開始時からの時間である。実験中に降水と雲は無く、全時間帯に太陽光に当たっていた。ビニールハウス内の温度遷移曲線から見ると、天窓を開いた際に、室内温度ははっきりと下がり、温度差が小さくなるのがわかる。天窓を閉めた時にも多少室内温度に変化があることが分かる。

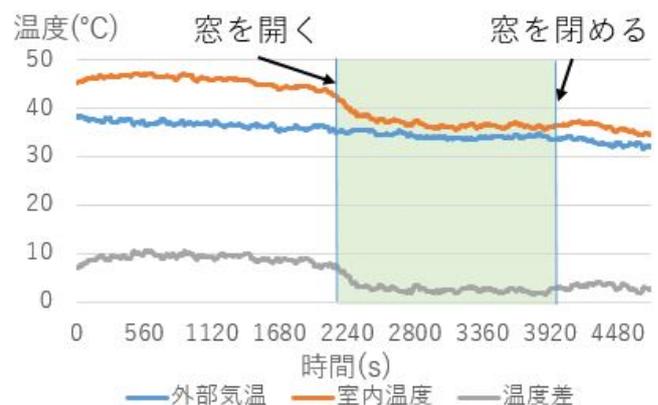


図5 1回目のビニールハウス内の温度遷移曲線

7月26日11時からの実験結果として、天窓の開閉と温度の関係を図6に示す。実験の天気は前半が晴れ、後半は曇りである同時に風もある。ビニールハウス内の温度遷移曲線から見ると、天窓を開く間に、室内温度は徐々に外部気温に近づき、温度差が小さくなり、天窓を閉める時にまた温

度差が大きくなる事が分かる。これによって、天窓の開閉は確実にビニールハウス内の温度を制御することができると言える。

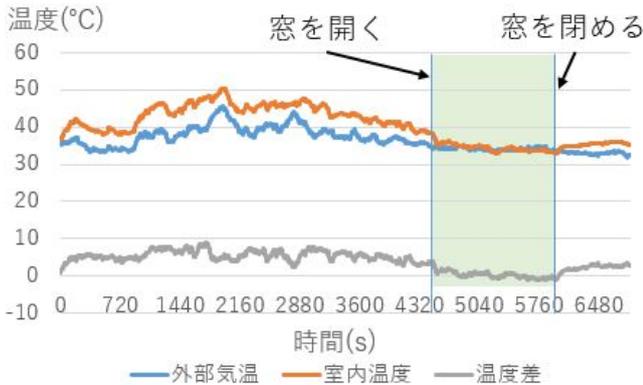


図 6 2 回目のビニールハウス内の温度遷移曲線

7月28日13時からの実験結果として、天窓の開閉と温度の関係は図7に示す。実験の天気は風が強く、実験の後半には雲量も充足していた。ビニールハウス内の温度遷移曲線から見ると、天窓を開く間に、室内温度は徐々に下がって、最終的に温度差がほぼ0に近くなる。また、天窓を閉める時には室内温度が少し上がることが分かる。これによって、天窓の開閉は確実にビニールハウス内の温度を制御することができると言える。

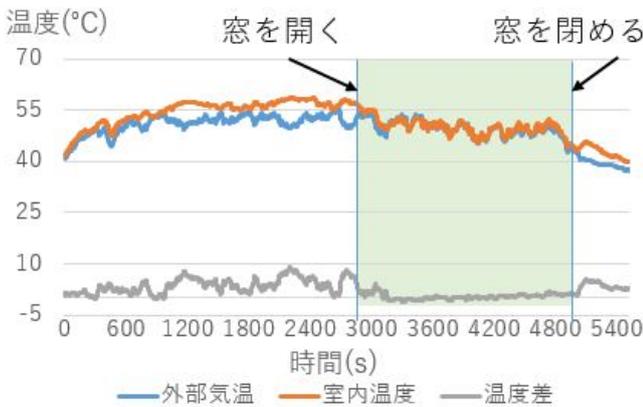


図 7 3 回目のビニールハウス内の温度遷移曲線

提案方式

一般的に、ビニールハウスは定期的または人為的に、室内の排気及び換気を行っている。しかし、これは必ずしも温度を適温に調整することができるとは言えない。

温室外と温室内部農作物の関係は三つある。基準範囲は農作物に対する成長率の最適な生育温度範囲である。

- ① 温室外気温 > 基準範囲最大値
- ② 温室外気温 ∈ 基準範囲内
- ③ 温室外気温 < 基準範囲最小値

温室内部気温と基準範囲の関係も三つある。

- Ⓐ 温室内部気温 > 基準範囲最大値
- Ⓑ 温室内部気温 ∈ 基準範囲内
- Ⓒ 温室内部気温 < 基準範囲最小値

Ⓑ の場合は既に農作物の最適生育範囲にいるので、何の操作がなくても済む。①とⒸ、③とⒶ、②とⒶ、②とⒸの場合は自然換気だけで温度を制御することができる。次に、自然換気の場合は規定時間内に温度を制御できるかどうかを計算する。本来、ビニールハウスは室内の環境を維持させるために存在するため、自然換気を短時間に制限する必要がある。一般的に半時間以内に換気を行っている。これは、害虫の侵入を防ぎ、室内環境の大きな変化を防ぐためである。空気中の熱伝達は主に対流なのであるため、下記のニュートンの冷却の法則による単位時間内に温度の対流による変わる効率が温度差に正比例することがわかる。Qは熱量変化率、hは熱伝達率、Aは対流の表面積、T(t)は対象物の温度、T_{env}は外部の温度である。

$$Q = h \cdot A \cdot (T(t) - T_{env})$$

この式により、温室外気温が温と内気温に近くなるほど、温度変化は小さいと言える。また①とⒶ、③とⒸの場合はクーラーとヒーターを利用する必要がある。上記の温室内外の気温関係は図8のようにまとめることができる。

温室外気温 / 温室内部気温	① 基準範囲より高い	② ∈ (基準範囲内)	③ 基準範囲より低い
Ⓐ 基準範囲より高い	クーラーを利用	自然換気	自然換気
Ⓑ ∈ (基準範囲内)	なし	なし	なし
Ⓒ 基準範囲より低い	自然換気	自然換気	ヒーターを利用

図 8 温室内外の温度関係

ビニールハウス内のIoTデバイスは常に室内気温を監視している。農作物に対する最適な生育温度範囲以外に外れると判断できるため、図9のようなデータタイプに基づくゴーヤ苗の最適な生育範囲と温室内外の気温関係を確認するための外部IoTデバイスIPアドレスは事前に入力し、デバイスに内蔵する必要がある。また、ビニールハウス内と外部には二つのIoTデバイスが設置され、それぞれは内部と外部の環境データを取得するのが前提となっている。

データタイプ	最適生育範囲	外部センサIPアドレス
温度	25°C~28°C	192.168.xxx.xxx
湿度	20%~50%	192.168.xxx.xxx

図 9 データタイプによる対照表

ビニールハウス内のIoTデバイスは室内気温が最適な生

育温度範囲以外になるとデータタイプによる対照表に基づいて外部のIoTデバイスに通知する。次に、外部のIoTデバイスは図10のようなアクチュエータによる対照表を参照し、自身が持っている外部の環境データのどれかに影響を及ぼすのを確認する。今回の例として、天窓は自然換気のため存在しているが、温度以外にも湿度とCO₂濃度が変換される。これを参照するために、天窓と温度、湿度、CO₂濃度の対照関係を対照表としてに事前に入れる必要がある。

アクチュエータ	データタイプ	最適生育範囲
窓スイッチ	温度	25°C~28°C
窓スイッチ	湿度	20%~50%
窓スイッチ	CO ₂	445ppm~500ppm

図10 アクチュエータによる対照表

例えば室外は雨が降っていれば、また室内の相対湿度も飽和状態になると、自然換気で温度を制御しようとしても、天窓を開けないことにすべきである。温室内外の環境データを確認し、天窓の開閉は問題がなければ、室内と室外の気温を参照してどのケースに属するのかを決定する。規定時間内に温度を最適範囲内に戻れば自然換気だけをする。戻らないならヒーターもしくはクーラーを付ける。

ユースケース・シナリオ

ここでは、提案方式をもとにした具体的なユースケース・シナリオを説明する。図11のようにここはCO₂濃度センサ、温湿度センサ、窓スイッチとヒーターを用いて温室のエッジ側が構築された。

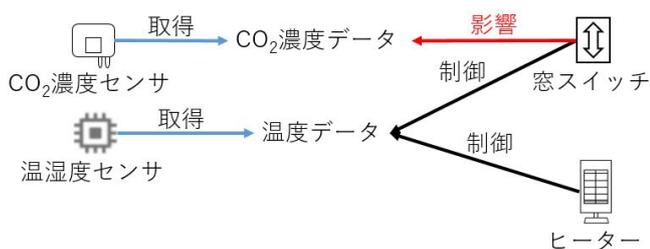


図11 エッジ側である多対多の対照関係

温度データを制御できるのは窓スイッチとヒーターがある。ヒーターで温度を制御するのはより顕著な効果が得られると同時に、消費電力も高い。窓スイッチによって自然換気の場合の消費電力は天窓を開閉する瞬間に電力を消費しているが、温度を調整する効率が低い。そのため、消費電力と効率のバランスをとって、農作物に影響を与えずに、消費電力の削減にも繋がるソリューションを選択すべきである。

最適生育範囲の設定は対象農作物による変わる。例えば

対象農作物がゴーヤの苗とすると、熱帯および亜熱帯気候でよく育つ暖かい季節の野菜として、発芽に最適な温度は25°C~28°Cである。発芽率が低いのは、最適以下の温度でよく見られる[16]。この農作物に対して、自然換気を行う必要性については温度以外にも以下のように三つがあげられる。その上、冬場の自然換気による急激に気温が下がることも注意しなければならない。

- 土壌水分蒸発による向上された湿度の除去
- 光合成によるCO₂の不足の補足
- 施肥による向上されたアンモニア濃度の排出

したがって、上記の三つの指標を制御する時に行われた自然換気に伴い、温度も調整することができる。しかし、室外の湿度は室内より高い時はこ言う自然換気を避けるべきである。

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

ソフトウェアの構成図を図12に示す。ビニールハウス内にはIoTデバイス、温湿度センサ、CO₂濃度センサとヒーターがある。ビニールハウス外にはIoTデバイス、温湿度センサ、CO₂濃度センサと窓スイッチがある。ビニールハウス内のIoTデバイスは常に自分についての温度センサのデータを監視し、最適生育範囲を外れると生育問題として判断する。生育問題が出る時に、図9のデータタイプによる対照表に基づいて、ビニールハウス外にあるIoTデバイスに生育問題メッセージを送信する。生育問題メッセージを受信したIoTデバイスは自分についての温湿度センサとCO₂濃度センサから取得したデータと図10のアクチュエータによる対照表に基づいて、自然換気をするかどうかを確認する。さらに、自然換気ができる時には図8のどのケースに属するかを決め、対応するアクチュエータに制御命令を出す。

実験環境

全体の実験図は図13に示す。ビニールハウス内にはソフトウェア構成図の以外に対象農作物としてゴーヤ苗を入れる。また、天窓を自動的に開閉するために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。室外は同様にIoTデバイスとしてのESP32、温湿度センサとしてのBMP280とCO₂濃度センサとしてのCCS811がある。そして、サーボモーターの電源として、今回は室外のIoTデバイスに接続する。

5. 評価手法と分析手法

実験の評価方法としては、一般的な1対1の関係で温度

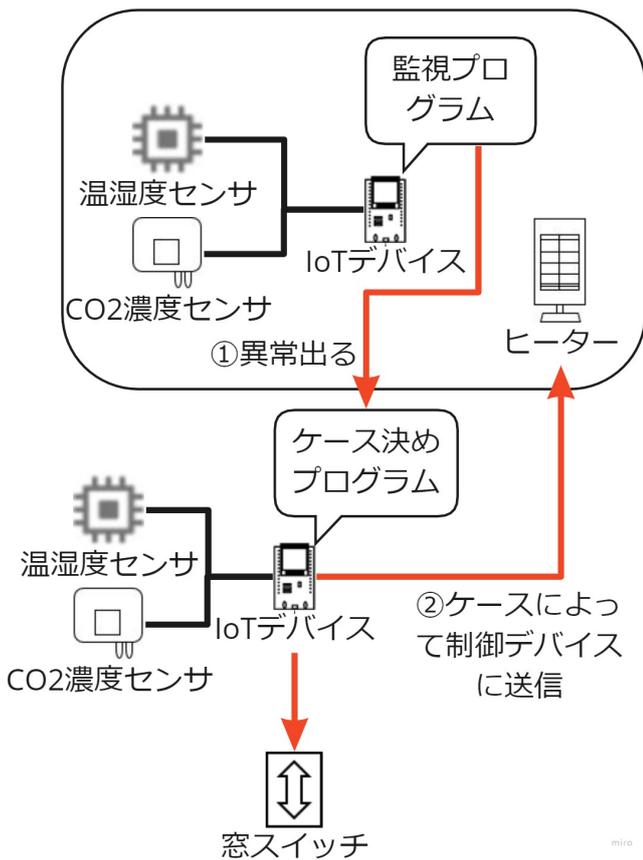


図 12 ソフトウェア構成図

時間を比較する。

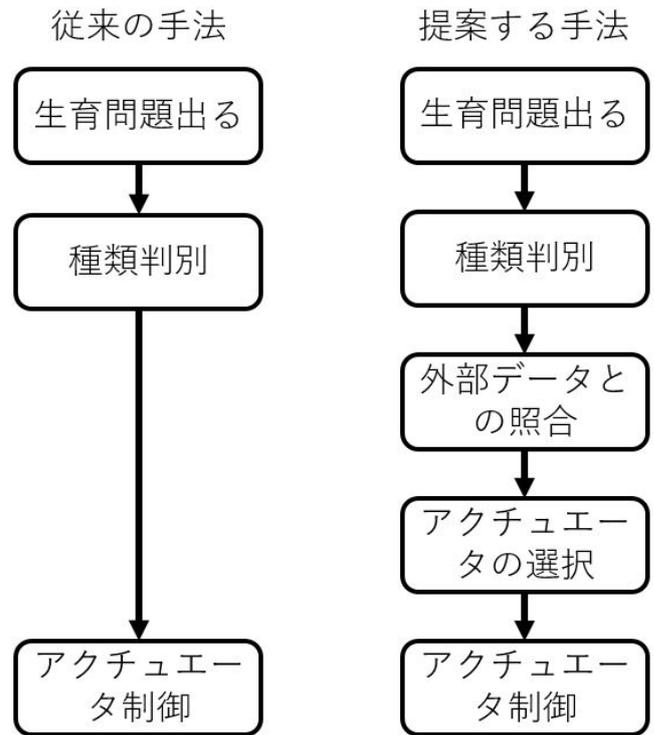


図 14 評価方法

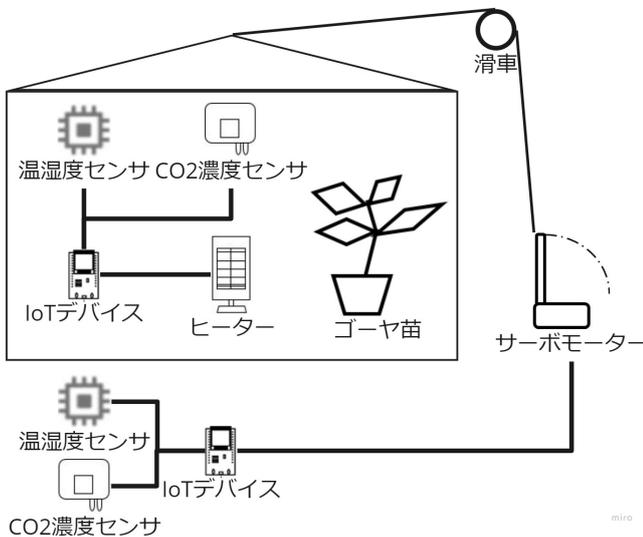


図 13 実験図

を制御する手法と自分の提案による多対多の関係を考慮した手法を分けて分析する。図 14 に評価方法を示す。左側は環境データが生育問題出ると時にデータのタイプを判別すると直ぐにアクチュエータへ制御命令を出す比較対象である。右側は自分の提案によるデータのタイプを判別した後に一番消費電力の少ないソリューションを選択した後にアクチュエータへ制御命令を出す手法である。この2つの手法が生育問題出ると時から問題を解決するまでの消費電力と

6. 議論

本研究は天窓の開く時間を半時間として設定されているが、実際にこれは外部環境によって変更することもできる。例えば温室内外の温度、湿度といった環境データの差が小さいなら、自然換気による温室内の環境に大きく影響を及ぼすことがないと思える。害虫がいない環境にも十分にあり得るため、害虫の侵害を考慮せずに天窓を開けたままでも構わない。同時に、基礎実験のデータをもとに見ると自然換気は10分以内に一番効率が高いため、長時間天窓を開いても意味がないと思われる。

規定時間内に温度を制御できるかどうかを計算する式はシンプルなニュートンの冷却の法則を使っているが、実際に空気の対流による熱伝達はもっと難しくなり複雑である。これを精密にモデリングするために、自然換気する表面積を計算し、熱量を空気の対流表面に多重積分することを考えるべきである。伝熱は対流による熱伝達だけではなく、主要因ではないが、太陽光による熱放射とビニールハウスの壁による熱伝導も今後の課題としたい。

7. おわりに

本論文では一般的なIoT農業システムの構成冗長性とユーザの負担を解決するためにビニールハウス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、天窓の開閉による環境データの変化は複数あるため、複数の

影響要因による多対多の制御関係も考慮した。

天窓の開閉による温度が確実に変化するかどうかについて実験した。実験結果から見ると天窓を開閉すると温度が変化していることが分かる。これによって、温度を制御できるのはヒーターもしくはクーラーだけではなく、より消費電力の少ない方法があると言える。この結論によるビニールハウス内の環境に影響せずに省消費電力の自動的に温度制御システム開発に貢献すると考える。

参考文献

- [1] Bloom, D. E.: Population 2020, *Finance & Development*, Vol. 57, No. 001 (2020).
- [2] Mikalauskiene, A., Narutaviciute-Cikanauske, R., Sarkiunaite, I., Streimikiene, D. and Zlateva, R.: Social aspect of sustainable development: Issues of poverty and food shortage, *Montenegrin Journal of Economics*, Vol. 14, No. 2, pp. 59–78 (2018).
- [3] Mehrabi, Z.: How to buffer against an urban food shortage (2021).
- [4] Perdikis, D., Kapaxidi, E. and Papadoulis, G.: Biological control of insect and mite pests in greenhouse solanaceous crops, *Eur. J. Plant Sci. Biotechnol*, Vol. 2, No. 1, pp. 125–144 (2008).
- [5] Lee, I. and Lee, K.: The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises, *Business Horizons*, Vol. 58, No. 4, pp. 431–440 (2015).
- [6] Liu, T. and Lu, D.: The application and development of IoT, *2012 International Symposium on Information Technologies in Medicine and Education*, Vol. 2, IEEE, pp. 991–994 (2012).
- [7] Akkaş, M. A. and Sokullu, R.: An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes, *Procedia computer science*, Vol. 113, pp. 603–608 (2017).
- [8] Song, Y., Ma, J., Zhang, X. and Feng, Y.: Design of wireless sensor network-based greenhouse environment monitoring and automatic control system, *Journal of networks*, Vol. 7, No. 5, p. 838 (2012).
- [9] Xiaojun, C., Xianpeng, L. and Peng, X.: IOT-based air pollution monitoring and forecasting system, *2015 international conference on computer and computational sciences (ICCCS)*, IEEE, pp. 257–260 (2015).
- [10] 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).
- [11] Wang, J., Chen, M., Zhou, J. and Li, P.: Data communication mechanism for greenhouse environment monitoring and control: An agent-based IoT system, *Information Processing in Agriculture*, Vol. 7, No. 3, pp. 444–455 (2020).
- [12] Li, Z., Wang, J., Higgs, R., Zhou, L. and Yuan, W.: Design of an intelligent management system for agricultural greenhouses based on the internet of things, *2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, Vol. 2, IEEE, pp. 154–160 (2017).
- [13] Li, G., Zhang, W. and Zhang, Y.: A design of the IOT gateway for agricultural greenhouse, *Sensors & Transducers*, Vol. 172, No. 6, p. 75 (2014).
- [14] Pallavi, S., Mallapur, J. D. and Bendigeri, K. Y.: Remote sensing and controlling of greenhouse agriculture parameters based on IoT, *2017 International Conference on Big Data, IoT and Data Science (BIG DATA)*, IEEE, pp. 44–48 (2017).
- [15] Kodali, R. K., Jain, V. and Karagwal, S.: IoT based smart greenhouse, *2016 IEEE region 10 humanitarian technology conference (R10-HTC)*, IEEE, pp. 1–6 (2016).
- [16] Hsu, C., Chen, C., Chen, J. and Sung, J.: Accelerated aging-enhanced lipid peroxidation in bitter melon seeds and effects of priming and hot water soaking treatments, *Scientia Horticulturae*, Vol. 98, No. 3, pp. 201–212 (2003).