

センサネットワークによるビニールハウス環境センシング

須山 敬之¹ 納谷 太¹ 柳沢 豊¹

概要：

近年，センサネットワーク技術の発達により，実環境でセンサネットワークが用いられる実例が増えていく。本論文ではセンサネットワークを農業の現場に長期に渡り設置することで栽培環境の測定を行った結果を報告する。まず我々が開発したセンサノードを花卉を栽培しているビニールハウス内に多数設置し，温度，湿度など栽培環境の情報を集めることで，ビニールハウス内の状況を把握する。その結果と作柄と比較することにより，どのような環境が作柄に影響するかを知ることができる。ここでは人手の比較による考察とクラスタリングによって得られた結果を述べる。

Environment Sensing in a Plastic Greenhouse by Sensor Networks

TAKAYUKI SUYAMA¹ FUTOSHI NAYA¹ YUTAKA YANAGISAWA¹

1. はじめに

近年，センサ技術及びセンサネットワーク技術の発展に伴い，多種多様かつ数多くのセンサが利用され，それらがセンサネットワークによって接続されることにより，実世界の情報を容易に得ることができるようになってきている。また半導体技術の進化に伴い，小さな無線センサノードにも単純に状況をセンシングしデータを送信するだけでなく，マイコンを搭載し演算処理を行うことが可能となってきた。このような機能を備えたセンサノードを多数環境中に配置することで環境情報を継続的に取得でき，その情報に基づき，環境の制御などを行うことができるようになる。

そのようなセンサノードの研究はこれまでも行われている。代表的な研究として，MOTE [1] や Smart-Its [2]，U-cube [3] などがあげられる。我々は独自のセンサノードを開発し，センサネットワークの研究開発を行っている。センサノードは各種センサに加えて CPU，メモリなどの演算機能，無線による通信機能を備えており，センサによる計測値に対して演算による処理を行った結果を無線で転送することができる。また通常はバッテリーにより駆動することを想定している。

また我々は無線センサノード用にセンサネットワークのシステム開発および運用を容易にするための仮想マシン (Virtual Machine: VM) を独自に開発している。仮想マシンについてもこれまで多くの研究が行われている。主な研究としては TinyOS [4] や Maté [5]，Sun Spot [6] などがあげられる。

我々が開発した仮想マシンは共通言語基盤 (Common Language Infrastructure, CLI) に準拠しているため，MS-Windows の .NET Framework 環境で開発したプログラムを動作させることができる。そのため，開発者は Visual C#，C++ など .NET Framework 環境の開発言語でプログラムを開発することができる。またこの VM はハードウェアの差異を吸収するように設計されているため，複数のハードウェア (プラットフォーム) で同一のプログラムを動作させることができる。またプログラムを無線で転送することが可能となっており，環境内に配置されたセンサノード上のプログラムを変更することにより，センサネットワークの動作，トポロジなどを変更することができる。

このようなセンサネットワークの重要な応用先の一つとして，農業分野への適用が考えられる。センサネットワークの農業への応用例としては，[7]，[8]，[9] などがあげられる。我々は長野県佐久穂町との共同実験を行い，実際にセンサノードを農地に設置することにより栽培環境のセンシング実験を行っている。具体的にはトルコギキョウとい

¹ NTT コミュニケーション科学基礎研究所
京都府相楽郡精華町光台 2-4

う花が栽培されているビニールハウスの中にセンサノードを多数設置し、ビニールハウス内の温度、湿度などを測定することでビニールハウス内の環境を継続的に測定する。それに加えて花を栽培している農家の行動や花の生育状況などのヒアリングを通して、花の生育と環境情報とを関連づけることができる。これまで農家の方が経験的に分かっていた事が環境の値とひもづけることで客観的知識として保存することができるようになる。

本実験ではセンサノードを農業用に改良し、温度、湿度センサの精度向上や屋外設置用の防水加工、農地に固定するための改造を施した。そうすることでより安定的に長期に渡り、環境のセンシングを行うことが可能となっている。

本論文ではこの実験を得られた結果について考察を行う。センサネットワークから得られた情報、定点カメラ得られた画像、及び農家の方へのヒアリングからどのような場合に花が良く育つのかといった考察をデータを直接観察する観点からと機械学習による解析結果の両面から考察し、その結果を報告する。

2. センサネットワーク

我々はこれまで独自のセンサネットワークシステムを開発している。センサネットワークはハードウェアとソフトウェアから構成されている。ハードウェアとしては複数のセンサ類、演算機能 (CPU、メモリ)、無線機能などを備えたセンサノードを複数種類作成している。本実験では TWE-001 を CPU としたセンサノードを使用した。センサノードの詳細を図 1 に示す。

CPU	TWE-001 (32bit RISC)
RAM	128KB
ROM	128KB (flash memory)
無線通信	IEEE802.15.4/Zigbee
搭載センサ/デバイス	温度センサ (誤差 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) 湿度センサ (誤差 $\pm 5\%$) 照度センサ 三軸加速度センサ 64 x 64 有機EL (オプション)
外部I/O	シリアルコネクタ x2

外寸	400 x 900 x 5 mm (基板)	通信距離	30-40m (見通し, 実測)
重量	32g (電池込み)	通信速度	250Kbps
電池容量	830mAh (リチウムイオン)		

図 1 センサノード

本センサノードは図 1 に示すとおり、基盤上に温度センサ、湿度センサ、照度センサを備えている。室内の温度等を簡易的に測定する場合は基盤上のセンサを用いて測定することも可能だが、ビニールハウスのような屋外でかつ浸水する可能性がある場所では基盤上のセンサで測定する場合、問題が生ずる可能性がある。またセンサノードを浸水しないようにケースなどに入れた場合はセンサが適切に外

気に触れず、また基盤そのものの温度などに測定値が左右されることが考えられる。よって今回の実験では基盤上のセンサを使用せず、基盤上の外部 I/O に外付けのセンサを接続し、温度および湿度を測定することとした。センサノードを防水対策を施し、外付けのセンサを防水容器から外に出して、外に設置した様子を図 2 に示す。



図 2 防水対策したセンサノード (赤丸内が外に出されたセンサ)

図中の赤丸内が外付けセンサになっており、外付けセンサ自体も水の影響を受けないように加工されている。

2.1 無線センサノード向け仮想マシン CILIX

無線センサネットワークの運用および開発を容易にするため、我々は無線センサノード向けの仮想マシン (Virtual Machine: VM) の CILIX を開発している [10], [11]. CILIX は無線小型センサノードの中で動く VM である。この VM の主な特徴は以下の通りである。

- (1) マルチプラットフォーム
- (2) CLI に準拠
- (3) 無線で VM 上のプログラムの転送が可能

2.1.1 マルチプラットフォーム

この VM の特徴の一つは複数種類のハードウェア上で動作することである。通常、ハードウェアが異なるとたとえ同じ動作をするプログラムでも、ハードウェア毎に実行形式を準備する必要がある。センサノードが環境中に多数設置されている場合、センサネットワークを使うユーザは常にどのタイプのセンサノードが環境中に設置されているかを意識する必要がある。また複数種類のセンサノードが環境中に存在する場合は、センサノードの種類の数だけ実行形式を準備する必要がある。この VM はハードウェア、特に CPU の違いを吸収することができるため、複数種類のセンサノードが環境中存在する場合でもその上で動作させる実行形式は一種類でよい。またプログラムからネットワーク経由で情報のやりとりをする場合やセンサからデータを取得する場合も統一的なアクセス手段を用意しているため、ネットワークの種類やセンサの種類を問わず、データのアクセスが可能となっている。

2.1.2 CLI 準拠

この VM は CLI (Common Language Infrastructure) に準拠した作りになっている。CLI では実行形式は CIL (Common Intermediate Language) は記述される。MS-Windows .NET 環境で制作された実行形式は全て一旦 CIL による記述に変換されるため、MS-Windows 用の開発環境で作成された実行形式を VM 上で動作させることができる。これにより、ユーザは MS-Windows Visual Studio の C#, C++ など使い慣れた言語でプログラムの作成が可能となり、無線センサノード向けに新たな言語を習得するといった労力を削減することができる。

2.1.3 プログラムの無線転送

この VM は、VM 上で動作する実行形式を無線で送信・受信する機能を備えている。この機能により環境中に既に配置されたセンサノードの動作を変更し、センサネットワーク全体の振る舞いを変更することが可能となる。通常、これまで何も計測がなされていないフィールドにセンサを配置し、データを取得する場合、どのようなデータをどの程度の空間的・時間的間隔で取得すべきかが不明であることが多い。また計測を継続している途中で、状況が変わりセンサネットワークの動作を変更したい場合が出てくる可能性がある。このような場合通常はセンサノードを一旦回収し、再プログラムを行った後再配置を行う必要がある。しかし VM にプログラムを送受信する機能を備えることで、センサネットワークの動作を変更するにあたり、環境にセンサノードを配置したままでプログラムの差し替えが可能となる。

3. 実験環境および実験システム

個人農家において、ビニールハウス内の栽培環境が均一であるかを調査する目的で、ハウス内の環境モニタリング実験を、長野県佐久穂町との共同実験として行った。栽培品目は、切花として商業価値が高いトルコギキョウ (図 3) である。トルコギキョウは、昼間の日射量、日光の強さ、温度の日較差などによって、作柄に大きな差異が生じる品目であり、農家の工夫次第で収益が大きく増減する作物のひとつである。

本実験では、ハウス内の温度、湿度、照度が分布がどのようになっているかを調べることを目的に実験を行った。ハウスは 45mx6m の面積をもち、作物は 5 列に並べて栽培されている。

システム構成の概要を図 4 に示す。全天候型センサノードをビニールハウスの中に多数設置し、温度、湿度、照度を計測する。実験開始時は、センサノードはビニールハウス内に 9 個、ビニールハウス外に 1 個設置した。計測されたデータはまず無線 (IEEE802.15.4) でスマートフォンに集められる。その後、集められたデータは携帯電話回線を通じてサーバに送付され、蓄積される。



図 3 トルコギキョウ

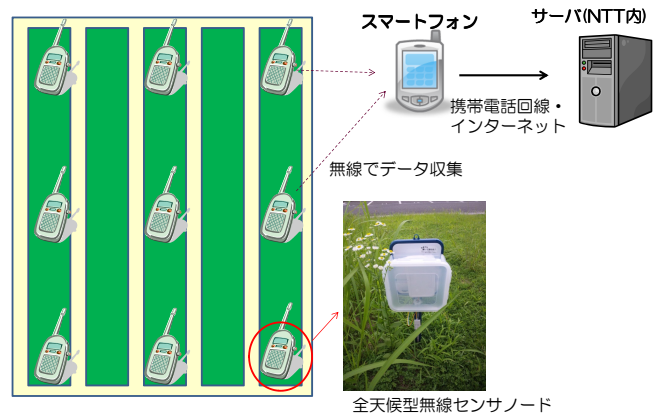
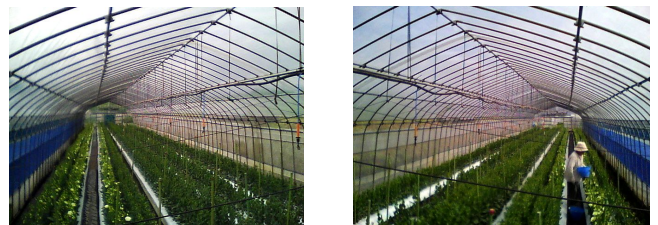


図 4 システム

またインターバル定点カメラによりビニールハウス内の様子を画像撮影を行い、内部の様子を映像として記録した。定点カメラはビニールハウスの入り口近辺とその反対側に設置し、10 分に 1 枚の割合で撮影を行った。定点カメラの画像の例を図 5 に示す。



灌水の様子

摘花作業の様子

図 5 インターバルカメラによる画像

図 6 は、農家のビニールハウス内に CILIX を搭載し、温度、湿度、照度のセンサを接続した TWE001 デバイスを、防水型ケースに入れて設置した様子を示している。

サーバに蓄積されたデータはネットワーク経由で参照できるようにした。今回は Android のアプリケーションを作

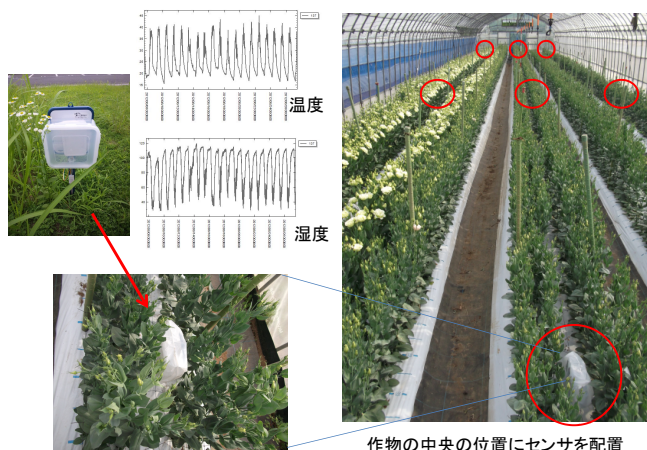


図 6 実験環境

成し、スマートフォンで温度などの内部の状況がリアルタイムに観察ができるようにした。Android アプリケーションの動作画面を図 7 に示す。

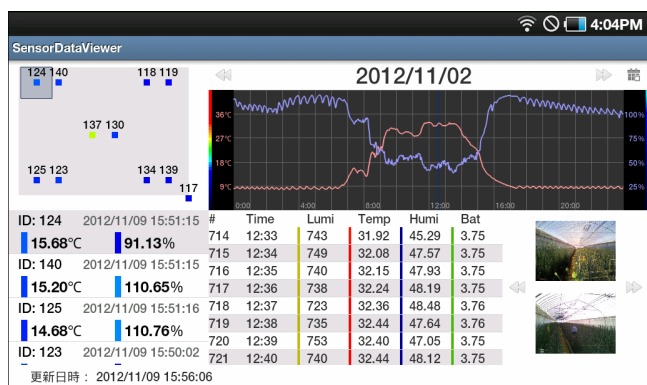


図 7 Android アプリケーションの動作画面

3.1 実験時のシステム改善

この実験では、当初センサの配置個数や頻度、必要な電池量等のパラメータが分からず、10 個のセンサをハウス内の南北の辺に各 3 つと、中央に 3 つ、それぞれ地上 10cm の位置に配置してデータの観測を行った。その後、データの内容を見ながら農家と配置について検討を行い、4 回にわたって配置変更やプログラムのアップデートを繰り返した。その際、VM の実行形式を無線で転送する機能を用いることで、環境内に配置したセンサノードを回収することなくアップデートを行うことができたため、センサノードの機能の向上を非常に簡単に行うことが可能であった。

配置の検討の結果、最終的に 20 個のセンサを使い、地上 10cm と 1.5m の位置に配置して温度と照度の計測を行うことで、日射量や温度の差異を取得できることがわかり、農家が予想していた日射量の差が、ハウス内で 1 日の間に最大 3 時間もの差があることが分かった。

3.2 省電性能

8/7 から 8/17 までは、500mAh のリチウムイオン電池を使用した。概ね 5-6 日程度で放電してしまい、交換が必要となった。短時間で放電した大きな理由は、計測時以外に無線機能をスリープしないようにプログラムを記述したことが原因であると考えられる。そこで、8/17 から電池を 1300mAh に変更し、さらに 8/22 からはスリープ機能を追加したところ、概ね電池寿命は 40 日程度まで伸びた。データを観測するたびに送信するのではなく、数回観測してから一度に送信するようにすることで、さらに寿命を延ばすことは十分可能であると考えられる。本実験では、この改良を試すより早くに実験期間が終了したことから、次回実験時において本改良を加えたシステムを使い、省電性能を試験する予定である。

4. 実験結果

センサノードの配置を図 8 に示す。図中の数字はセンサノードの ID を示す。5 つの畔のうち、3 つの畔の南北と中央にひとつずつセンサを設置した。140 番の ID のセンサが最も南西にあり、137 番のノードは北西にある。117 番のノードは、外気温を取得するために、農作業用の小屋の中の換気のよい場所に配置した。

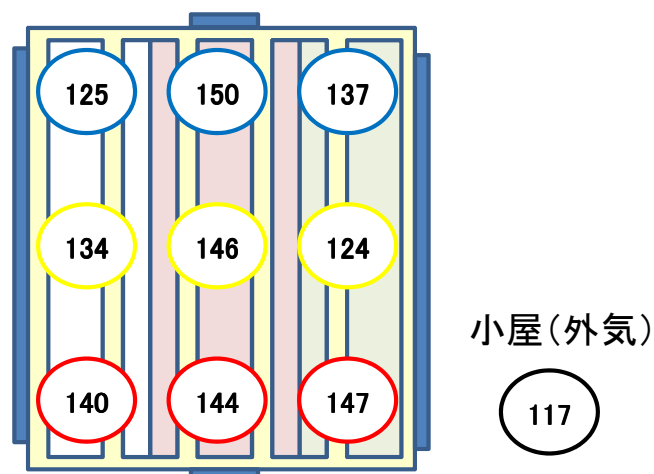


図 8 センサ配置図

観測対象は温度データと湿度データであり、1 分に 1 回の間隔で行った。センサノードには照度センサも搭載されていたものの、防水加工が必要なことから、照度センサを直射日光が当たる位置に設置することが難しく、正確な照度値は取得できなかった。

データ取得実験は 2012/8/7 から 10/10 まで行った。この期間のうち、8/21 までは基地局の位置調整が不十分であったことなどが原因で、データの一部に欠損が起きた。また 9/1 から収穫が開始され、9/18 までにはすべての作物が収穫された。そのため、9/1 以降については、作物が

存在しない状態で観測したデータが含まれる。作物がなく
なった畔に置かれたセンサについては、温度センサが地熱
の放射の影響を受けたことから、気温が正確に計測できて
いない可能性がある。

4.1 作柄の分布

収穫時の作柄の分布を図 9 に示す。農家によれば、トル
コギキョウの作柄の良否は、作物の丈の長さに依存し、60
cm 以上の長さが得られない場合、商品価値が大きく低下
するとのことである。長さが 80 cm を超えると、品質が高
いと評価される。丈の長さが 60cm 未満の作物が多くを占
めるエリアは「不良」、70 cm 程度までを「やや良」、80cm
程度までを「良」、それ以上の丈の作物が大半を占めるエリ
アを「最高」として評価している。ただし、作物の丈の長
さは正確に測定したものではなく、収穫時に農作業者が直
観的に判断したものである。

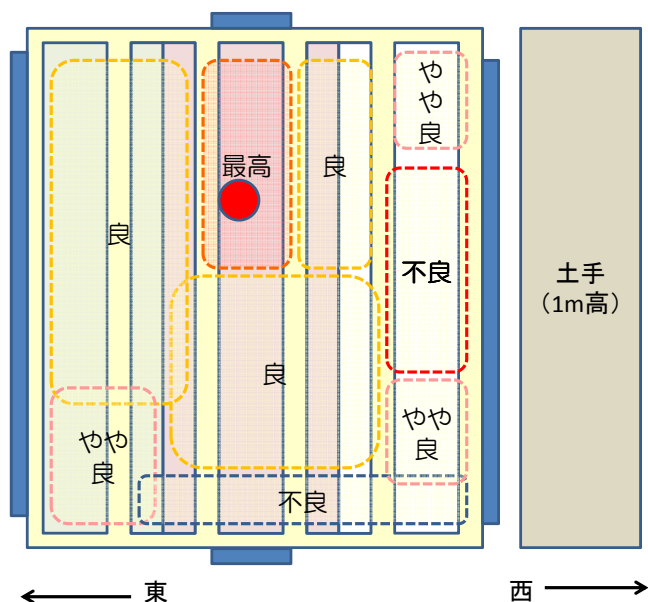


図 9 作柄の分布

4.2 温度分布

作物の収穫前で、なおかつデータの欠損が少なかった
8/22-8/31 の間の温度データについて、ノード毎の平均値
を図 10 に示す。

144 のノードの平均温度が最も低く、140 が最も高いと
いう結果になっている。140 のノードが最も高くなっているのは、140 番ノード付近の作物は生育がやや遅く、観測
を始めた時点で丈が短かったことから、地面に直接日射が
あたったことで温度が高くなったためと考えられる。

南側、北側では中央の畔のノードの温度が低いが、中央
部分では中央の畔が最も温度が高くなっている。これは、
ハウスの南北の中央の畔の位置に出入りのための扉があ

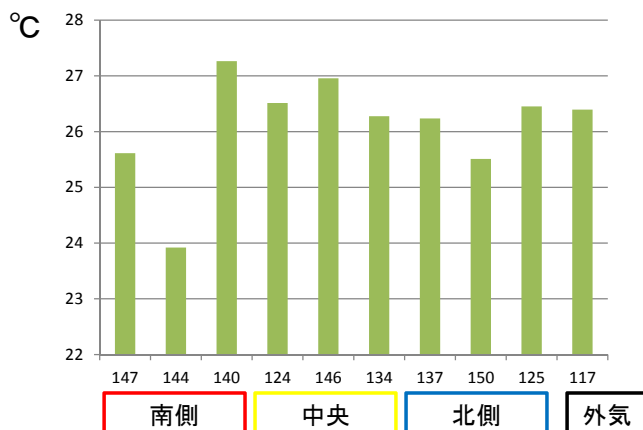


図 10 ノード毎の平均温度

り、これが換気のために解放されていることが多かったた
めであると考えられる。特に南側の温度が低かったのは、
ハウスの南端の外側が窪地になっており、雨が降るとそこ
に水がたまる影響で、温度が低くなっていたのではないかと
考えられる。

ハウス内の平均温度については、外気との差がほとんど
ない。トルコギキョウの場合、ハウス内で生育する目的は、
降水を遮断することにある。これは、一定の長さまで育っ
た後は開花させるために灌水を完全に停止させる必要があ
るためである。温度については、過度に上昇すると開花し
なくなってしまうことから、換気のために壁面や扉などは
解放状態にして育成を行っている。ただし、今回センサを
設置した位置は地上 10cm 程度の場所であり、より高い位
置での計測は十分には行っていない。地上 2m の位置に設
置した目視により計測が行える温度計では、地上付近より
も高温になることもあったことから、より高い位置で計測
を行うと外気との差が大きくなる可能性はある。この点に
ついては、次年度の計測実験により明らかにしていく予定
である。

次に、畔毎の温度の差異を調べるため、1 時間毎の平均
温度を畔の中央地点のそれぞれのノード毎に計算した。そ
の結果を図 11 に示す。

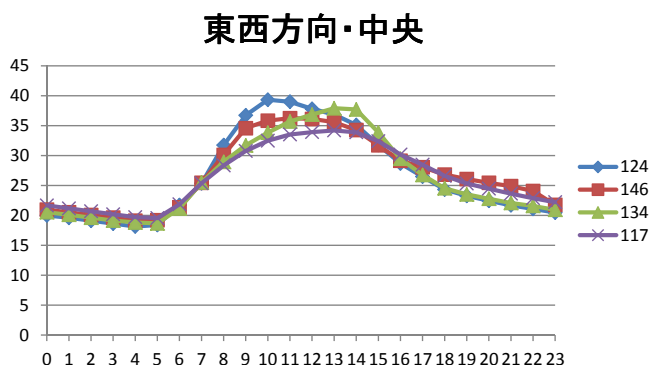


図 11 ノード毎の平均温度

124 番のノードは最も東の畔のノードであり、134 番のノードは最も西のノードである。朝に太陽が昇ると 124 番のノードの位置から温度が上がり、次いで中央の 146 番のノードの温度が上昇し、最後に 134 番のノードの温度が上昇する様子がわかる。一方で 14 時を過ぎると西側の畔のノードを含め、すべてのノードの温度が低下する。これは、ハウスの西側に 1m 程度の高さの土手があり、これが午後の日射を遮っているからであると考えられる。温度と日射との間に相関があると仮定した場合、日射時間は東西の畔で平均で 2-3 時間程度の差があることになる。このことは農家の経験から知られていたことではあり、作柄に差が生じる大きな原因になっているのではないかと考えられる。実際に、134 番ノード付近の作柄は「不良」であり、十分な長さまで成長していなかった。ただし、この仮説を確かめるためには、日射時間については照度計を用いて正確に調べる必要がある。日射については次回実験時に正確に測定する予定である。

4.3 クラスタリング

得られたセンシングデータを k-means 法を用いて、クラスタリングした結果を示す。農家の主観による植物の出来とクラスタリング結果を照合し、クラスタリング結果の評価を行う。

ここでは温度と湿度についてクラスタリングを行い、クラスタ数を 3 とした。2013/8/28 から 2013/9/27 までの間に 9 個のセンサノードから得られたデータを使用した。

温度と湿度についてのクラスタリング結果をそれぞれ図 12 と図 13 に示す。

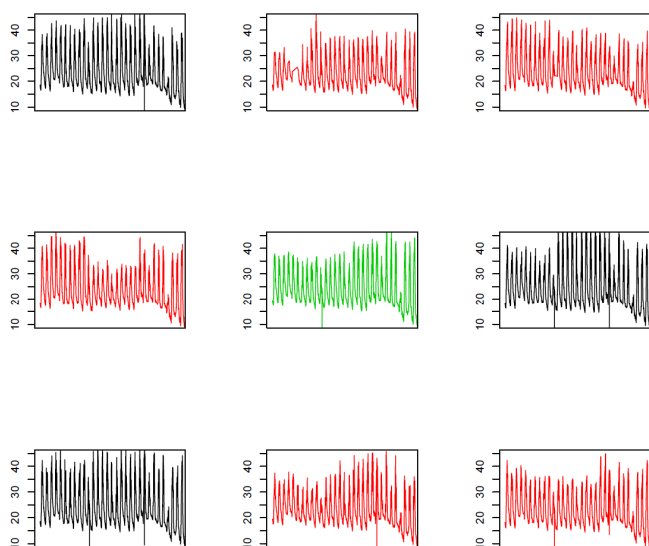


図 12 クラスタリング結果 (温度)

図中で同じ色のグラフは同じクラスタに属することを示している。また図中のグラフの配置は図 9 の同じ並びとなっている。また横軸は時間経過を表し、縦軸はそれぞれ

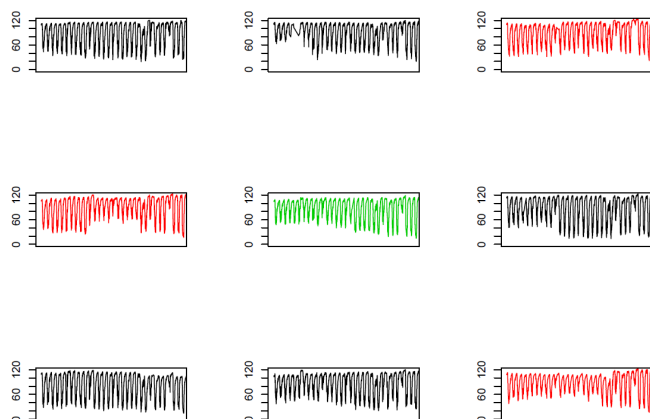


図 13 クラスタリング結果 (湿度)

温度と湿度を表している。

農家による主観的な作柄評価とこれらのクラスタリング結果を比較する。まず作柄評価ではほぼ中央がもっとも良いとされているが、温度、湿度のクラスタリング結果においても中央は一つの緑のクラスタとして分類された。また黒でクラスタリングされたところはあまり作柄が良くなり、赤は緑と黒の中間の作柄となっている。まとめると温度、湿度共おおむね以下のような結果となった。

緑: もっとも良い

赤: 良 ~ やや良い

黒: やや良い ~ 不良

このように温度、湿度のデータと作柄の結果を比較することで温度や湿度分布と作柄に相関があることが認められた。ただし、今回の評価では温度、湿度のみをそれぞれ評価しており、他に作柄に関連していると考えられるパラメータについては評価を行っていない。今後は、より厳密に評価を行っていく予定である。

5. まとめ

センサネットワークの応用の一つとして考えられている農業フィールドであるビニールハウス内に実際にセンサノードを設置し、データを収集する実験を長野県佐久穂町と共同で行った。当初はセンサノードの配置などについて適切な設定が不明であったため、実験の途中で試行錯誤を行いながら変更することで、センシング環境を徐々に進化させることができた。また得られた実験データを解析することにより、ハウス内の環境と作柄の関連を見いだした。その結果は今後の作柄の向上に役立つものと考えられる。今後はさらに解析を進め、その結果を元に次の栽培時に品目の配置を変更することを予定している。また次回の実験時に配置変更によって作物の作柄の改善が生じたかを検証する予定である。

謝辞 本論文執筆にあたり、ビニールハウス環境のセンシング共同実験を行った長野県佐久穂町および遠藤隆也氏に感謝致します。

参考文献

- [1] Madden, S., Szewczyk, R., Franklin, M. and Culler, D.: Supporting Aggregate Queries Over Ad-hoc Wireless Sensor Networks, *IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp. 49–58 (2002).
- [2] Beigl, M. and Gellersen, H.: Smart-Its: An Embedded Platform for Smart Objects, *Smart Objects Conference (sOc)* (2003).
- [3] Kawahara, Y., Minami, M., Morikawa, H. and Aoyama, T.: Design and Implementation of a Sensor Network Node for Ubiquitous Computing Environment, *VTC2003-Fall* (2003).
- [4] Hill, J., Szewczyk, R., Woo, A., Hollar, S., Culler, D. and Pister, K.: System architecture directions for networked sensors, *9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, pp. 93–104 (2000).
- [5] Levis, P. and D.Culler: Maté: A tiny virtual machine for sensor networks, *10th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, pp. 85–95 (2002).
- [6] Sun SPOT, <http://jp.sun.com/products/software/sunspot/>.
- [7] Field Server, <http://model.job.affrc.go.jp/FieldServer/default.htm>.
- [8] 小林悠一, 鈴木雄也, 鈴木良典, 今原淳吾, 峰野博史: センサネットワークを用いた温湿度制御システムの研究, 情報処理学会研究報告ユビキタスシステム研究会, Vol. 2013-UBI-37, No. 24 (2013).
- [9] 三重大学 食と農業を科学するリサーチセンター, <http://www.mie-u.ac.jp/research/intro/ct0006-00.html>.
- [10] 岸野泰恵, 柳沢豊, 寺田努, 塚本昌彦, 須山敬之: 小型無線デバイスのためのプログラム配布機能を備えた CIL 仮想マシン, DICOMO2010 論文集, pp. 1486–1494 (2010).
- [11] 柳沢豊, 須山敬之, 寺田努, 塚本昌彦: 小型無線センサノード用仮想マシン CILIX の適用事例, 情報処理学会研究報告ユビキタスシステム研究会, Vol. 2013-UBI-37, No. 23 (2013).