

観測データの空間補間を利用した 施設園芸環境の可視化・制御システムの提案

松野智明^{†1} 串岡 聡^{†2} 今原 淳 吾^{†3}
福田 宗弘^{†4} 水野 忠 則^{†5} 峰野 博 史^{†1}

本論文では, 農業技術の形式知化を行うためのスケーラブルセンサネットワークシステムを提案し, 施設園芸環境で行ったプロトタイプ開発について報告する. 提案システムではマルチベンダによるセンサネットワークを用い, 様々な環境データを収集して可視化を行う. 得られたデータはアクチュエータネットワークによるフィードバック制御とデータマイニングによるデータ解析に活かされる. プロトタイプでは, 施設園芸へセンサネットワークとアクチュエータネットワークを導入し, フィードバック制御システムと観測データの空間補間を利用した可視化システムを構築した.

Development of Agri-Environmental Visualization and Control System using Spatial Interpolation

TOMOAKI MATSUNO,^{†1} KUSHIOKA SATOSHI,^{†2}
JUNGO IMAHARA,^{†3} MUNEHIRO FUKUDA,^{†4}
TADANORI MIZUNO^{†5} and HIROSHI MINENO ^{†1}

In this paper, we propose the scalable sensor network system for visualizing agricultural knowledge, and report the prototype development in the greenhouse. Proposed system visualizes by collecting various environmental data using the multi-vender sensor networks. The obtained data is harnessed in the data mining and actuator network for feedback control. As a prototype, we developed agri-environmental visualization and control system using spatial interpolation.

1. はじめに

現在の日本農業において, 農業従事者の高齢化と後継者不足を原因とする, 農業技術の伝承の困難化が問題となっている¹⁾. 日本の農業従事者のうち若年層の割合は年々減少しており²⁾, 世界的に見ても高いレベルにある日本の農業技術が失われることが懸念されている³⁾.

近年, この課題を解決するための取り組みとして情報技術による農業支援が研究されている⁴⁾. これは農業技術の形式知化を行ってこれまでのノウハウなどをマニュアル化することで, 農業従事者や新しく農業を始める人の支援を目的としている.

形式知化の取り組みは, 次の3つの段階を踏むことで実現できる. 第一にセンサネットワークを導入し, 生育変化・環境変化, エネルギー消費の変遷を可視化する. 第二にアクチュエータネットワークを導入し, 達成可能な環境制御をセンサネットワークにより認識する. 第三にデータマイニングを導入し, 生育状態の把握を行い, アクチュエータネットワークによる生育状態に合わせた環境制御によって, 計画生産や省エネを実現できるか検証する.

これまでに情報技術を活用した遠隔管理システムや自律分散制御システムが開発されつつあるが, 形式知化を行うための多数のノード設置や高頻度なデータ収集, 制御の拡張性までを備えているとは言えない. そのため, 生育過程に影響を与えると考えられる多種多様なデータの必要な解像度の解明や, それら因果関係を精密に分析し制御へ反映して検証することができない.

そこで本稿では, 形式知化に必要なスケーラブルセンサネットワークシステムを提案する. そして, 施設園芸へセンサネットワークとアクチュエータネットワークを導入し, フィードバック制御システムと観測データの空間補間を利用した可視化システムを構築したので報告する.

^{†1} 静岡大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Shizuoka University

^{†2} 静岡大学情報学部
Faculty of Informatics, Shizuoka University

^{†3} 静岡県農林技術研究所
Shizuoka Prefectural Research Institute of Agriculture and Forestry

^{†4} ワシントン大学ボセル校
University of Washington, Bothell

^{†5} 愛知工業大学情報科学部
Faculty of Information Science, Aichi Institute of Technology

2. 関連研究

情報学を用いた農業への取り組みは基本的に生産性の向上を目標としてきた。代表的な例として植物工場が挙げられる⁵⁾。植物工場とは主に閉鎖的な空間内において、植物を計画的に生産するシステムである。作物の栽培に影響があると考えられる農地の情報を人工的に管理し、農作業をマニュアル化することで作物栽培における各要素の一定化を目指している。屋内で栽培を行うレタスなどに関しては、既にモデル化が可能になっており、生産も行われている⁶⁾。しかし、屋外では太陽光などのパラメータが増えるためモデル化が困難になっているのが現状である。

屋外の圃場を対象にした研究にフィールドサーバ⁷⁾がある。フィールドサーバは、カメラとセンサと通信装置を一体にした、屋外用の簡易計測機器システムである。フィールドサーバがあれば、他に大掛かりな装置を必要とせずに農園管理や環境モニタリング等の、センサネットワークを構築できる。フィールドサーバは普及が期待されたが、圃場のモデル化に数年掛かり、圃場のモデルはデータを取得した圃場でしか利用できないレベルであった。このような理由により、一般にはあまり普及したとは言い難い状況である。

前章で述べた農業技術の伝承という観点からの取り組みが AI 農業⁸⁾である。AI 農業では多数の熟練農家の判断処理を集積したデータ群から確からしい判断処理のアウトプットを求める。農業従事者は作物栽培に関係する各種の環境情報を入力することにより、次に行うべき農作業のリストを得ることができ、新規就農者にも比較的安定した農場運営が可能となる。AI 農業の展開に関しては農林水産省が中心のプロジェクトが進行中であり、内閣府の知的財産推進計画 2010⁹⁾にも詳細施策として取り上げられている。

海外では大規模な農場でセンサネットワークを用いたモニタリングを行うシステムが数多く検討されている¹⁰⁾¹¹⁾。中でも、UMAC-model¹²⁾では測定対象が大規模であることに加え、多くの人間が参加する農業に関する農業に関するコミュニティを作るといった特徴を持っている。多数の農家や技術者が協力しあうことでより良い精密農業の技法を生み出している。

3. スケーラブルセンサネットワークシステム

3.1 要求分析

本論の目的は、農業技術の形式知化に必要なスケーラブルセンサネットワークシステムの提案である。植物の成長は温度・湿度・土壌成分などあらゆるものに相関性があると考えられ、取得データの有意性について検証が必要という課題がある。そのため、農業技術者との

ディスカッションを重ね、システムを変化、拡張していかなければならない。つまり、形式知化を行うためのシステムは、多数のノード設置や高頻度なデータ収集による多種多様な環境データの取得、制御の拡張性までを備える必要がある。また、農業従事者にも理解できるデータ表示部が必要になる。

以上のような観点から、農業環境の見える化システムには以下の技術要件を満足する必要がある。

- (1) 高い拡張性
より高精度なセンサへの変更、新たなセンサの追加、制御システムとの連携など形式知化のためにシステムの拡張ができなければならない。また、既存システムが存在した場合、自分が設計を行っていないとしても、有益であれば無駄にしないための工夫が必要である。
- (2) 視覚的な見える化
農業専門家とのディスカッションにより、収集データの初期段階における有意性判断や、データマイニングによるデータ解析結果の検証をするまた、データ収集を実施を行うに至っての農業専門家のメリットとしても、視覚的なデータ表示部が必要である。
- (3) 異常データ修正
センサの故障や無線通信の減衰によって取得データに異常値の検出や欠落といった問題が発生されることが想定される。そのため、このような事態に陥った場合に修正を行ったり、データの切り捨てを行う仕組みが必要である。

3.2 提案システム

そこで、マルチベンダなセンサネットワークを利用したスケーラブルセンサネットワークシステムを考案した。その構成を図 1 に示す。

センサネットワークの種類に関わらず、同じ DBMS へデータを格納することで、センサネットワーク毎の差異を無視して統一的な管理が行えるようになっている。また、データの格納プログラムは入力モジュールだけ追加すればセンサネットワークの追加に対応可能である。これにより、センサの追加・変更や既存システムとの連携が実現できる。

出力に関しては、取得データによる出力先変更やシステムの変更等への対応のため、それぞれの別の出力モジュールへの分岐を可能にしている。また、出力先の設定ファイルを一定時間毎に読み込むことにより、システムを停止することなく動作変更を実現する。これにより、制御システムへの誤動作などが発生しても、すぐに停止を行うことができる。

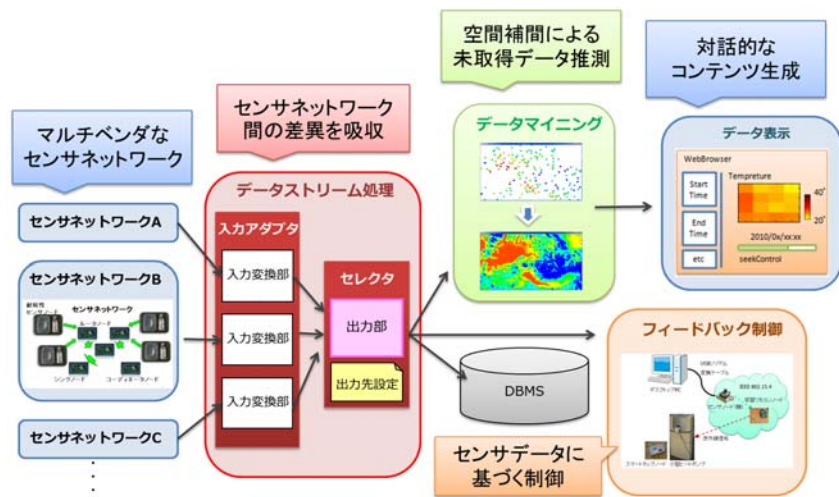


図 1 スケーラブルセンサネットワークシステム概要図

DBMS へ格納されたデータは、異常データの排除やデータ抜けの補間などのアップデートが行われ、データ表示部で閲覧が可能になる。そのコンテンツは、Web ブラウザを利用することにより、特別な環境を用意することなく扱うことができる。コンテンツとしては、センサを個別に見える化するグラフ化と、センサをまとめて見える化する動画化である。その場でコンテンツを生成することにより、パラメータを与えて対話的なデータ閲覧を可能にする。

要求分析との対応は以下のようになり、提案システムは要求を満たしていると考えられる。

- (1) 入力アダプタと出力先の変更，追加により複数のセンサネットワークやアクチュエータネットワークを統一的に扱うことで実現する。既存システムもセンサネットワークやアクチュエータネットワークの一つとして，システムの中に取り込める。
- (2) グラフや動画といった視覚的な Web インターフェースを作成することにより実現する。
- (3) 異常値の切り捨てと補間技術による未取得データの推測により実現する。

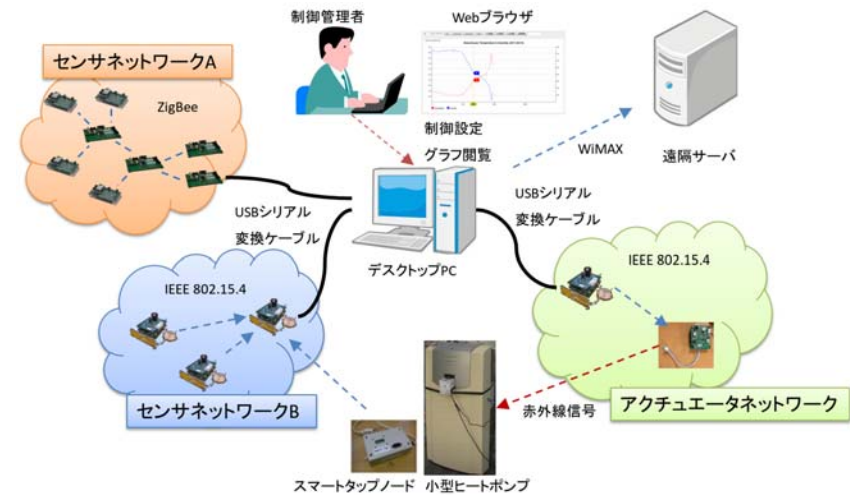


図 2 プロトタイプシステム構成図

4. プロトタイプ開発

4.1 システムの構成

システムの構成図を図 2 に示す。今回は、提案システムのプロトタイプとして、植物の成長にとって最も重要なパラメータの 1 つである温湿度データに着目し、施設園芸を行っているガラスハウスの中にフィードバック制御システムと観測データの空間補間を利用した可視化システムを構築することを目的とした。

センサネットワーク A のセンサノードは温湿度センサを搭載している他、ネットワークにルーティング機能があるため、広い範囲の温湿度データを収集するのに優れている¹³⁾。

センサネットワーク B は省電力で動作するため、高頻度でのデータ収集に優れている。センサネットワーク B を構成する物理的なデバイスは、農業環境センサノードおよびスマートタップノードの 2 種類である。各センサノードは、太陽光などから保護するためにラジエーションシールドの中に入れ使用する。表 1、表 2 に、それぞれ農業環境センサノードおよびスマートタップノードの仕様をまとめる。

アクチュエータネットワークは、学習リモコンノードにより赤外線信号を発光し、機器を制御する。

表 1 農業環境センサノード仕様

項目	仕様
温度センサ	LM20 (NS)
温湿度センサ	SHT21 (センシリオン)
電池	リチウム電池 CR-2 電池ホルダ外付け
基板寸法	40 × 45mm
電源	DC2.7V ~ 3.3V 電池駆動対応 (CR2)
動作環境	動作温度 -10 °C ~ +55 °C 湿度 0 ~ 95% 防湿加工 保存温度 -20 °C ~ +60 °C

表 2 スマートタップノード仕様

項目	仕様
電力測定部	ADE7753 (アナデバ) 入力電圧: AC100V 測定レンジ: 有効電力 0 ~ 3 KW 無効電力 0 ~ 3 KVar 皮相電力 0 ~ 3 KVA 力率 0 ~ 100% 消費電力 0 ~ 30% 測定精度: ± 2% 測定精度: ± 1%
電力制御部	ソリッドステートリレー 1 系統 AQA611VL 松下 40A AC100V 対応
電力センサ	CT センサ CTL-10-CLS (80Amax) U-RD
基板寸法	55 × 110mm
電源	AC100V 内部 3.3V/5V
動作環境	動作温度 0 °C ~ +55 °C 湿度 0 ~ 95% 結露なきこと 保存温度 -20 °C ~ +60 °C



図 3 開発したセンサノード等

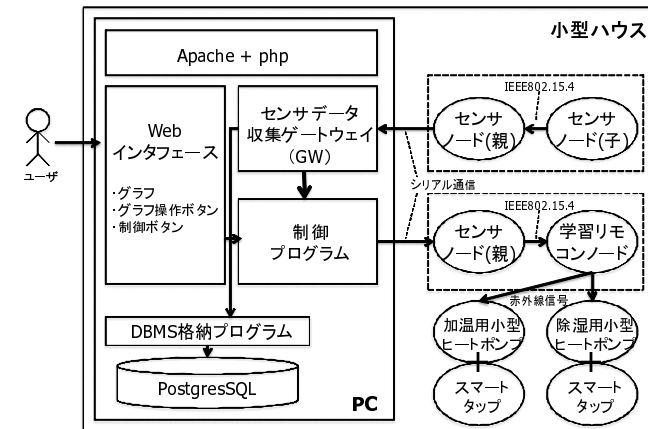


図 4 プロトタイプの制御部

また、図 3 に農業環境センサノード、スマートタップノード、学習リモコンノードおよびラジエーションシールドの外観を示す。

PC はセンサネットワークから送信されたデータを受信し、制御信号出力やデータベースへの格納処理をする。データベースは PC と、遠隔サーバの 2 つある。

以降、制御部と表示部の具体的な実装について述べていく。

4.2 制御部

制御部を図 4 に示す。ガラスハウス内に設置したセンサノードから送られてきたセンサデータや制御したい値をもとに、条件に合った場合は学習リモコンノードへ小型ヒートポン

プのスイッチを ON/OFF する命令を送信し、温度や湿度の制御を行うことになる。ユーザは Web ブラウザ上で制御したい値を設定するだけで、設定した値に温度や湿度を一定に保つよう自動制御を行うことが可能となる。

スマートタップノードは接続された家電などの消費電力を 1 秒ごとに測定する機器であり、小型ヒートポンプの消費電力データを収集することで電源が ON であるか OFF であるかを判断することができる。これは、学習リモコンノードが赤外線信号を発光するため、

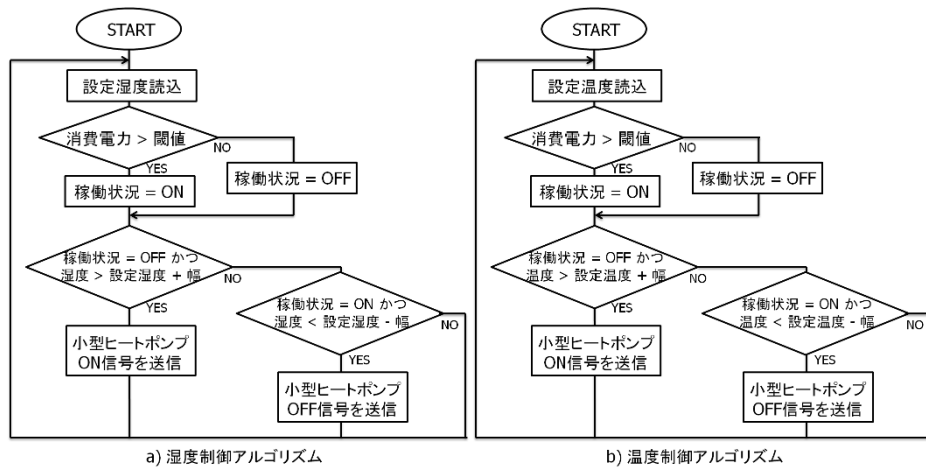


図 5 制御アルゴリズム

うまく小型ヒートポンプが信号を受信しているかどうかをチェックするために使用する。そのため、小型ヒートポンプ以外にも赤外線リモコンで制御できる家庭用機器も流用できるので低コストで制御システムを構築できる。

湿度制御アルゴリズムと温度制御アルゴリズムを図に示す。夜間において温度が低下し、湿度は上昇するという傾向があるため、今回は温度の上昇と湿度の抑制を想定している。温度の場合は低温度、中温度、高温度の3段階のレベルで農作物への影響を分析できるように、農業の専門家と話し合った結果15度・18度・22度の3段階の固定したレベルで温度を制御するアルゴリズムを検討した。湿度の場合は低湿度、中湿度、高湿度の3段階のレベルで農作物への影響を分析できるように、60%・80%湿度制御、湿度制御どちらの場合でも、まずは設定された温度、湿度の読み込みを行う。次に、スマートタップの消費電力の値から小型ヒートポンプの電源がONであるかOFFであるかを判断する。稼働状況を判断するためには閾値を設定しておく必要があるが、今回は20Wに設定した。これは小型ヒートポンプの待機電力や稼働時の消費電力を基に決定した。制御する機器によって、電源のON/OFFの判断をするために適切な閾値を設定する必要がある。これによって小型ヒートポンプの稼働状況がONであるかOFFであるかを設定する。また、制御を行う際には設定された温度や湿度に幅を持たせており、今回は温度の場合±0.5度、湿度の場合±3%の幅を持たせて制御を行うようにしている。

4.3 表示部

取得したセンサデータはPCを介して遠隔サーバに格納され、ユーザはWebブラウザを使いこのデータにアクセスを行う。

Webサーバ(Apache + PHP)は、ユーザのリクエストに応じて、ユーザ画面を呼び出し、その出力をレスポンスとして返す。ユーザ画面は、DBにアクセスして画面出力に必要な情報を取得し、ユーザ画面におけるグラフ画面と動画画面を表示する。

グラフ化は個々のセンサデータの見える化を実現する。時間に対するデータの遷移が一目瞭然であり、センサデータの比較などといった用途に向いている。実現には、Flashでグラフを生成できるグラフエンジンamChartsを利用する。DBMSへの負荷軽減のため、入力データの粒度は入力パラメータで設定し、使用するデータの間引きを行う。

動画化は複数のセンサデータの見える化を実現する。空間的なデータの遷移が一目瞭然であり、高解像度センシングへの用途に向いている。実現には、連続静止画から動画を生成できる動画エンジンFFmpegを利用する。実装としては、時間毎に空間補間を適用した温室度の分布図を作成しておき、必要に応じて画像を繋ぎ合わせ動画にする。

空間補間には式1, 2で表わされる逆距離荷重法(IDW: Inverse Distance Weighting)を利用した²⁾。

$$u(x) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i(x)u(x_i)}{\sum_{j=1}^N w_j(x)} \quad (1)$$

$$w_i(x) = \frac{1}{d(x, x_i)^p} \quad (2)$$

ここで、 $u(x)$ は各セルの値、 $u(x_i)$ はi番目のセンサデータの値、 $d(x, x_i)$ はセンサーからこのセルへのユークリッド距離、 p は一般的な2とした。

5. 実験と考察

5.1 実験概要

環境構築は環境構築は静岡県磐田市にある静岡県農林技術研究所のメロン栽培用ガラスハウス内で実施した。フィードバック制御システムの実験は図6で示す小型ハウスにて、観測データの空間補間を利用した可視化システムの実験は図7に示す大型ハウスにて行った。以降、別々の実験として結果と考察を述べていく。



図 6 小型ハウス



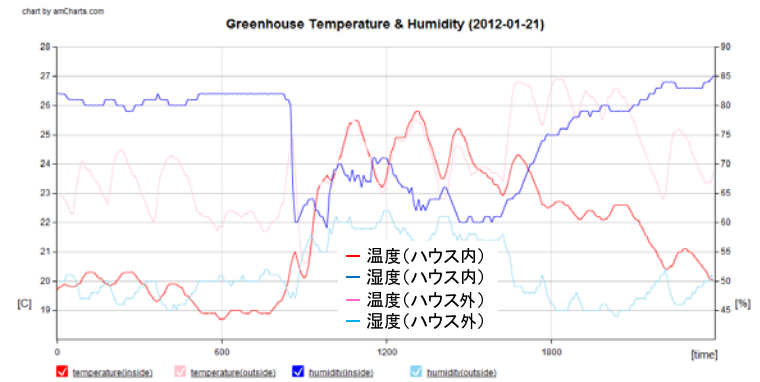
図 7 大型ハウス

5.2 フィードバック制御システム

小型ハウスにおいてメロンを栽培している状態で、温湿度制御を行った場合の実験結果を検証する。

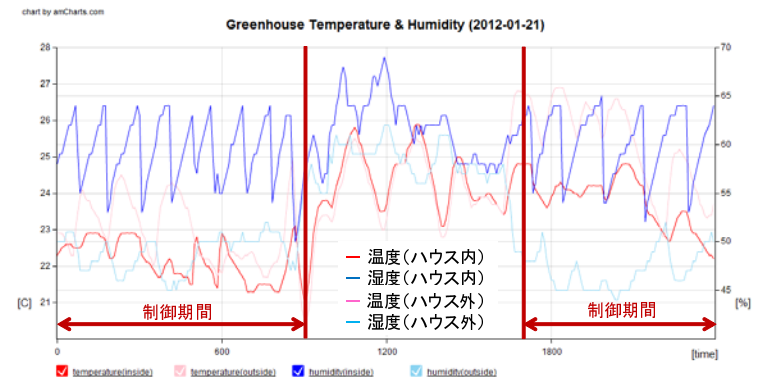
湿度 60% 温度 22 度 ~ 24 度に制御した小型ハウスの結果を図 9 に、制御を行わなかった小型ハウスの結果を図 8 に示す。制御を行っていない場合のデータを見ると湿度が約 80% まで上昇し続けたのに対し、60% で制御を行った方では場合によっては 60% ± 5 気温も制御の効果があったが、22 度 ~ 24 度の幅に収まらない時間が長かった。

制御に関して幅ができてしまっていたことは、ON と OFF の切り替えのみの制御方法であったことや、幅を持たせて制御を行っていたためだと考えられる。つまり今回は 60% に制御設定を行い、湿度が 63% 以上になると電源が ON になり、57% 以下になると電源が OFF になる制御であったので、一定にならずに幅ができてしまった。



2012年1月21日分の温度・湿度データ(制御なしの場合)

図 8 温度・湿度制御を行わなかったセンサーデータ



2012年1月21日分の温度・湿度データ(60%制御の場合)

図 9 温度・湿度制御を行ったセンサーデータ

また、データ収集の周期は 1 分であるため、その間小型ヒートポンプが作動し続けて約 5% 湿度が抑制されることが分かった。つまり、約 1% 湿度を減少させるには 12 秒小型ヒートポンプを作動させる必要があり、12 秒の周期でデータ収集と制御を行うことができれば複雑な制御を行わなくとも ± 0.5% の幅に抑えることができると考える。

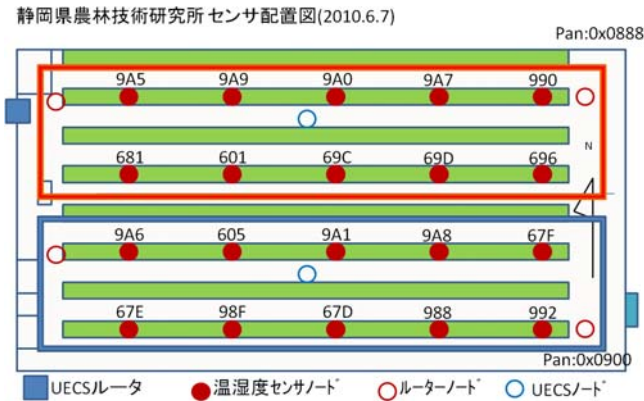


図 10 センサー配置

5.3 観測データの空間補間を利用した可視化システム

図 10 に示すセンサ配置で、12.8m × 16m のハウスに 4 列 × 5 列 = 20 個のセンサーを設置した実験結果を検証する。

図 11 に、例として 3 日分のデータを指定して、表示させた表示部を示す。動画はハウスの中の温度分布を表示し、グラフはあるセンサー 3 日分のデータを示している。動画とグラフの時間はほぼ同じ縮尺で、比較することができる。

この図を見れば、同じガラスハウス内でも南の方が最大で 3 度ほど温度が高いことが容易に分かる。このようなハウスの温度ムラは晴れの日中に大きくなる傾向にあった。この微妙な差がハウス内のメロンの出来に影響するものだと考える。

また、実際には無線通信の失敗によるデータ抜けがあったが、目立たない範囲で補間ができていた。ただし、補間の正確性はセンサーの数を一時的に増やすなどして、定量的に評価する必要がある。例えば、許容される誤差でのセンサの最小数といったものである。

6. まとめと今後の展望

本稿では、農業技術の形式知化を行うためのスケーラブルセンサネットワークシステムを提案し、施設園芸環境で行ったプロトタイプ開発について報告した。提案システムではマルチベンダによるセンサネットワークを用い、様々な環境データを収集して可視化を行う。得られたデータはアクチュエータネットワークによるフィードバック制御とデータマイニング

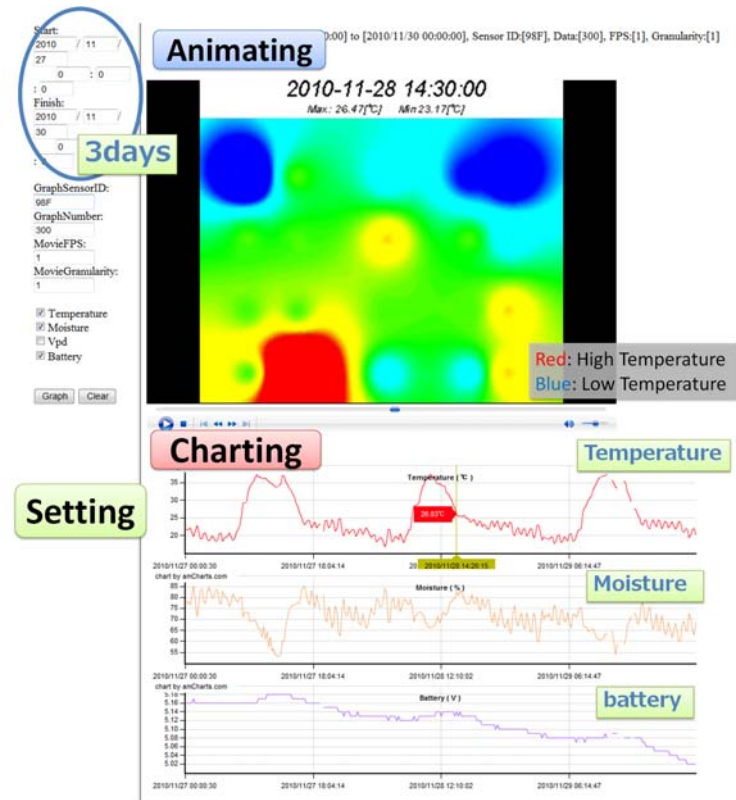


図 11 表示例

によるデータ解析に活かされる。プロトタイプでは、温湿度データに着目し、施設園芸へセンサネットワークとアクチュエータネットワークを導入し、フィードバック制御システムと観測データの空間補間を利用した可視化システムを構築した。

今後はプロトタイプで別々の実験を行った制御システムと可視化システムを同時に使用し、大型ハウスでの制御実験を行う予定である。また、個々のシステムにおいても、環境制御と作物の生育の因果関係の分析や、時間軸での補間を行う可視化システムの拡張などを進めていく。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費若手研究費若手研究 A (21680007) および挑戦的萌芽研究 (22650012) の助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Hiroshi MINENO et al, "Development of a Wireless Sensor Network for Visualizing Agricultural Knowledge" in *Intelligent Decision Technologies*, pp.277-284, 2010.
- 2) 農林水産省, 農業構造動態調査報告書, 2009
- 3) 農林水産省, 農業・農村の潜在力を活かした新たな挑戦
- 4) 神成淳司, "特集 新しい 情報学 1. 農業情報学" in 会誌「情報処理」 Vol.51 No.6, pp.635-641, 2010.
- 5) 高辻 正基, 完全制御型植物工場, オーム社出版部, in 会誌「情報処理」 Vol.51 No.6, pp.635-641, 2010.
- 6) 農林水産省, 国内で稼働中の植物工場一覧, 2009
http://www.aff.go.jp/j/seisan/ryutu/plant_factory/pdf/list.pdf
- 7) 平藤雅之: フィールドサーバ 畑を計測し見張る, 農林水産省委託 IT 研究プロジェクト「データベース・モデル協調システムの開発」成果発表会 (2005).
- 8) 農林水産省, 農業分野における情報科学の活用等に係る研究会報告書, A I 農業の展開について, 2009.
- 9) 農林水産省, 知的財産推進計画 2 0 1 0 骨子, 2010
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/titeki2/2010kossi.pdf>
- 10) A. Matese et al, "A wireless sensor network for precision viticulture: The NAV system" in *Computers and Electronics in Agriculture Volume 69*, pp.51-58, 2009.
- 11) F.J. Pierce and T.V. Elliott, "Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington" in *Computers and Electronics in Agriculture Volume 61*, pp.32-43, 2008.
- 12) Santhosh K. Seelan et al, "Remote sensing applications for precision agriculture" in *Remote Sensing of Environment 88*, pp.157-169, 2003.
- 13) Tomoaki Matsuno et al, "Evaluation of a System for Visualizing Agro-Environmental Knowledge" in *KES2011*, LNAI 6883, springer, pp.106-115, 2011.
- 14) Collins, F.C. and P.V. Bolstadl, "A comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation" in *Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, 1996, CD-ROM.