

令和元年9月5日現在

機関番号：53801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00164

研究課題名(和文) 近未来予測型農業を拓くIoT×ビッグデータの研究と実証

研究課題名(英文) Study for IoT and Big-data in smart agriculture to predict future harvest

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、まず、環境にロバストな収穫モデルの構築に向け、汎用電子部品で構成されるセンサ端末を設計、製作し、物理空間の情報(データ)を容易に取得できる手段を確立(IoTネットワークを構築)した。次に、一シーズンに複数回収穫される作物を対象に、「収穫量は長期変動と短期変動の二つの影響を受ける」という収穫モデルを提案した。施設栽培イチゴを例に、地域就農者のハウス施設に構築したIoTネットワークから得られた環境データや実際の収穫量データ等を用いて、ノンパラメトリックなGAM (Generalized Additive Model) 回帰に基づく収穫量推定精度の評価を行い、提案モデルの有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年のイチゴ栽培では軽労化に向け高設化が進み、従来の土耕と比べ植物体周辺の環境条件に大きな変化があり、環境情報が収穫・生育に与える影響を明らかにすることは意義がある。汎用品のみで設計・製作したセンサ端末は工場など農業以外の分野でも利用可能であり適用範囲が広い。さらに、提案する収穫量推定モデルは他の作物でも適用可能で汎用性が高い。これらを活用することでIoTやそのデータ解析技術の更なる進展が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, first, in order to construct a robust harvest model for the environment, we design and manufacture a sensor terminal composed of general-purpose electronic components. As a result, we establish means for easily acquiring information (data) in physical space, that is, construct an IoT network. Next, we proposed a model that the harvest volume is affected by long and short-term environmental influence for crops harvested multiple times during a season. We show the effectiveness of proposed model by evaluating the yield estimation accuracy based on nonparametric GAM (Generalized Additive Model) regression using actual yield data and environmental data obtained from the IoT network built in the house facility of the regional strawberry farmer.

研究分野：情報学(データベース・統計的学習)

キーワード：IoTネットワーク 施設栽培イチゴ 収穫量推定 ノンパラメトリック回帰 差分値

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

センサやクラウドなどあらゆるモノがインターネットに繋がる IoT (internet of things)の世界が浸透しつつある。IoT デバイス数は 2020 年には 300 億台程度まで増加することが予測されており、それらから収集されるビッグデータを活用し、新たな知識を獲得するためのアルゴリズムやシステムに関する研究開発が活発化している。例えば、世界的な食糧不足、国内における農業従事者の高齢化、後継者不足などから、就農者の経験と勘によるアナログ的農業からビッグデータを活用したデジタル的農業への転換が期待されている。

ところで、我が国は自然豊かな国である一方、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。そのような状況においても、高精度な収穫量予測が可能であれば、安定した作物供給が可能となり、国民生活向上に資する。昨今、農作物の生産性を高める試みとして、農学に基づく品種改良技術に加え、情報通信や機械学習などの ICT 技術を積極的に活用した環境制御技術が注目を浴びている。

### 2. 研究の目的

水稲などの穀物類は一シーズンに一回収穫されるため、主に線形回帰を用いて収穫量予測がなされてきた。トマトやイチゴなど一シーズンに複数回収穫される作物には線形回帰の適用は限界があるため、収穫量予測の検討例は少ない。特に、イチゴは数粒で成人の一日に必要なビタミン C を摂取可能な、重要な果樹作物であるにも関わらず、未だ収穫モデルが提案されていない。環境にロバストな収穫モデルを構築するには、物理空間の情報(データ)を容易かつ確実に取得できる手段が必要である。以上を鑑み、本研究の目的は以下の二点である。

- (1) 汎用電子部品のみでセンサ端末を設計、製作し、地域就農者が運営するイチゴハウス施設内に IoT ネットワークを構築する。
- (2) 構築した IoT ネットワークを利用して取得した環境データや、就農者から提供頂いた収穫量データなど多種のデータ群に対してノンパラメトリック回帰を活用し、一シーズンに複数回収穫される作物（本研究では特にイチゴに着目）の収穫量を高精度に推定可能なモデルを提案する。

### 3. 研究の方法

#### (1) IoT ネットワークの構築

一般に購入可能な汎用電子部品で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する。センサ端末から取得された環境情報（温度、湿度、照度、CO<sub>2</sub>濃度）が、無線ネットワークを経由してクラウドに蓄積される IoT ネットワークを構築する。次に、就農者から提供頂く収穫情報とハウス施設情報（給液量、給液 EC）と、IoT ネットワークから収集した環境情報をクラウドにデータベース化する。

#### (2) 高精度収穫量推定モデルの提案

収穫情報は 1 日毎に計測され、環境情報とハウス施設情報は数分毎に取得されるため、回帰分析の実施に向け全情報を 1 日毎のデータとして整形する。その後、データ解析の前処理として、平滑化、平均化、ノイズ除去等を施す。一シーズンに複数回収穫される作物としてイチゴに着目し、その収穫量を高精度に推定可能なモデルを提案する。提案モデルの特徴量を学習する際、「一シーズンに複数回収穫」という特徴を考慮し、ノンパラメトリックな（一方が他方に対して滑らかに近似され、非線形な関係をもつ）GAM(Generalized Additive Model)回帰(Trevor Hastie and Robert Tibshirani, 1986)を用いる。提案モデルを用いて収穫量を推定した際、実測値と推定値の類似度を、自由度調整済み寄与率  $R^2$  を用いて定量的に評価する。推定精度を高めるべく、GAM 回帰や提案モデルにおける各種パラメータ値の最適化を検討する。

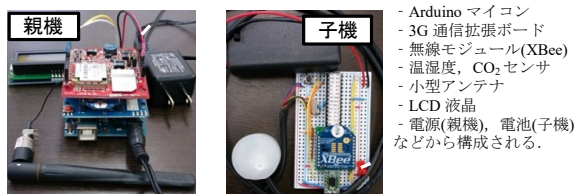


図 1 設計・製作したセンサ端末の概観

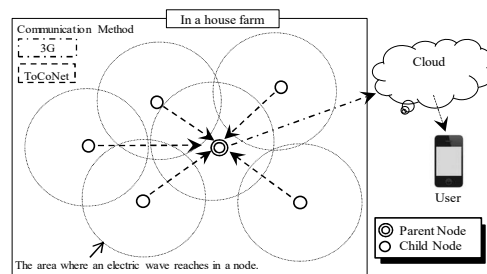


図 2 構築した IoT ネットワークの概観

### 4. 研究成果

#### (1) IoT ネットワークの構築

図 1 に設計、製作したセンサ端末（親機と子機）の概観を示す。図 2 に示すように、ハウス内には 6 台のセンサ端末（親機 1 台、子機 5 台）が設置され、子機にてセンシングされた温度などの環境情報は、短距離無線通信により一旦、親機に送られ、携帯電話(3G)回線を利用してク

クラウドに送信する。最終的に、ユーザはクラウドに蓄積された情報を、スマートフォンなどを利用して遠隔で参照できる。

構築した IoT ネットワークの基本性能を明らかにすべく、温湿度変化、周波数スペクトル、センサ端末間における通信速度、通信距離対受信レベル、通信距離対通信失敗確率、マルチホップ通信(中継端末)の適用効果についてフィールド実験より明らかにした(学会発表⑦参照)。

さらに、IoT ネットワークを構築の際に直面した課題(シャドウイング環境下におけるマルチホップネットワークにおける全体電力消費)に関する検討を進め、簡素な系を対象に全体電力消費の観点で最適ホップ数や最大ホップ数などの理論的導出に成功した。(雑誌論文③参照)。この結果を活用し、ハウス内におけるセンサ端末の設置に関する重要な知見を得た。

## (2) 高精度収穫量推定モデルの提案

### ・定義

子機 4 台には温湿度センサ、子機 1 台には照度センサ、親機には土壌水分センサと CO<sub>2</sub> センサが設置されている。温湿度と照度は 2 分毎、CO<sub>2</sub> と土壌水分は 5 分毎に収集している。以降、「温度、湿度、照度、CO<sub>2</sub>、土壌水分量」を環境情報と定義する。さらに、ハウス内における給液 EC(Electrical Conductivity)、給液量、収穫量について、就農者が 1 日毎に手動で収集している。以降、「給液 EC と給液量」を施設情報と定義する。イチゴの収穫量推定にあたり、ノンパラメトリック回帰分析を用いる。目的変数は収穫情報であり、説明変数は環境情報と施設情報を処理した値(後述する積算値と差分値)を用いる。収集期間(イチゴ栽培の 1 シーズン、2015 年 11/1 から 2016 年 5/31)のデータに対して次に述べる収穫量推定モデルと回帰分析を用いて、説明変数により目的変数を当てはめること(フィッティング)を、収穫量推定と定義する。その精度を自由度調整済み寄与率  $R^2$  を用いて評価し、以降、それを推定精度と称す。

### ・収穫量推定モデル

従来、「収穫量は、ある一定期間、積算された情報の影響を受ける」という積算モデルが用いられてきた。本研究では「収穫量は、短期的な情報の変動の影響を受ける」とい差分モデルを提案する。両モデルにおける「情報」とは環境情報(5 変数)と施設情報(2 変数)の合計 7 変数を意味する。各モデルにおける説明変数は、次の通りである。

[モデル 1] 積算値  $I(t)$ : ある一定期間(積算日数  $\Delta t_i$ )の積算値。

[モデル 2] 差分値  $D(t)$ : 現在の積算値と、ある一定期間(差分日数  $\Delta t_d$ )前の積算値の差。

具体的に各種パラメータの関係について、ある月の 10 日目において  $\Delta t_i=3$ 、 $\Delta t_d=7$  の例を図 3 に示す。また、図 3 において例えば 1 日目では  $\Delta t_i$  や  $\Delta t_d$  が設定できないため、データ収集開始  $\Delta t_d + \Delta t_i$  日目以降から、回帰分析処理が開始されるとする。

### ・性能評価

静岡県東部某市にて一般就農者(1 農家)がハウス施設で栽培されるイチゴを対象に、概ねイチゴの収穫期間(1 シーズン、2015 年 11/1 から 2016 年 5/31)を対象データとした。[モデル 1]と[モデル 2]において過去の積算値を用いる手法を従来手法とし、[モデル 1]と[モデル 2]を用いる手法を提案手法として、実データを用いて評価する。尚、本評価では、フリーの統計解析ツール R を使用し、GAM の実装にはそのライブラリ mgcv を使用した。 $\Delta t_i$  と  $\Delta t_d$  の推定精度  $R^2$  に対する影響を評価する。 $\Delta t_i$  と  $\Delta t_d$  を各々 5 から 25 まで 5 日毎に設定し合計 25 通りの組み合わせに対して、 $R^2$  を評価する。提案手法の結果を図 4 に示す。ここで、GAM 回帰に用いる基底関数の個数  $k$  は 10 (mgcv におけるデフォルト値)としている。重回帰に比べて GAM 回帰を用いた場合の方が、約 10%推定精度が向上することがわかった。これは、従来手法に関しても同様の結果となった。

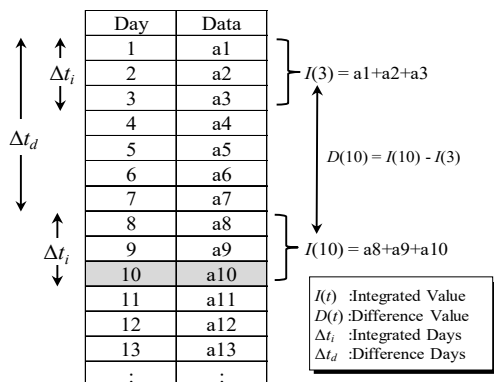


図 3 提案する収穫量推定における各種パラメータ。

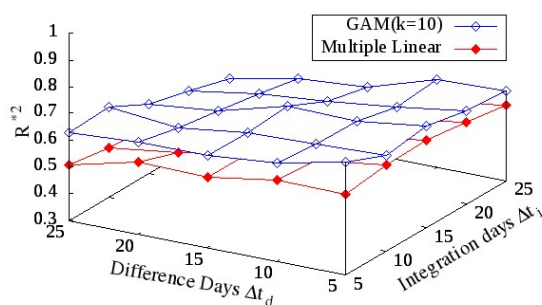


図 4 ( $\Delta t_i, \Delta t_d$ )に対する推定精度(提案手法,  $k=10$ )。

$\Delta t_i$  と  $\Delta t_d$  の値が  $R^2$  に与える影響の詳細を明らかにするために、 $k$  に着目し評価する。図 4 でプロットした 25 通りの「 $\Delta t_i$  と  $\Delta t_d$  の組」のうち、 $R^2$  の値が大きい上位 5 組を抽出した結果を表 1 に示す。これらの 5 組に対して、 $k$  を 1 から 15 まで変化させた時の  $R^2$  の算出結果を図 5 (従来手法)、図 6 (提案手法) に示す。ここで、重回帰を用いて  $R^2$  が最大の場合の特性も示している。図 6 において  $\Delta t_i$  と  $\Delta t_d$  を可変にして評価すれば、イチゴの収穫量を精度よく推定可能であることが示された。両手法において、重回帰に比べて GAM 回帰を用いた場合の方がより高い推定精度を示している。提案手法では  $(\Delta t_i, \Delta t_d, k) = (5, 5, 12)$  の時、最大で 0.74 の推定精度を実現することがわかる。また、 $k=10$  における推定精度は最大で 0.7 (従来手法)、0.72 (提案手法) とほぼ同等の結果となった。しかし、図 5 (従来手法) で示した 5 組の特性にほとんど差がみられないが、図 6 (提案手法) では GAM 基底数  $k$  の値に依らず、 $(\Delta t_i, \Delta t_d) = (5, 5)$  の場合が最も高い推定精度を示しており、従来手法のどの場合よりも高い結果が得られている。すなわち、提案手法ではこのような基底数  $k$  の値に依らず最良な特性を示す  $\Delta t_i$  と  $\Delta t_d$  の組を抽出することが可能なことを示唆している。これは、提案モデルにおける差分値の導入効果と解釈できる。さらに、表 1 の上位 4 組に着目すると、提案手法では  $\Delta t_d$  を 5 のように小さな値で設定すれば高い推定精度が示されることを示唆している。図 7 に提案手法を用いた際の、収穫日対収穫量[kg]の時系列特性を示す。GAM (赤線) が重回帰 (青線) と比べて実際の収穫量 (黒線) と良好にフィッティングされていることが定性的にも確認された。

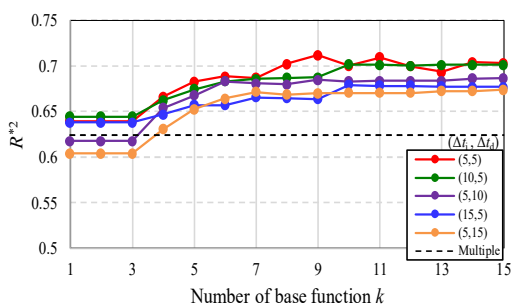


図 5 GAM 基底数  $k$  に対する推定精度 (従来手法)

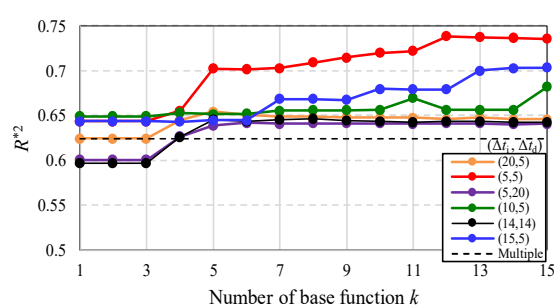


図 6 GAM 基底数  $k$  に対する推定精度 (提案手法)

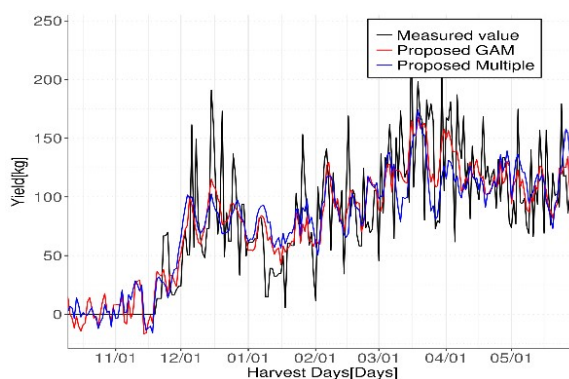


図 7 収穫量の時系列特性

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 山崎悟史, 切岩祥和, 青野雅樹, “積算値と差分値を用いる回帰分析による収穫量推定-施設栽培イチゴへの基礎検討-,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J101-D, no.10, pp.1466-1470, Oct. 2018. ※査読有
- ② K.Morioka, S.Yamazaki, D.Asano, “Improving Spectral Efficiency of Non-Orthogonal Space Time Block Coded-Continuous Phase Modulation,” IEICE Transaction on Communications, vol.E101-B no.9 pp.2024-2032, Sep. 2018. ※査読有
- ③ S.Yamazaki, K.Ohuchi, “Performance Analysis of Total Power Consumption in Linear Multi-hop Networks,” International Journal of Wireless Personal Communications, vol.100 no.2, pp.337-349, Springer, Nov. 2017. ※査読有
- ④ 鈴木克己, 佐々木達也, 糠谷明, 中山正和, 狩野敦, 切岩祥和, “NaOH 水溶液を利用したハウス内 CO<sub>2</sub> 濃度分布の推定,” 園芸学研究 16 (4) 455-463, 2017. ※査読有

[学会発表] (計 9 件)

- ① 三改木朋希, 秋山将輝, 山之内亙, 山崎悟史, “農業 CPS 向け Sigfox 通信端末の設計と試作,” 信学総大, B-8-17, 2019.3.19.
- ② 影島聖也, 山崎悟史, “積算値と差分値を用いるノンパラメトリック回帰に基づく収穫量推

定の検討, ”信学ソ大(基礎・境界) A-10-5, 2018.9.12.

- ③ 山崎悟史, “農業 IoT ネットワークの活用-データ解析を中心として-, ”平成 29 年度電気学会 C 部門全国大会, 企画セッション「多様なデータ解析技術とその応用」TC20-5, pp.780-785, 2017.9.6.
- ④ 山崎悟史, 切岩祥和, “ノンパラメトリック回帰に基づくイチゴ収穫量推定法の基礎評価, ” 農業情報学会 2017 年度年次大会, 2017.5.18.
- ⑤ 山崎悟史, 切岩祥和, “農業 IoT ネットワークによる収集データの活用 - 回帰分析に基づくイチゴの収穫量推定の基礎評価 -, ” 信学技報, vol. 116, no. 400, IN2016-85, pp. 1-6, 2017 年 1 月 19 日
- ⑥ 山崎悟史, 杉山裕哉, 切岩祥和, “回帰分析に基づくイチゴ収穫量の推定評価, ” 農業×計測×情報通信ワークショップ 2016, ポスター発表, 2016 年 11 月 17 日.
- ⑦ 山崎悟史, 杉山裕哉, 大黒篤, “農業 M2M センサデータと回帰モデルを用いた収穫推定に関する基礎評価, ” 信学総大, B-18-24, 2016.3.16.
- ⑧ 大黒篤, 森俊勝, 鄭愚耕, 宮垣栄司, 平谷拓也, 山崎悟史, 佐々木毅, 前島慎一郎, 伊豆澤秀憲, “一般就農者向け イチゴ栽培の環境計測・分析の取り組み, ” 信学技報, vol. 115, no. 290, ASN2015-76, pp. 157-160, 2015.11.6.
- ⑨ T.Ishida, S.Yamazaki, A.Daikoku, “Implementation and Field Experiments of an Open M2M Sensor Network for Smart Agriculture,” 2015 IEICE International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2015), pp.52-57, Narashino, Japan, 27 August, 2015. ※査読有

[図書] (計 3 件)

- ① IoT ビジネス・機器開発における潜在ニーズと取り組み事例集 (59 名で分担, 山崎悟史の担当: 第 9 章 第 3 節, 農業における IoT), (株) 技術情報協会, 2016 年 5 月. (ISBN:978-4-86104-614-8).
- ② 診断・監視技術の共通基盤 (19 名で分担, 山崎悟史の担当: 第 2 章 7 節 pp.29-33, IoT 無線ネットワークにおけるエネルギー効率の診断・監視技術), (社)電気学会 診断・監視技術の共通基盤に関する協同研究委員会編, 2017 年 10 月.
- ③ 山崎悟史, “農業 IoT ネットワークを活用したデータ収集とその解析-Toward CPS-,” 研究開発リーダー, vol.14, no.1, pp.12-15, (株)技術情報出版会, 2017 年 4 月.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

・新聞報道

- ① 伊豆日日新聞(日刊 3 面)に研究成果が掲載.  
沼津高専の研究グループ 26.5 キロの長距離通信達成 LPWA 規格センサー端末を試作, 2019 年 3 月 18 日.
- ② 沼津朝日新聞(2 面)に研究成果が掲載.  
農業用 IoT システムに汎用性 沼津高専が実証実験に成功, 2019 年 2 月 22 日.
- ③ 沼津朝日新聞(2 面)に研究紹介が掲載.  
シリーズ最先端を行く 11, 2016 年 3 月 27 日.

・展示

- ① アグリビジネス創出フェア 2017 (農林水産省主催) にて研究成果を紹介, 2017 年 10 月.

・Web サイト

<https://research.kosen-k.go.jp/researcher-list/7000002644>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

切岩 祥和 (KIRIWA Yoshikazu)  
静岡大学・農学部・教授  
研究者番号: 50303540

### (2) 研究協力者

なし