

農業におけるセンサーネットワークシステムの活用

岡安崇史^{†1} 有田大作^{†2} アンドリ プリマ ヌグロホ^{†1} 星 岳彦^{†3}
吉永 崇^{†2} 井上英二^{†1} 平井康丸^{†1} 光岡宗司^{†1}

農業生産は気象環境の変化、圃場条件、市況などに左右される。これらの中で、圃場の環境情報は、農作業の適期判断や作物の生育診断・品質評価に資する極めて重要な情報であり、その収集・利用技術の高度化が求められている。著者らはセンサーネットワークシステム(SNS)を活用した圃場環境モニタリングや農作業履歴収集・管理が行える情報化農業支援システム(Agri-eye)の開発を行っている。一方、モニタリング装置の設置台数、さらにはシステムに接続されたセンサー数の増加に伴って、これらから絶えず計測・収集される環境データは急速に増大することが予想され、データの管理や利活用技術の開発が求められている。ここでは、特異スペクトル変換に基づく時系列データの変化点分析手法を用いた時系列環境データの特徴量抽出を示す。本論文では農業におけるSNSの活用事例を紹介する。

Utilization of Sensor Network System in Agriculture

TAKASHI OKAYASU^{†1} DAISAKU ARITA^{†2} ANDRI PRIMA NUGROHO^{†1}
TAKEHIKO HOSHI^{†3} TAKASHI YOSHINAGA^{†2} EIJI INOUE^{†1}
YASUMARU HIRAI^{†1} MUNESHI MITSUOKA^{†1}

Agriculture is dependent on climate, weather, soil conditions, and crop types. Therefore, farmers have tried to develop and improve their own cultivation techniques and senses during the long-term experiences so as to fit the peripheral field environment. Therefore the authors have tried to develop the informatization agricultural supporting system called "Agri-eye" to optimize the agricultural production system. This system is composed of field environmental monitoring system, work history recording and management system, and so on. However, measured data stored in agricultural information database are rapidly increasing owing to an increase in the number of monitoring devices and sensors installed in such devices. Thus, to extract feature values from such vast data, it is necessary to develop several numerical methods. The change point analysis program based on Singular Spectrum Transformation (SST) was applied for extracting the difference of cultivation environmental conditions. In this paper the utilization of the sensor network system (SNS) in Japan agriculture will be introduced.

1. はじめに

農業生産は、気象、地形、気候、圃場条件、市況等に強く影響される。このため、圃場の温湿度、日射量、土壌温度・水分等の環境情報は、播種(移植)、施肥、防除等の管理作業、収穫等の適期判断のための極めて重要な情報である。近年の情報通信技術(以下、ICTと略称)の急速な進歩によって、圃場における気象環境情報を簡単かつリアルタイムに計測できるようになった。特に、国内では、中央農研センターのフィールドサーバー研究[1][2]を皮切りに、様々なモニタリング装置の開発が行われ、その一部の成果は製品化され、実際の圃場で利用されているものもある。国外においても環境モニタリングに関する研究は盛んに行われ、例えば、無線型環境モニタリング装置を用いた圃場環境情報や害虫個体数の計測が試みられている[3][4]。このように環境モニタリングシステムに関する技術は、実用に十分応え得る水準に研究開発が進んできているといえよう。

一方、近年のクラウドコンピューティング技術の普及は、これまで個別に管理・利用されてきたICT機器やこれらで

使用されてきたソフトウェア等の仮想化を急速に進めつつある。これら一連のサービスは、仮想化によってオンライン環境でいつでも利用できるようになるため、サービス全体の信頼性、可用性、保守性等を飛躍的に向上させている。利用者は、高額なハードウェアやソフトウェアを個別に購入・管理する必要も少なくなり、これまでと比較して高機能なシステムを比較的容易かつ低価格で利用できるようになった。これらの技術発展の恩恵は農業分野においても例外ではなく、最近ではICTを活用した農業生産・経営支援システムも多数開発され、これらのうちのいくつかは実際に販売されるに至っている。著者らも圃場環境情報、作物生育診断・品質評価情報、農作業履歴情報の管理・分析・共有を目的に情報化農業支援システム"Agri-eye"の開発[5]を行っており、農業生産システムの改善、生産コストの可視化および削減、農作物の品質向上を目的に研究を進めている。

他方、ネットワークに接続された様々な装置・機器からは、膨大な情報が簡単かつ継続的にデータベースへ収集できる時代が到来した。このため、最近では、これら膨大な情報の管理のみならず、より効率的かつ迅速なデータ分析技術の開発が必要となってきている。農業分野でも、圃場環境モニタリング装置の設置台数、各装置に搭載されるセンサー数の増加により、農業情報データベースに蓄積され

^{†1} 九州大学

Kyushu University

^{†2} (公財)九州先端科学技術研究所

Institute of Systems, Information Technologies and Nanotechnologies

^{†3} 近畿大学

Kinki University

圃場環境情報も急速に増大しており、これら膨大な情報の中から農業生産に必要とされる情報を以下に早く抽出するかが重要な課題となってきた。井出・井上[6]は、一連の時系列データから切出される現在および過去の時系列データの特徴量を特異スペクトル変換 (Singular Spectrum Transformation) という手法で抽出し、その結果算出される変化点スコア (両時刻における特徴量の差異の程度を表すスカラー量) を用いて、両時刻間の時系列データの差異を示す方法を提案している。このような考え方に基づく解析手法はこれまでも種々提案されており、通信ネットワークへのアクセス状態監視[7]、機械振動等の異常値検出[8]、環境情報分析[9]、人体行動分析[10]等への応用例が紹介されている。

本稿では、著者らが行ってきた実証実験の成果に基づいて、農業への ICT の利活用、特に、センサーネットワークシステムの活用事例を中心に紹介させていただく。

2. 情報化農業支援システム (Agri-eye)

図 1 に著者らが開発を進めている情報化農業支援システム (Agri-eye) の構成を示す。本システムは圃場環境モニタリング、作物生育診断・品質評価、農作業履歴収集・管理を行うサブシステムから構成されている。これらのサブシステムはいずれもインターネット経由で提供され、利用者は PC, スマートフォン, 携帯電話等のデバイスから利用できる仕様となっている。

2.1 圃場環境モニタリングシステム

図 2 に圃場環境モニタリングシステムの構成を示す。環境モニタリング装置は、ワンチップマイコン (Arduino Ethernet™), 環境モニタリングシールド, 補助センサー基板, 各種センサー等から構成される。本モニタリング装置は SD カードと RTC (リアルタイムクロック) の実装により、インターネット接続ができない場合でも環境計測が行えるようにした。今回の実証実験では、温湿度, 日射量, 二酸化炭素 (CO₂), 土壌温度, 土壌水分の各種センサーを用いて計測を行った。

図 3 に圃場環境モニタリングのフローチャートを示す。本モニタリング装置は、電源投入と同時に直ちに起動し、SD カードデバイス・ネットワーク設定の初期化, SD カードからの初期設定情報の読み込みが行われた後、現在の環境情報 (装置が正常運転できているかの確認が行える) をデータベースへ転送する仕様となっている。初期設定情報には、モニタリング装置 ID (モニタリング装置の識別に使用) 計測時間間隔 (通常は 5 分間隔) 等が記載されており、一部の情報はインターネット経由で変更することが可能となっている。また、ネットワークのトラブル等で一時的に計測データの転送が実施できない場合には、SD カード内にその間の計測データを保存し、ネットワーク接続の再開とともに、Agri-eye データベースへ自動転送されるように

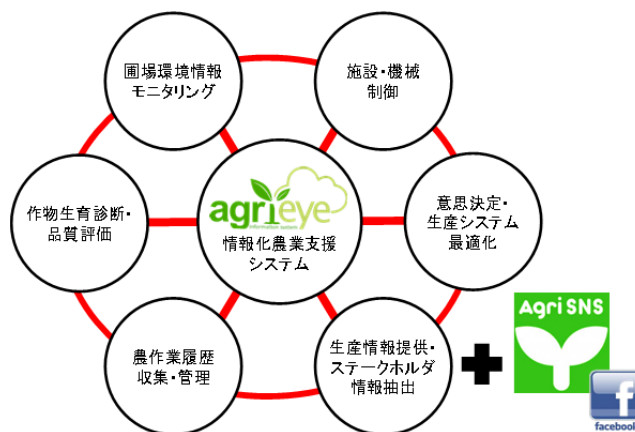
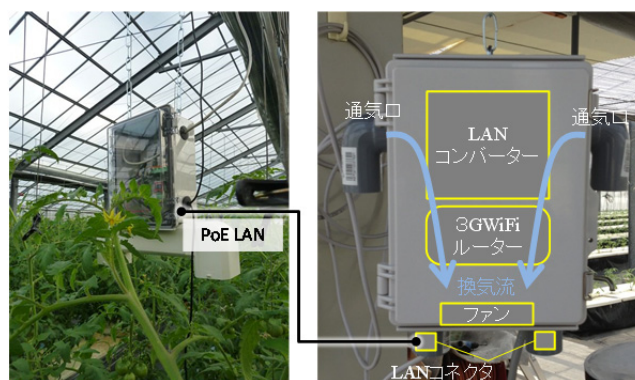


図 1 情報化農業支援システム (Agri-eye) の構成
Figure 1 Informatization agricultural supporting system



トマトハウスへの設置状況 通信装置の設置状況

図 2 圃場環境モニタリング装置と通信装置の設置状況
Figure 2 Field environmental monitoring device and the data transmitter

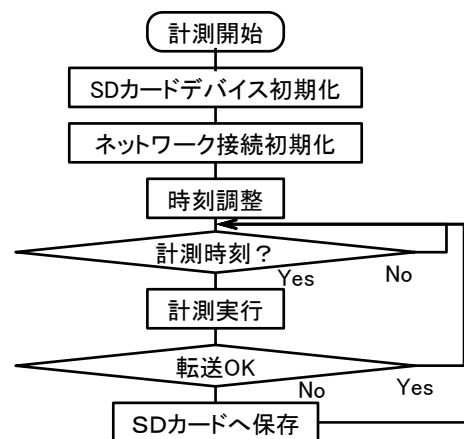


図 3 環境モニタリングのフローチャート
Figure 3 Flowchart of field environmental monitoring

した。一方、通信装置は LAN コンバーター, 3GWiFi ルーター, 送風ファンから構成され、モニタリング装置から逐次送信されてくる環境データを Agri-eye データベースサーバーへ転送する役割を担っている。

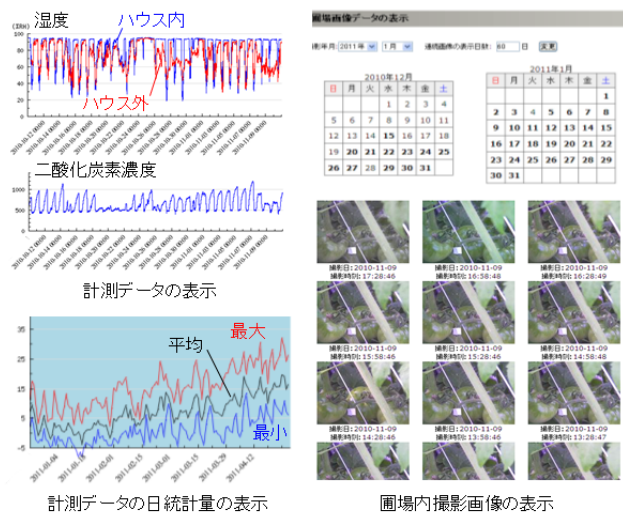


図 4 Agri-eye による圃場環境情報の表示例
Figure 4 An example of the demonstration of the field environmental data by using Agri-eye

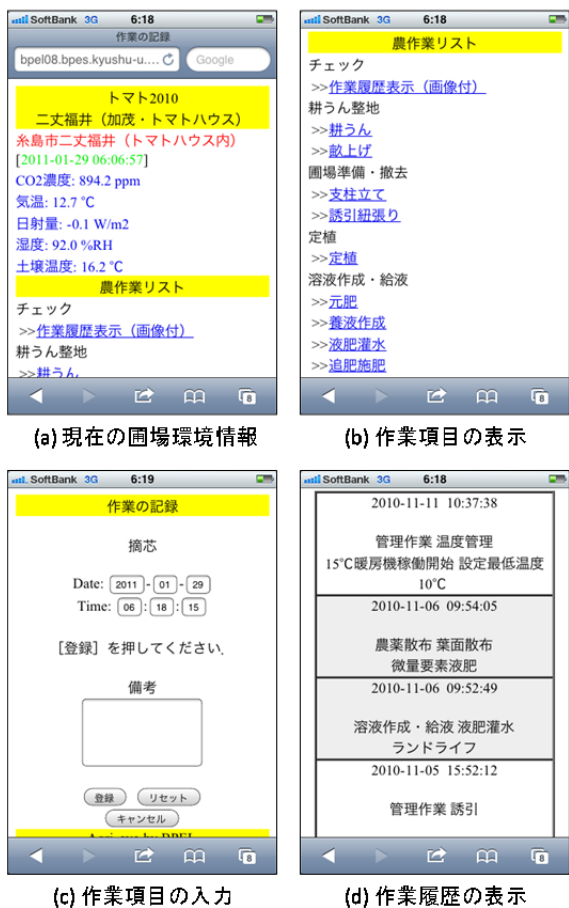


図 5 農作業情報入力画面表示例（ハウストマト）
Figure 5 An example of demonstration of the work history recording tool (greenhouse tomato)

図 4 に Agri-eye による圃場環境情報の表示例を示す。Agri-eye では、計測した圃場環境情報の最大値、最小値、平均値、積算値等を毎日定刻（午前 0 時）に算出し、日別



図 6 収穫予測・実績表示画面の例（ミズナ）
Figure 6 An example of yield predictions and results (Mizuna)

環境情報として別途保存している。また、圃場内に簡易 LAN カメラを設置することにより、圃場の様子を画像一覧、スライドショー等で表示する機能も有する。利用者は PC のみならず、スマートフォンや携帯電話などを用いて、これらの情報に簡単にアクセスできる。

2.2 農作業履歴収集・管理システム

図 5 は農作業履歴入力アプリの表示画面(iphone を使用)の遷移の一例を示す。本アプリは、2.1 で示した圃場環境情報の参照、農作業履歴の入力・参照、収穫予測・実績の参照等を行うことを目的とした Web アプリケーションで、PC、スマートフォン、携帯電話から利用可能である。農作業履歴の入力には、栽培作目情報、圃場情報、作業項目等を事前に設定（いつでも自由に追加・編集可能）しておく必要がある。これらはいずれも Agri-eye サーバー内の設定ツールを用いて、生産者自らが自由に作成・編集可能である。

図 6 は収量予測・実績（ミズナ）の表示画面の一例を示している。本アプリは、作物の播種日に過去 5 年間の栽培実績から算出した栽培日数を用いて収穫適期を予測できるようになっている。また、播種日に加えて収穫日も入力すると両者の差から実績（栽培日数）が計算・表示される。本結果からわかるように、5 年間の栽培実績から栽培日数を求めても、気象環境、市況等の外的要因により、実際の栽培日数は大きく変動している様子が確認される。このよ

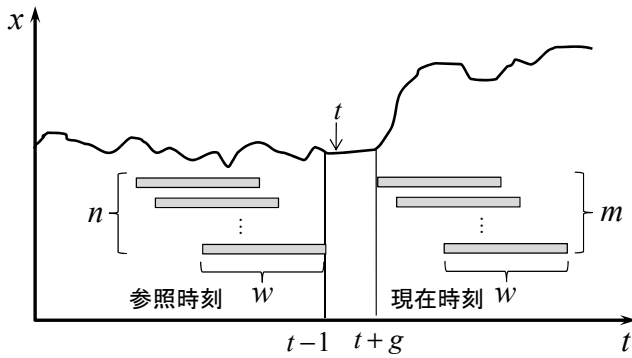


図 7 特異スペクトル変換に基づく変化点分析

Figure 7 Change point analysis based on the singular spectrum transformation

うに栽培日数の予測精度向上には、栽培期間中の気象環境情報を収集し、積算気温や積算日射量との比較照査を行う必要があるといえよう。

3. 変化点分析を用いた時系列環境情報の特徴量抽出とその利用

3.1 特異スペクトル変換に基づく変化点分析手法

ここでは、井出・井上[6]により提案された特異スペクトル変換 (Singular Spectrum Transformation) を用いて時系列環境データの変化度スコアの抽出を行う。いま、一連の時系列データに対して、次式で示される時系列ベクトル s を選択する (図 7 参照)。

$$s(t-1) = \{x(t-w), \dots, x(t-2), x(t-1)\}^T \quad (1)$$

ここに、 t は時刻、 x は時刻 t におけるデータ、 $(\bullet)^T$ は転置、 w は参照枠を示す。

参照時刻 $t-n$ におけるハンケル行列 \mathbf{H} (履歴行列と称する) を次式で与える。

$$\mathbf{H}(t-n) = [s(t-n), \dots, s(t-2), s(t-1)] \quad (2)$$

これを用いて次式の固有値方程式を得る。

$$\mathbf{H}(t-n)\mathbf{H}(t-n)^T \mathbf{u} = \lambda \mathbf{u} \quad (3)$$

ここに、 λ および \mathbf{u} は固有値および固有ベクトルをそれぞれ示す。次に、この固有ベクトルを固有値の大きいものから順に l 個取り出して作成した行列をパターン行列 \mathbf{U} として次式で表す。

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_l] \quad (4)$$

同様に、現在時刻 $t+g$ において、式(1)~(3)から求めた現在時刻におけるパターン行列 $\bar{\mathbf{U}}$ は次式で与えられる。

$$\bar{\mathbf{U}} = [\bar{\mathbf{u}}_1, \bar{\mathbf{u}}_2, \dots, \bar{\mathbf{u}}_l] \quad (5)$$

パターン行列 \mathbf{U} および $\bar{\mathbf{U}}$ は、参照および現在時刻の時系列

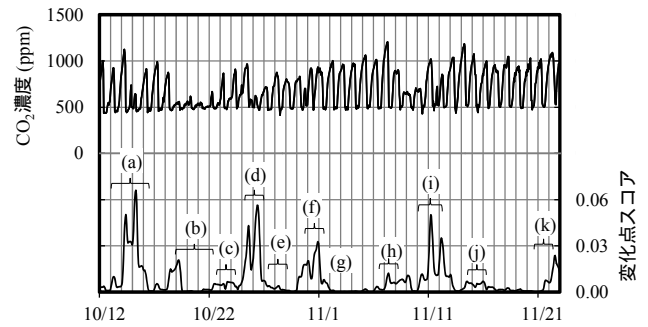


図 8 ハウス内 CO₂ 濃度変化の変化点分析結果 (トマト)

Figure 8 Change point analysis results for CO₂ concentration in greenhouse (tomato)

データの特徴量であり、これらの差異は両時刻間のパターンの変化量を表すと考えることができる。そこで、次式の変化度スコア z を定義する。

$$z(t) \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^l \mathbf{u}_i \bar{\mathbf{u}}_i^T}{l} \quad (6)$$

ここに、本式は両時刻のパターン行列が完全に一致する場合 $z(t) = 0$ 、また、両時刻間が完全に異なる場合 $z(t) = 1$ を満たす。以下では、上記アルゴリズムを用いて、環境データに対する変化点分析を行う。

3.2 圃場環境データの特徴量抽出[11]

農用ハウス内の環境変化は、大気の状態、作物の生理反応、機械の故障や人為的ミスによる装置の誤動作、農作業の実施等によって非周期的な変動を示す。このような一連の時系列データから非周期的な特徴量のみを自動抽出することにより、環境制御の安定性評価、機械の動作状態の把握、農作業履歴の入力補助 (環境情報に大きな変化が生じた場合に生産者へ農作業実施の有無を確認する機能) 等、様々な応用が可能になると思われる。3.1 で述べた分析手法を適用して、農用ハウス内の CO₂ 濃度の変動に関する特徴量の抽出とその要因を調べた。

図 8 にトマト栽培ハウス内の CO₂ 濃度の時系列データおよびその変化点分析結果を示す。CO₂ 濃度データは、圃場環境モニタリング装置により、5 分毎に計測された CO₂ 濃度を 1 時間毎に平均化処理して作成した。変化点分析に必要なパラメータ w および g は、図 9 のように CO₂ 濃度に対する FFT 解析を行い、24 時間およびその整数倍周期の明瞭な周波数特性を有することが認められたため、24 (24 時間) とし、列ベクトルの参照個数 n および m は 5 とした。なお、ここでは、より明確な特徴量の抽出を行うことを目的に、最大固有値に対する固有ベクトルのみを抽出対象とするものとし、 $l=1$ を選択した。

図 8 から、ハウス内の CO₂ 濃度は日中の光合成と夜間の

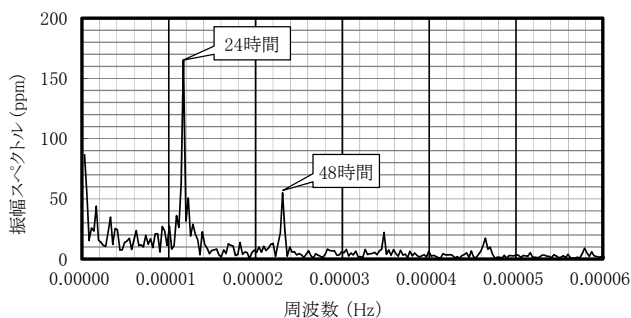


図 9 ハウス内 CO₂ 濃度変化の FFT 解析の結果

Figure 9 FFT analysis CO₂ concentration in greenhouse (tomato)

呼吸により周期的な変動が認められる一方、その振幅や変動パターンは一定ではなく差異があることがわかる。この点は、CO₂ 濃度に対する変化点スコアの高い部分が複数検出されている点からも判断できる。そこで同期間中に入力された農作業履歴(表 1)と変化点スコアの高い部分との相関を調べ、変化点の発生要因について検討を行った。つまり、変化点スコアの比較的高い部分(図 8 中の点(a)~(k))と農作業履歴(抽出された変化点と対応する農作業履歴に(a)~(k)の記号を付した)の比較を行った。変化点スコアの大きい(a),(d)および(i)は、(i)を除き、その直近の農作業として、液肥の葉面散布、摘葉、摘芯等が行われていることがわかった。特に、摘葉が行われた場合には CO₂ 濃度が大きく低下しており、作物の呼吸特性に変化が生じたことが示唆された。一方、(i)については農作業履歴として暖房開始の記載しか無く、CO₂ 濃度の変化が何に起因して生じたのかを把握することはできなかった。変化点スコアの値が次に大きい(b),(f)および(k)についても調べてみると、(b)はハウス窓開閉装置の電源断による窓の閉忘れ(人為的ミス)、(f)は液肥灌水と液肥の葉面散布、(k)は農作業履歴の記載なしとなっていた。施設の管理状態の違いはハウス内環境の変化として現出するので、変化点スコアを用いれば装置の稼動状態をある程度把握できると思われる。これに対して、(k)は農作業履歴の記載が全く無いことから、変化点スコアが高くなった理由を調査できなかった。その他にも、農作業履歴がある場合でも変化点検出されていない部分(e)もあり、CO₂ 濃度の変化のみで農作業の有無や内容を判別できるわけではないこともわかった。農作業履歴の記載が無いにも関わらず変化点スコアが大きかった部分に関しては、生産者に直ちに変化点情報を通知し、農作業実施の有無の確認を行い、変化点情報の確度向上を行って行く必要があると思われた。

4. おわりに

本稿では、農業における SNS の活用について紹介させて

表 1 ハウス内作業履歴(トマト)

Table 1 Work history records (tomato)

日付	作業内容	備考 ^{注)}
2010/10/13	葉面散布・摘芯	(a)
2010/10/14	摘芯	(a)
2010/10/15	設定温度変更(20)	(a)
2010/10/16	葉面散布・液肥灌水	(a)
2010/10/19	窓開閉装置電源断	(b)
2010/10/20	摘葉(一段果以下)	(b)のため検出
2010/10/21	摘葉(一段果以下)	(b)のため検出
2010/10/22	葉面散布・誘引	(c)
2010/10/23	液肥灌水・摘芯	(c)
2010/10/25	摘葉	(d)
2010/10/26	摘葉・摘芯・追肥	(d)
2010/10/27	液肥灌水	(e)
2010/10/28	葉面散布・摘芯	(e)
2010/10/29	液肥灌水	(f)
2010/10/31	葉面散布	(f)
2010/11/02	収穫開始・摘芯	(g)
2010/11/03	液肥灌水	(g)
2010/11/06	葉面散布	(h)
2010/11/11	暖房開始(設定最低温度)	(i)
2010/11/15	農作業履歴の記載なし	(j)
2010/11/22	農作業履歴の記載なし	(k)

注) アルファベットは図 8 中の記号と対応させている。

いただいた。この動きは今後も拡大していくことが予想されており、我が国の農業の発展に寄与し得る様々な研究開発が進められていくものと考えられる。

謝辞 本研究は、平成 24 年度成長産業・企業立地促進等事業費補助金(成長産業人材養成等支援事業)および平成 25 年度科学研究費補助金・基盤研究 B「オープン CPU 基板を用いた低コスト自律分散型施設環境計測制御情報システムの構築」の支援により実施したものである。実証実験に際しては、福岡県内の複数の生産者の皆様に種々ご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Hirafuji, H.: Creating Comfortable, Amazing, Exciting and Diverse Lives with CYFARS (CYber FARmerS) and Agricultural Virtual Corporation, Proc. of the Second Asian Conf. Info. Technol. Agric., 424-431 (2000).
- 2) Fukatsu, T. and Hirafuji, H.: Field Monitoring Using Sensor-Nodes with a Web Server, J. Robotics Mech. 17(2), 164-172 (2005).
- 3) Jiang, J.A., Tseng, C.-L. Lu, F.-M., Yang, E.-C., Wu, Z.-S., Chena, C.-P., Lin, S.-H., Lin K.-C. and Liao, C.-S.: A GSM-based Remote Wireless Automatic Monitoring System for Field Information: A Case

Study for Ecological Monitoring of the Oriental Fruit Fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Comp. Elect. Agric.*, 62, 243-259 (2008).

4) Pawlowski, A. J., Guzman, L., Rodríguez, F., Berenguel, M., Sánchez, J. and Dormido, S.: Simulation of Greenhouse Climate Monitoring and Control with Wireless Sensor Network and Event-based Control, *Sensors*, 9, 232-252 (2009).

5) Okayasu, T., Yamabe, N., Marui, A., Miyazaki, T., Mitsuoka, M. and Inoue, E., Development of field monitoring and work recording system in agriculture”, *Proc. 5th Int. Symp. Mach. Mech. Agr. Biosys. Engng.*, CD-ROM (2010).

6) 井手剛, 井上恵介: 非線形変換を利用した時系列データからの知識発見, 第4回データマイニングワークショップ論文集, 1-8 (2004).

7) 森田康介, 鈴村豊太郎: データストリーム処理を用いた変化点検知アルゴリズム SST の GPU による性能最適化, 電子情報通信

学会技術研究報告・データ工学, 110(107), 19-24 (2010).

8) 井上恵介, 井手剛: 変化点関連度を利用した動的システムの障害解析, 情報処理学会研究報告・数理モデル化と問題解決研究報告, 17-20 (2004).

9) Itoh, N. and Kurths, J.: Change-Point Detection of Climate Time Series by Nonparametric Method, *Proc. World Cong. Engng. Comp. Sci.* 1:ISSN2078-0966 (2010).

10) 徳永寿慧, 金田さやか, 中西弘明, 榎木哲夫: 特異スペクトル変換による動作変化点列を用いた動作解析法, *知能と情報* 24(1), 526-535 (2012).

11) 岡安崇史, Andri P. N., 尾崎彰則, 光岡宗司, 南石晃明, 井上英二, 平井康丸: 変化点分析法を用いた圃場環境情報の特徴量抽出とその妥当性の検証, *農業情報研究*, 22(3), 174-182 (2013).