

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：53801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K11986

研究課題名（和文）地域農業を支えるCPSの実証研究：高精度収穫量予測手法の確立

研究課題名（英文）Empirical study of CPS to support regional agriculture: Establishment of method to predict yield with high accuracy

研究代表者

山崎 悟史（Yamazaki, Satoshi）

沼津工業高等専門学校・制御情報工学科・准教授

研究者番号：80635889

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の成果は次の二点である。一つ目は、施設栽培園芸作物に対して短期変動に基づく栽培モデルを提案し、イチゴを例に実環境IoTで取得したデータを用いて、従来手法と比べて提案手法が高い収穫量予測精度を示した点である。二つ目は、IoTを実展開する際に重要となる低消費電力化およびスループット向上に着目し、端末のエネルギーを効率化するための通信ネットワーク方式をいくつか提案し、理論解析や数値・実機実験によって有効性を示した点である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、提案した栽培モデルとノンパラメトリック回帰を併用して施設栽培園芸作物の収穫量を予測する手法を提案し、（これまでほとんど栽培モデルが検討されてこなかった）イチゴに適用した際の有効性を定量的に示した点である。

本研究の社会的意義は、構築したIoTネットワークの実環境における性能を明らかにし、取得した実データを用いて従来手法と比べて提案手法が高い収穫量予測精度を示した点である。

研究成果の概要（英文）：There are two and main results of this study.

First, we proposed a crop yield prediction scheme using a cultivation model based on short-term fluctuations and generalized additive model for strawberries, which are horticultural crops that are harvested multiple times in one season. The proposed scheme showed higher prediction accuracy than the conventional method using actual IoT data. Second, we proposed several communication network methods to improve the energy efficiency of nodes focused on lower energy consumption and higher throughput when deploying IoT in a real environment. The effectiveness of the proposed methods were shown using either theoretical analysis, computer simulations, or hardware experiments.

研究分野：情報通信工学

キーワード：農業CPS IoT 省電力広域ネットワーク(LPWAN) 施設栽培園芸作物 イチゴ 短期変動モデル ノンパラメトリック回帰 収穫量予測

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。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

我が国は自然豊かな国である一方、異常気象などの多くの災害被害が発生しており、それらは農作物の収穫に深刻な被害を与えている。そこで、（自然環境に依らず）作物の収穫量を高精度に予測することが可能であれば、安定した作物供給が可能となり、国民生活向上に資すると期待される。これまでに一シーズンに一回収穫される水稻や豆などの穀物類は、主に線形回帰を用いて多くの栽培モデルが提案され、収穫量予測に寄与してきた。一方、一シーズンに複数回収穫される果樹園芸作物において、例えばトマトに関する栽培モデルはいくつか提案されているものの、他の作物に関する検討は十分になされていなかった。

2. 研究の目的

ビタミン C は抗酸化物質として生体内で重要な役割を果たしており、食品成分表によるとイチゴには果重 100g あたり 80mg のビタミン C が含まれており、野菜・果実類の中でもビタミン C の含有率が高い。さらに、イチゴは主に生食で消費されるため調理による損失が少なく、その摂取源として重要であると考えられる。

本研究では「一シーズンに複数回収穫される果樹園芸作物の栽培モデルの構築」という農学的課題に対して、統計学やデータマイニング、無線通信などの情報技術を積極的に活用し、高精度に作物の収穫量を予測可能な栽培モデルを提案し、特にイチゴを対象としてその有効性を示すことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) LPWA 無線ネットワーク設計、実環境における構築

環境にロバストな収穫モデルを構築するには、実空間の情報（データ）を容易かつ確実に取得できる手段が必要である。そこで、オープンソースハードウェアや汎用電子部品のみで設計・開発したセンサ端末を、地域就農者が運営するイチゴハウス施設内に分散配置し、環境情報を取得後、それらを無線通信によってクラウドへ伝送・蓄積を可能とする IoT (Internet of things) ネットワークを実環境に構築する。さらに、就農者から入手したハウス施設や収穫量に関する情報を合わせてクラウド上にデータベース化される。

現状稼働している IoT ネットワークでは短距離無線通信規格に基づいているため、状況によってはエンドデバイスから送信されたデータがゲートウェイに受信されるまでいくつかの中継ノードを経る必要があるため、データ誤りや欠損を誘発していた。結果、高精度な収穫モデルの構築にはデータ解析の「前処理」においてデータのクレンジング等の十分な考慮が必要となっていた。そこで、エンドデバイスがゲートウェイと直接通信することで前処理の簡素化に繋がりデータ解析精度の向上が期待されるため、LPWA (Low-power wide-area) 通信規格に準拠した IoT ネットワークを構築する。

(2) 一シーズンに複数回収穫される果樹園芸作物の栽培モデルの提案、およびイチゴの収穫量予測精度の実証評価

これまで提案されている栽培モデルの基本的な考え方は、ある物理量（代表的なものとしては温度）の一定期間の積算値が収穫量に影響するというものであった。一方、本研究では一シーズンに複数回収穫される事象を捉えるべく、「作物の収穫量は長期変動と短期変動の二つの影響を受ける」という栽培モデルを提案する。一シーズンに複数回収穫される果樹園芸作物の一例としてイチゴに着目し、提案する栽培モデルを用いてイチゴの収穫量予測精度の実証評価を行う。ここで、モデル構築のための学習（データマイニング）において、（これまで水稻や豆などの穀物類で用いられてきた）線形回帰では限界があるため、ノンパラメトリック回帰、特に本研究では一般化加法モデル (Generalized Additive Model, GAM) を用いる。

上記(1)と合わせて、図 1 に研究方法の概要を示す。図 1 に示すように、「クラウド (Cyber 空間) 上のデータの解析結果である収穫量予測精度は、実空間 (Physical 空間) へフィードバック、次栽培へ活用される」という、農業 CPS (Cyber Physical System) の概念を具現化する。

(3) 高エネルギー効率を実現する通信ネットワーク方式の提案と評価

上記(1)の研究過程において、IoT ネットワークの低消費電力化および高スループット達成のための着想をいくつか得ることができた。具体的な方式として設計・提案し、理論解析や数値実験によって有効性を示す。さらに、上記(2)にて実機評価を進める過程において、ゲートウェイの負荷低減手法の発想に至り、具体的な方式として設計・提案し、実機実験と数値実験によって有効性を示す。具体的な内容（の一部）については次節の研究成果でまとめる。

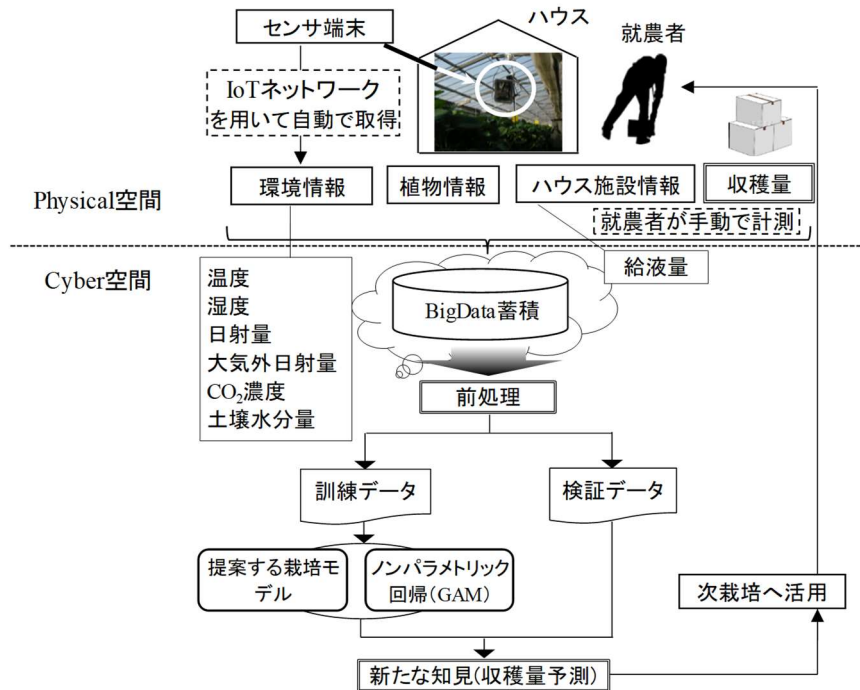


図1 提案する農業 CPS の概要

4. 研究成果

(1) アンライセンスバンドを用いる LPWA (Sigfox, LoRa) に着目し、汎用電子部品から構成されるセンサ端末を開発した。スペクトル波形の測定結果や、データサイズに対する伝送時間が理論値と実験値がおおむね一致したことから開発したセンサ端末の妥当性を明らかにした。次に、フィールド実験を通じて基本伝送特性を測定した。具体的には、①設計・製作した IoT 端末を用いれば最大で 26.35km のデータ伝送が実現可能なことを示した。②ハウス内におけるセンサ端末位置とデータを受信した Sigfox 基地局数の関係から、ハウス内におけるセンサ端末の最適な設置条件を明らかにした。③屋外での IoT 利用を想定した際の、端末のエネルギー消費性能を明らかにした。

(2) まず、農学および統計学的検討から、本研究課題実施前までに構築したモデルに用いていた説明変数 (特徴量) のうち、照度と給液電気伝導率を廃止し新たに日射量と大気外日射量を追加した。これらの新たなデータ群は、気象庁 HP の公開データや国立天文台 Web サイトで公開されている情報 (変換式) を参照して、手動で生成した。説明変数の交換後、まず収穫量推定精度の向上を確認した。次に、構築した IoT ネットワークを用いて収集したデータ群 (図1に示す環境情報) と、手動で蓄積した収穫量と給液量の合計4年分のデータを用いて、提案手法を用いて収穫量予測精度を評価した。具体的には、三年分のデータを学習用、一年分のデータを検証用として交差検証法を用いて予測精度 (平方平均二乗パーセント誤差) を評価した。結果、従来手法と比べて提案手法を用いれば予測精度が約 20%程度改善されることを明らかにし、提案手法の優位性を示した。さらに、ノンパラメトリック回帰の特徴を活かし、任意の2つの特徴量が収穫量に与える影響を三次元で視覚化することによって、各特徴量の変化が収穫量に与える影響を考察した。Cyber 空間におけるデータ解析結果の、Physical 空間へフィードバックの検討 (図1における「次栽培への活用」) として、MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) プロトコルをベースとした簡易な IoT メカトロニクスを設計・製作し、その実環境における動作を実証した。

(3)

- ① アドホック/センサネットワークを含む IoT ネットワーク一般を対象に、自身のノードの残された電力量だけを参照して送信元ノードから宛先ノードを探すためのフラッドング手法を提案した。提案手法を AODV ルーティングに適用し、数値実験によりエネルギー効率の観点で提案手法の従来手法に対する優位性を示した。さらに、提案手法を無線全二重通信へ適用し、電力消費の観点で提案手法の従来手法に対する優位性を示した。
- ② LPWAN の一つである LoRaWAN を対象に、パケット衝突数削減とゲートウェイ処理負荷低減の両立を目的とした、自律分散的な周波数リソース割当て手法を提案した。具体的には、ACK 送信要求を含む Confirmed パケットと ACK 送信要求を含まない Unconfirmed パケットを用い、ACK の有無によって周波数を切り替える手法を提案した。実機実験と数値実験により提案手法の有効性を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10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 S.Yamazaki, T.Ogura	4. 巻 proceeding
2. 論文標題 Energy Consumption Model for LoRaWAN via Field Experiments for Smart Agriculture	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE 34th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2023)	6. 最初と最後の頁 -
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 S.Yamazaki, J.Uchiyama, Y.Abiko, K.Ohuchi	4. 巻 vol.143, no.8
2. 論文標題 On an Effect of a Simple and Energy-Efficient Flooding Scheme for Multi-hop Full-Duplex Communications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 -
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 Y.Sahara, S.Yamazaki	4. 巻 vol.141, no.8
2. 論文標題 Actuation of an IoT Prototype System via MQTT for Smart Mobility	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 917 ~ 918
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.141.917	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 K.Suzuki, S.Yamazaki	4. 巻 vol.25, no.5
2. 論文標題 Throughput Maximization Based on Optimized Frame-Aggregation Levels for IEEE802.11 WLANs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Communications Letters	6. 最初と最後の頁 1725,1728
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCOMM.2021.305	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 森岡和行, 平野拓一, 山崎悟史, 武田茂樹	4. 巻 vol.141, no.2
2. 論文標題 進展するデジタル無線通信技術 -マルチアンテナシステムの概要と動向-	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 111,122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.141.111	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 S.Yamazaki, Y.Abiko, H.Mizuno	4. 巻 Article ID 8832602
2. 論文標題 A Simple and Energy-Efficient Flooding Scheme for Wireless Routing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing	6. 最初と最後の頁 1,9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2020/8832602	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 Y.Kuwahara, N.Aihara, S.Yamazaki, K.Ohuchi, H.Mizuno	4. 巻 proceeding
2. 論文標題 Energy-Efficiency Comparison of Ad-Hoc Routings in a Shadowing Environment for Smart IoT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 35th International Conference on Information Networking (IC0IN 2021)	6. 最初と最後の頁 801,804
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IC0IN50884.2021.9333990	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 K.Suzuki, N.Aihara, K.Adachi, S.Yamazaki	4. 巻 proceeding
2. 論文標題 Autonomous Decentralized Frequency Resource Allocation using ACK Signal in LoRaWAN	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2020)	6. 最初と最後の頁 1,6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/WPMC50192.2020	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 S.Yamazaki, R.Asakura, K.Ohuchi	4. 巻 vol.E103-A, no.07
2. 論文標題 Throughput Analysis of Dynamic Multi-Hop Shortcut Communications for a Simple Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transaction on Fundamentals	6. 最初と最後の頁 -
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 Y.Nakajima, W.Yamanouchi, S.Yamazaki	4. 巻 proceeding
2. 論文標題 On Transmission Performance of Sigfox in Agricultural IoT Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 6th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2020)	6. 最初と最後の頁 -
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 0件)

1. 発表者名 古木琢磨, 山崎悟史
2. 発表標題 無線チャネル特性を考慮した連合学習ネットワークにおけるユーザ選択の性能評価
3. 学会等名 2023年度電子情報通信学会総合大会, ISSポスターセッション
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本悦展, 山崎悟史
2. 発表標題 フレーム集約に着目した無線LANスループットの最適化
3. 学会等名 2023年度電子情報通信学会総合大会, B-5-85
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小倉大輝, 山崎悟史
2. 発表標題 実環境におけるLoRaWANのエネルギー消費のモデル化
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告RCS (無線通信システム), vol. 122, no. 164, RCS2022-110, pp. 72-77
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山崎悟史, 切岩祥和, 青野雅樹
2. 発表標題 農業IoTを活用した施設果樹作物の収穫量制御支援手法に関する検討
3. 学会等名 令和4年度電気学会全国大会, S12-5, pp.14-16
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小倉大輝, 山崎悟史, 鈴木康介
2. 発表標題 LoRaWANにおけるエネルギー消費のモデル化に関する検討
3. 学会等名 2022年度電子情報通信学会総合大会, B-5-85
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小倉大輝, 山崎悟史
2. 発表標題 実環境におけるLoRaWANのエネルギー消費のモデル化に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会東海支部令和3年度卒業研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中嶋佑斗, 山崎悟史
2. 発表標題 Sigfox通信に伴うエネルギー消費の実験的解析
3. 学会等名 2021年度電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-75
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝又勇紀, 山崎悟史
2. 発表標題 ユーザ分布がLoRaWANのエネルギー効率に与える影響
3. 学会等名 電子情報通信学会研究会技術報告, vol. 121, no. 170, NS2021-57, pp. 1-5
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木康介, 山崎悟史
2. 発表標題 WLAN理論スループットを最大化するフレーム集約法における多変数化の効果
3. 学会等名 2021年度電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木康介, 山崎悟史
2. 発表標題 各種パラメータが802.11acフレーム集約数と理論スループットに与える影響
3. 学会等名 2020年度電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木康介, 山崎悟史
2. 発表標題 最適なフレーム集約数に基づく802.11WLANスループットの最大化
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告 RCS2020-61
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木康介, 山崎悟史
2. 発表標題 LoRaWANにおけるACK信号を用いた自律分散的な周波数リソース割当て手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信技術報告 RCS2020-54
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 落合晃汰, 山崎悟史, 切岩祥和
2. 発表標題 施設栽培イチゴの収穫量推定におけるGAM回帰の適用考察
3. 学会等名 農業情報学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中嶋佑斗, 山崎悟史, 大黒篤
2. 発表標題 農業IoT向けSigfoxネットワークの構築と基礎実験
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告SeMI2019-79
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中嶋佑斗, 山崎悟史
2. 発表標題 Sigfox通信に伴うエネルギー消費のモデル化 -農業IoTを想定とした実験的解析-
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告SeMI2019-137
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中嶋佑斗, 山崎悟史
2. 発表標題 Sigfox通信に伴うバッテリー寿命に関する実験的評価 -農業IoTを想定として-
3. 学会等名 情報処理学会 第82回全国大会 6X-07, pp. 3-329-3-330
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 山崎悟史	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 4
3. 書名 研究開発リーダー, vol.14, no.1, (担当: pp.12-15, 農業IoTネットワークの新展開: LPWAとローカル5G)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>沼津工業高等専門学校制御情報工学科 山崎研究室webサイト https://user.numazu-ct.ac.jp/~s-yamazaki/</p> <p>一般財団法人AOIフォーラムwebサイトにおける本校山崎研究室の研究紹介 https://aoi-forum.jp/members/5558/</p>
--

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	切岩 祥和 (Kiriiwa Yoshikazu) (50303540)	静岡大学・農学部・教授 (13801)	

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