

高信頼双方向多点無線 センサ/アクチュエータネットワークシステムの評価

井林宏文^{†1} 兼田千雅^{†1} 鈴木雄也^{†1}
今原淳吾^{†2} 大石直記^{†2} 黒田正博^{†3} 峰野博史^{†1}

近年、センサ技術の進歩により様々な環境情報を収集可能となり、また収集した環境情報を利用して各種機器を制御するシステムの開発も盛んに行われている。しかし確実なデータ送受信を望める有線によるセンサネットワークでは配線などのコストが増え、一方で無線によるセンサネットワークでは、多数の障害物による無線通信品質の低下による収集データの欠落や、過酷な現場環境下にシステムを設置することによるシステムの停止といった課題がある。そこで本研究では、過酷な環境下でも確実に 99.99%以上稼働する高信頼な双方向多点無線センサ/アクチュエータネットワークを提案し、稼働期間中の確実なシステム稼働を保証するアクチュエータ制御システムの実現を目指す。過酷な環境下でのシステム稼働を想定し、障害発生リスクを低減させるシステム実装と様々な障害発生時に自動復旧する仕組みをシステム内に組み込む。高信頼双方向多点無線センサ/アクチュエータネットワークのプロトタイプとして農業向け環境制御システムを研究開発し、静岡県農林技術研究所の農業環境で実際に稼働させ、栽培期間中不具合無くシステムが稼働することを確認した。一方、3.00%のセンシングデータ欠損のうち 2.91%がノード間通信でのパケットロスであったことからセンシングデータの分析を行い、パケットロス率と RSSI が温室内に設置されたビニールによる内部被覆資材および相対湿度と相関関係がみられた。電波暗室での詳細実験を通じ、2.4GHz 無線がビニールや水分の影響を受けることを確認し、同時に稼働させた 429MHz 帯無線ではビニールや水分の影響を受けなかったことから、農業環境への 429MHz 帯無線センサネットワークの適用効果を期待できる。

Evaluation of High Reliability Wireless Sensor / Actuator Network System

HIROFUMI IBAYASHI^{†1} YUKIMASA KANEDA^{†1} YUYA SUZUKI^{†1}
JUNGO IMAHARA^{†2} NAOKI OISHI^{†2}
MASAHIRO KURODA^{†3} HIROSHI MINENO^{†1}

1. はじめに

近年、センサ技術の進歩により様々な環境情報を収集可能となり、また収集した環境情報を利用して各種機器を制御するシステムの開発も盛んに行われている。一例として、農業分野では情報技術を用いた農業支援としてデータの可視化・分析を目的としたモニタリングシステムが取り組まれている。農作物の栽培環境や農作物の状態を収集し、可視化により生育環境や生育状況を農業従事者にわかりやすい形で提供しており、海外では大規模農場でモニタリングシステムを利用する検討が数多くなされている[1][2]。

しかし、有線センサを使用したセンシングは配線コストや既存施設へのセンサ設置時の配線制約など、自由な場所へセンサを設置できず農業従事者の負荷につながる場合もある。また、高温多湿で様々な障害物の存在する過酷な農業環境下に無線センサネットワークシステムを設置する場

合、センシングデータの欠落や高負荷なプログラムの実行による熱暴走の発生などによるハードウェアトラブルなど、数ヶ月単位の稼働期間中継続して不具合無く稼働する無線制御システムを実現するのは困難であった。

本研究では、過酷な環境でも栽培期間中 99.99%以上稼働する高信頼な双方向多点無線センサ/アクチュエータネットワークを提案し、稼働期間中の確実なシステム稼働を保証するアクチュエータ制御システムを実現する。過酷な環境下でのシステム稼働を想定し、障害発生リスクを低減させるようなシステムを実装し、また様々な障害発生時に自動復旧する仕組みをシステム内に組み込む。高信頼双方向多点無線センサ/アクチュエータネットワークを利用したプロトタイプシステムとして農業向け環境制御システムを研究開発し、静岡県農林技術研究所の農業環境で実施中の実証実験状況について報告する。

2. 関連研究

農業環境にセンサを設置することによる環境情報のセンシングは近年盛んに行われている。日本でも UECS[3]規格

^{†1} 静岡大学

Shizuoka University

^{†2} 静岡県農林技術研究所

Shizuoka Prefectural Research Institute of Agriculture and Forestry

^{†3} 情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications Technology

に基づく多種多様なセンサを利用し、またセンシングデータを利用して環境制御を行う施設園芸 SaaS・施設環境制御 [4]がある。施設園芸 SaaS・施設環境制御は、UECS 規格準拠のセンサを任意に追加することで様々な環境情報を収集可能であるが、UECS 規格のセンサはセンサと集約ノード間には有線による通信となる。そのため、データの通信確実性は保証されるものの、センサの設置数やセンサ種類が増加することに比例して配線などの設置コストが増加することから、農業従事者への負担が高いという課題があった。

そのため、無線センサネットワーク (WSN) を利用した農業環境のセンシングの研究 [5]も進められており、WSN を用いた土壌水分のセンシング [6]や土壌水分、土壌温度、気温などをセンシングし灌水制御を行う研究 [7]も行われている。農業環境に WSN を設置する場合、高温多湿な環境となることから機器の故障が発生しやすく、また植物などが障害物となり受信電力低下やそれに伴うマルチパスフェージングやパズロスが発生する可能性がある。ノード間通信での受信電力低下はモデル式が存在し、自由空間伝搬モデル (Friis, 1946) やさらに農業環境での計測値による影響を加味したモデル (Weissberger, 1982) などがある。これらのモデルを用いて受信電力の低下の理論値を導出することでセンシングデータの確実な通信可能範囲を求めることが可能だが、実環境では上記モデルのパラメータに含まれていない気温や相対湿度、また植生度合いなどが時間経過とともに変化する。また、Weissberger のモデルは米国内での様々な農業環境での計測値に基づいたモデルであることから、気候や栽培対象作物が異なる日本の農業環境では条件が異なる。そのため、既存の電波伝搬モデルは参考にはなるが多種多様な実環境に合わせた検討が必要となる。

農業環境で無線通信の障害物となりうる植物からの影響は葉による影響が大きいと考えられ、センサの設置位置も重要となる [8]。しかし、無線通信の確実性を実現するセンサ位置の制約によって、本来計測したい位置でのセンシングが不可能になり本末転倒である。そのため、システム利用者が任意の位置にセンサを設置しても確実なデータ送受信が可能であることが望ましい。

無線通信部を含めた高信頼な WSN の構築に関して、WSN を利用した環境モニタリングでシステム稼働率 99.99%以上を目指す研究 [9]も進められている。しかしセンシングだけではなくアクチュエータ制御も確実に必要がある。また、農業環境の WSN で広く使用されている 2.4GHz 帯 IEEE802.15.4 準拠の無線通信 [10] に改良を加え、タイムスロットや周波数分割の導入によるパケット到達率向上を図る研究 [11]や、またパケット衝突回避やトラフィック分散機構を組み込むことでパケット到達率の向上を図る研究 [12]も行われている。これらの研究はシミュレーションでの評価が中心であり、実際にシステムに組み込む場合は気候や設置物によって環境が変化する実環境における

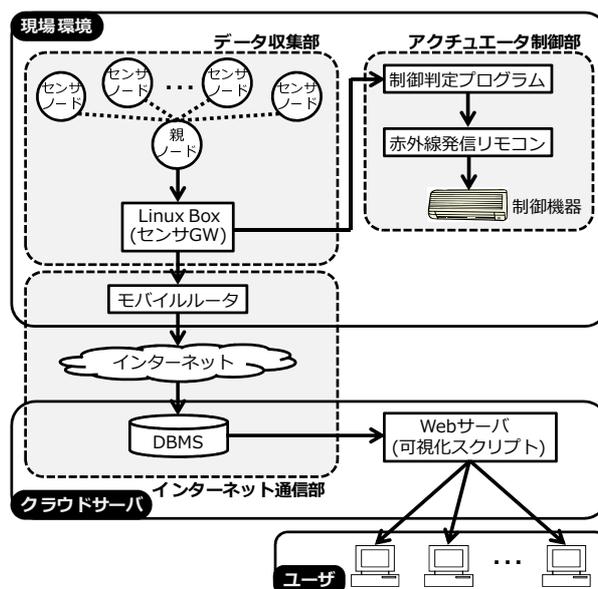


図 1 システムアーキテクチャ

評価には至っていない。

2.4GHz 帯とは異なる周波数帯を用いる農業向け WSN としては、433MHz 帯を用いたじゃがいも畑でのセンシング [12]があり、433MHz 帯では高湿度であるほど電波伝播が良くなる結果が得られている。日本では近似した周波数帯に医療用テレメータ帯の 429MHz 帯が存在し、この周波数帯を利用した無線規格に IEEE802.15.6 規格がある [13]。429MHz 帯は 2.4GHz 帯と比較して回折性に優れ、また IEEE802.15.6 規格は 6m 立方に 10 個以上のセンサの同時運用が可能であることが要求される [14]。そのため、429MHz 帯 IEEE802.15.6 規格を農業環境向け WSN へ適用することで、多湿な環境での高い電波伝播や多数の障害物が存在する環境でも高信頼な WSN を構築可能であると考えられる。

3. 高信頼双方向多点無線センサ/アクチュエータネットワークの設計

3.1 システムアーキテクチャ

本研究開発で提案する高信頼双方向無線センサ/アクチュエータネットワークのシステムアーキテクチャを図 1 に示す。本提案システムでは、多数のセンサを用いて環境データのセンシングを行い、センシングされたデータをセンサ GW で処理してアクチュエータ制御を行う。センサ GW ではセンシングデータの正誤判定、クラウド上に設置された DBMS への登録、また機器制御プログラムへの送信を行う。クラウド DBMS 上に登録されたセンシングデータは可視化インタフェースを介して多数のユーザが任意の場所からセンシングデータを利用可能とする。

3.2 提案システムへの要求事項

高信頼な双方向多点無線センサ/アクチュエータネット

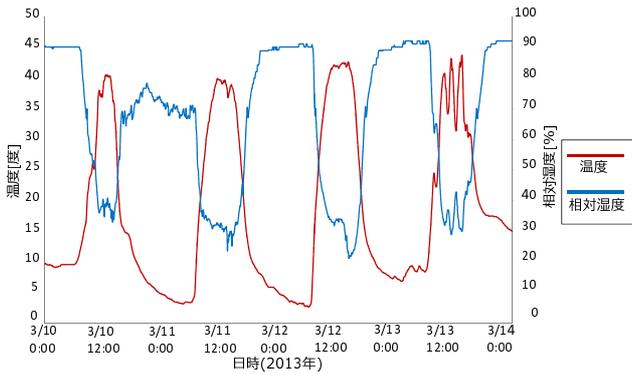


図2 農業温室の気温変化(2013年3月)

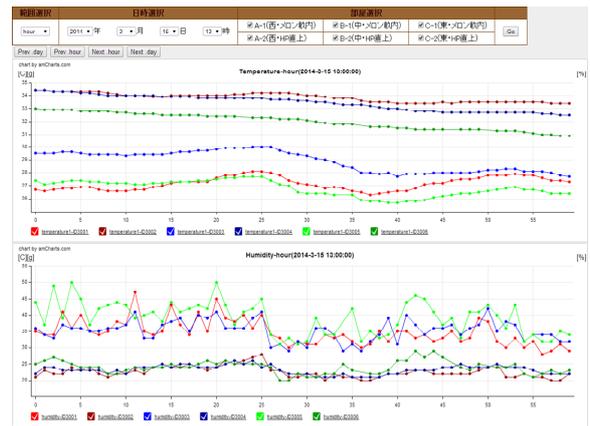


図3 センシングデータ可視化インターフェース

ワークを実現するための要求事項を検討する。本提案システムはシステムの利用者が限定され、また使用するセンサノードや制御を行うアクチュエータの増加など拡張性を必要とし、さらにユースケースとして想定する農業向け環境制御システムでは栽培期間中の確実なシステム稼働を保証する必要があることから「社会的影響が限定されるシステム」[15]に該当する。社会的影響が限定されるシステムでは稼働率 99.99%以上が必要であるとされることから、本提案システムの目標稼働率を 99.99%以上とした。

稼働率 99.99%以上の実現のために、障害が発生しにくい機器選択と実装を行い、また万が一障害が発生した場合でも障害が発生していない他の部分へ影響を及ぼさないシステムとする必要がある。また、システム利用者はシステムの運用に関する知識に十分ではない場合もあることから、障害からの復旧は利用者ではなくシステム自身が自動で行えることが望ましい。

3.3 データ収集部

図1中のデータ収集部はセンサノード、収集されたデータを処理するセンサGWプログラム、収集されたデータを蓄積するデータベース(DBMS)によって構成される。提案システムはセンシングデータに基づいてアクチュエータ制御を行うため、センシングデータが欠落した場合はアクチュエータ制御を行えない。したがってセンサノードから親ノード間でのパケットロスは限りなく少ないことが望ましい。

また大規模なWSNを構築した場合、単位時間あたりにセンサGWで処理するデータ数が増加する。センサGWに入力されるデータ数がセンサGWから出力されるデータ数より多い場合、センサGWでの処理待ちデータ数が増加し続け、最終的にはバッファオーバーフローを引き起こす可能性がある。そのため、データ処理とDBMSへの登録は高速で行えるよう実装し、センサGW内にセンシングデータが蓄積されないようにする必要がある。また、設置予定の現場環境は図2に示すように最高気温40度以上、最高相対湿度90%以上と高温多湿な環境であり、この環境下でシ

日割	稼働率	月日設定	時間設定	温度	湿度	冷却	制御	実行	停止
A-1(西)	0	2014-02-15 → 2014-02-16	08:00:00 → 15:00:00	30	0	暖房	Reflection	Delete	[ALL Delete]
A-1(西)	1						Reflection	Delete	[ALL Delete]
A-1(西)	2						Reflection	Delete	[ALL Delete]
A-1(西)	3						Reflection	Delete	[ALL Delete]
A-1(西)	4						Reflection	Delete	[ALL Delete]
B-1(中夜)	0	2014-02-15 → 2014-02-16	09:00:00 → 12:00:00	20	0	暖房	Reflection	Delete	[ALL Delete]
B-1(中夜)	1						Reflection	Delete	[ALL Delete]
B-1(中夜)	2						Reflection	Delete	[ALL Delete]
B-1(中夜)	3						Reflection	Delete	[ALL Delete]
B-1(中夜)	4						Reflection	Delete	[ALL Delete]
C-1(東)	0	2014-02-15 → 2014-02-16	08:00:00 → 12:00:00	25	0	冷却	Reflection	Delete	[ALL Delete]
C-1(東)	1						Reflection	Delete	[ALL Delete]
C-1(東)	2						Reflection	Delete	[ALL Delete]
C-1(東)	3						Reflection	Delete	[ALL Delete]
C-1(東)	4						Reflection	Delete	[ALL Delete]

図4 制御情報登録インターフェース

ステムを稼働させる場合ハードウェアが故障することが考えられる。したがって、システムで使用するハードウェアは耐高温多湿性を持つものが望ましく、屋外での使用が想定されていない機器は防水対策や熱対策を施す必要がある。

一方、システム稼働期間中のセンシングデータはDBMSへ登録され蓄積される。センシングデータはクラウド上DBMSとローカルDBMSの両方に登録することで現場環境のセンサGWにおける2ヶ所でのバックアップを実現する。これによりインターネット接続が切れてもローカルDBMSにデータが蓄積され、自動復旧後にクラウド上DBMSへデータを登録させればタイムラグが生じるもののデータ欠損を抑えられる。最後に、クラウド上DBMSに登録されたセンシングデータは図3のようなWebブラウザで閲覧可能な可視化インターフェースを通じてインターネットへ接続可能な環境であれば任意の場所から確認できるようにする。

3.4 アクチュエータ制御部

アクチュエータ制御部は、制御判定プログラムと赤外線信号発信リモコンによって構成される。アクチュエータの制御情報は図4のようなユーザインターフェースを介してクラウド上のDBMSに登録される。制御判定プログラムがクラウド上DBMSから最新の制御情報を取得しアクチュエータ制御を行う。インターネットから切断され最新の制御情報を取得できない場合でもシステムが稼働し続けるよう

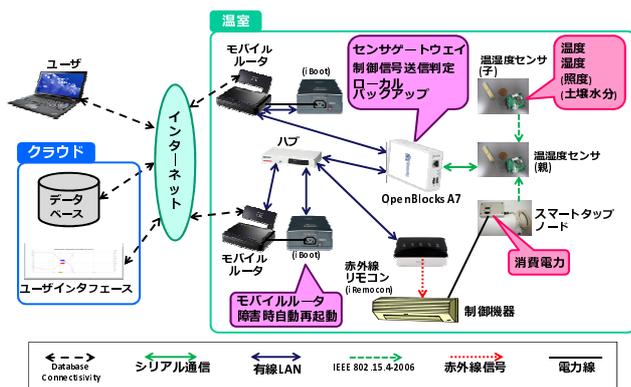


図5 農業環境向け環境制御システム

にするため、インターネット接続が自動復旧するまで現場環境で独立して制御システムが稼働できるようにし、必要最低限のアクチュエータ制御を可能にする。

アクチュエータ制御部はデータ収集部とは独立させ、また各種論理機能をモジュール化することで開発容易性を高める。これにより制御判定アルゴリズムの変更や赤外線信号発信リモコンの置き換えなどを行う場合でもシステム内の変更箇所を最小限に留めることができる。

3.5 インターネット通信部

提案システムではシステムのインターネットへの接続にモバイルルータを用いる。安定した通信のためには有線によるインターネットへの接続が望ましい。しかし、農業環境では既設のインフラが設置されていない環境も想定されるため、人口カバー率 100%を実現済みの携帯回線を用いてインターネットへ接続する。これにより本提案システムは携帯回線網の提供エリアに設置可能な M2M システムとなる。

携帯回線を用いたインターネットへの接続では常時接続を想定していない場合があり、一定時間連続してインターネットに接続するとキャリア側からの一時的な切断が発生する可能性がある。携帯回線を使用しつつ本問題の解決を図るため、本システムではマルチホームを導入しインターネットへの接続の多重化を図る。

4. プロトタイプ実装

4.1 農業環境向け環境制御システム

第3章で述べた提案システムのプロトタイプとして、図5に示す農業環境向け環境制御システムを研究開発した。農業環境向け環境制御システムは、高温多湿で、かつ植物の畝や金属配管などの障害物が多数存在するという無線通信に対して過酷だと考えられる環境下にシステムを設置する必要があった。このような過酷な環境下でもシステム稼働率 99.99%以上の実現を目指した。

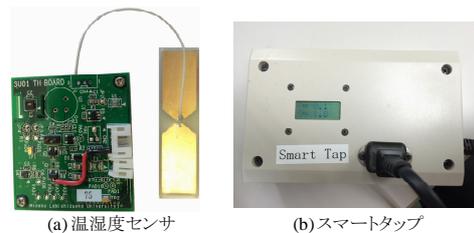


図6 使用したセンサ

4.2 データ収集部の実装

農業環境向け環境制御システムで使用したセンサノードは、ノード間通信に 2.4GHz 帯 IEEE802.15.4-2006 規格を用いる文科省地域イノベーションクラスタープログラム「自立分散協調ユビキタスセンサネットワーク (2007-2011)」で実用化した温湿度センサノード (図6(a)) と消費電力を計測するスマートタップ (図6(b)) である。温湿度センサノードおよびスマートタップによる収集データは 1 ホップで親ノードへ転送される。親ノードは図6(a)に示す温湿度センサノードと同一であり、センサ基板上的のディップスイッチによって親ノードとして動作させる。

ノード間通信に用いる 2.4GHz 帯 IEEE802.15.4-2006 は 1 対多通信に優れた通信方式であり、またスリープ時の消費電力が低くスリープからの復帰も短時間で行うことが可能である。遅延の少ない 1 ホップでの通信によるリアルタイム性の確保と、将来の電池駆動を見据えた場合のスリープ期間中の低消費電力という利点を考慮し、図6に示したセンサノードを利用した。

センサ GW プログラムは Linux カーネルを稼働可能な OpenBlocks A7 (ふらっとホーム製, OBSA7P/J7) 上にて稼働させた。OpenBlocks A7 は気温 55 度までの動作保証がされており、図2で示した高温多湿な農業環境下でのシステム稼働時のハードウェア故障リスクを抑制可能と考えた。また、センサ GW プログラムを実行形式で稼働させるだけでなく、システムの稼働に不必要なプロセスを極力減らすことで OpenBlocks A7 への負荷を軽減し、ハードウェアの故障や熱暴走発生リスクを抑えた。

センシングデータを蓄積する DBMS として、クラウド上に PostgreSQL を利用した DBMS を、ローカル環境には SQLite を利用した DBMS を構築した。SQLite は軽量な PostgreSQL と同様のリレーショナルデータベースであるが、サーバの機能を有さずアプリケーションとして動作可能であり、また 1MB 未満のライブラリで動作可能である。そのため、低負荷でローカル DBMS として使用可能な機能を持つことから、ローカル DBMS として SQLite を OpenBlocks A7 で動作させた。

センシングデータの DBMS への登録は、COPY コマンドの使用と 5 個のセンシングデータを 1 個の SQL クエリにまとめて DBMS へ登録する手法で処理の効率化を図った。

表 1 温室内環境制御実験情報

制御期間	制御設定温度		
	小温室 A	小温室 B	小温室 C
17:00～23:00	暖房 28 度	冷房 24 度	冷房 20 度
23:00～1:00	暖房 20 度	暖房 20 度	冷房 20 度
1:00～8:00	暖房 20 度	暖房 20 度	暖房 20 度

4.3 アクチュエータ制御部の実装

アクチュエータ制御部の機器制御プログラムはセンサノードによって収集されたデータとユーザが設定した制御情報に基づき、赤外線信号発信リモコンに制御命令を送信するプログラムである。実装したプロトタイプでは、温湿度センサからのデータとスマートタップのデータが UDP 通信によってセンサ GW プログラムから機器制御プログラムへ送信される。センサ GW プログラムと機器制御プログラムは同一の OpenBlocks A7 内で稼働させるためプログラム間の通信安定性は高いことから、コネクションレスで軽量の UDP 通信を用いることとした。

赤外線信号発信リモコンは iRemocon (GLAMO 製, IRM-01L) を使用した。iRemocon は TCP 通信のサーバ機能を有するため、機器制御プログラムが TCP 通信クライアントとなり iRemocon に接続し制御命令を送信することで、赤外線信号の発信が可能となる。このとき、制御命令を送信する赤外線信号発信リモコンを同一サブネット内に設置することで、インターネットから切断されている状態でも機器制御が行えるように実装した。

4.4 インターネット通信部

インターネット通信部では、マルチホームの導入とモバイルルータ自体の障害によるインターネットとの切断に備えて、iBoot (dataprobe 製) を使用した自動電源再投入機構を取り入れた。iBoot は ping 応答の監視を行い iBoot に接続された電子機器への供給電力を OFF および ON が可能なネットワーク対応電源スイッチである。この仕組みを利用し、モバイルルータからの ping 応答が無い場合にはモバイルルータを再起動させることにより、モバイルルータの自動復旧を実現した。

5. 評価

5.1 実験内容

実装したプロトタイプを用いたシステムの稼働実験を実施した。本稼働実験では、まず設定した制御値どおりに機器の制御が行われることを評価した。実験期間は 2014 年 3 月 8 日～2014 年 3 月 25 日で、期間中表 1 に示す時間帯でスポット冷暖エアコンを稼働させ温度制御を行った。暖房設定であれば表 1 の制御設定温度を下回る場合は暖房設定でスポット冷暖エアコンを稼働させ、逆に冷房設定であ

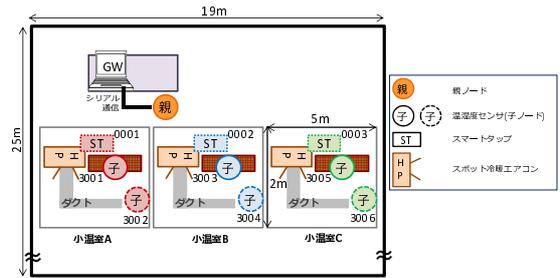


図 7 センサノード設置図

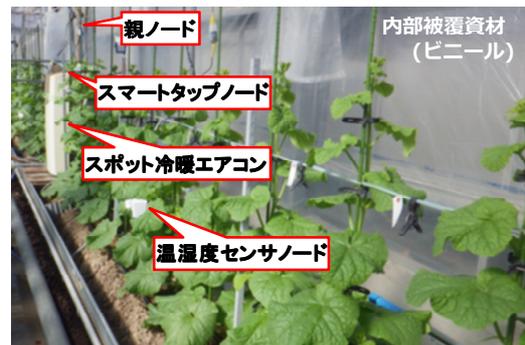


図 8 現場環境

ば制御設定温度を上回る場合は冷房設定で稼働させる。

本稼働実験では、システム利用者の要求に基づいた制御実行をシステムの正常稼働と定義する。システム利用者である農業従事者との打ち合わせにより、農業分野においては厳格なリアルタイム性は要求されないことから、農業向け環境制御システムでは 10 分以内の制御実行反映を正常稼働と定義することとした。

5.2 実験環境

本実験は静岡県農林技術研究所の A-5 温室 (南北方向約 25m×東西方向約 19m) 内にて実施した。同温室にさらにビニール幕で区切られた小温室を 3 つ設け、西側から順に小温室 A, 小温室 B, 小温室 C とし、3 つの小温室それぞれにセンサ類と制御機器を設置した。1 つの小温室に対して設置するセンサは温湿度センサ 2 個, スマートタップ 1 個で, 制御機器はスポット冷暖エアコン (TOYOTOMI 製, TAD-28JW) 1 台であり, 本実験では暖房機能と冷房機能を利用した。

図 7 に小温室内に温湿度センサノード, スマートタップ, スポット冷暖エアコンを設置した配置図を示す。また図 8 はシステム設置現場となる温室の様子である。農業従事者の要望により温湿度センサは小温室中央部の植物の畝内部 (地上高 1.3m) に 1 個, スポット冷暖エアコン吹出口 (地上高 0.2m) に 1 個を設置した。植物の畝内部に設置したセンサは機器制御判定に使用し, スポット冷暖エアコン吹出口に設置したセンサは主にスポット冷暖エアコンの冷温風出力確認に使用した。なお, 直射日光や農薬から温湿度センサを守るため, 温湿度センサはラジエーションシールド

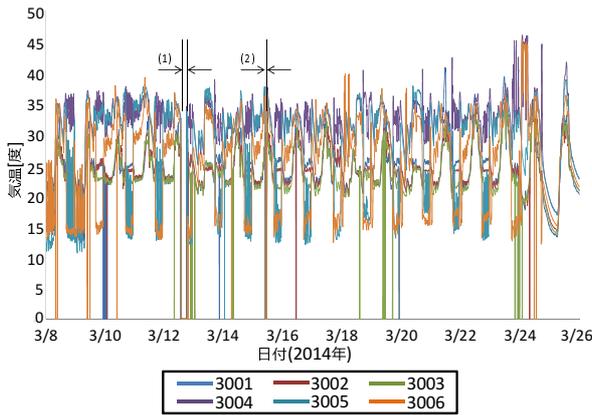


図9 温室内温度制御実験結果

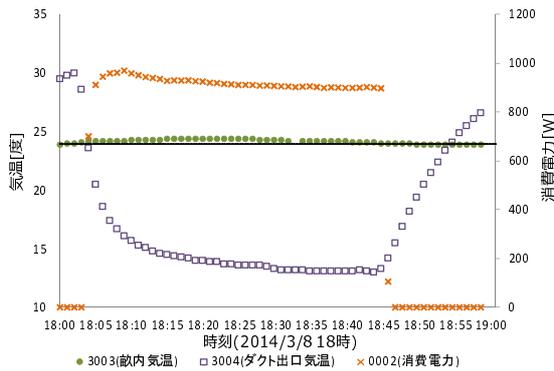


図10 温室内温度制御実験結果(詳細図)

内へ格納した。

スマートタップはスポット冷暖エアコンの電源部に接続する。スマートタップセンサを用いてスポット冷暖エアコンの消費電力をセンシングし、消費電力値によりスポット冷暖エアコンのONあるいはOFFの状態を判断する。

センサGWを稼働させるノートPCは、モバイルルータ、iBoot、ハブと一緒に中央の小温室北側に設置したプラ製ケースに入れた。ノートPC、モバイルルータおよびハブは屋外での使用が想定されていない機器であることから、プラ製ケースに入れることで水やり時の水や消毒液などが直接機器に掛からないようにした。

スポット冷暖エアコンの赤外線リモコン受光部にiRemoconの赤外線信号発光部を直接取り付け付けた。iRemoconも屋外での使用を想定した機器ではないため、簡易的にタッパーに入れて水などによる機器の故障を防いだ。

5.3 実験結果

図9は、稼働期間である2014年3月8日～2014年3月25日の温湿度センサで収集した温度推移を示す。温室内はスポット冷暖エアコンによる温度制御のほか、温水による加温がなされており最低気温は10度より高い。そのため図9中で温度が0度となっている部分はデータが欠落していることを示す。また、図9中の(1)および(2)で示した期間は、すべてのセンシングデータが欠落していた期間で

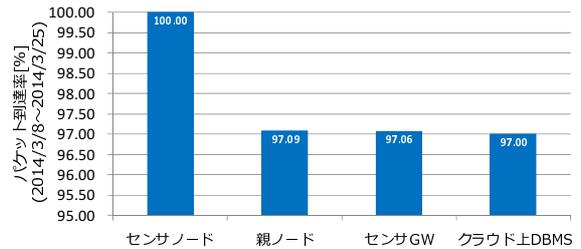


図11 モジュールごとのパケット到達率

ある。この欠落は、(1)の期間は温室の電気設備点検に伴う停電により各種センサやOpenBlocks A7、またモバイルルータへ給電されずにシステムが停止したためであり、また(2)の期間はセンサGWプログラムの更新作業に伴う同プログラムの停止によってデータが収集できなかったことが原因である。

図10は図9の稼働期間中のうち2014年3月8日18時台の小温室B(温湿度センサID:3003,3004,スマートタップID:0002)のセンシングデータの抜粋である。表1から同時間帯は冷房24度の設定となっているが、図10中の実線で示した24度を畝内気温が上回った18:05頃では、消費電力からスポット冷暖エアコンの電源が入り、またダクト出口気温から冷風が送出されたことが確認できる。また、制御条件を満たしてから10分以内にスポット冷暖エアコンの電源が入り、また制御条件を満たさなくなってから10分以内にスポット冷暖エアコンの電源が切れている。

したがって、図9および図10より人為的にシステムが停止した(1)および(2)の期間を除いた稼働期間中システムは不具合無く稼働し続け、またシステム利用者からの要求を満たす10分以内の制御を実現したことから、稼働期間中のシステム稼働率は100%であったと言える。しかしながら、クラウド上DBMSへのパケット到達率は100%とならず、システム中でのパケットロスが発生した。

5.4 結果考察

図10中で(1)および(2)で示した期間を除いた0度と示された部分は、一部のセンサでデータ欠落が発生したことを表している。センシングデータのクラウド上DBMSへのパケット到達率は稼働期間中平均97.00%であり、センシングデータ307,876個のうち9,424個(センシングデータ全体の3.00%)のデータが欠落している。本システムはセンシングデータに基づき制御を行うフィードバックシステムであり、センシングデータの欠落が多数発生すると確実なアクチュエータ制御が望めないことから、このデータ欠落の要因を分析する。

図11に示したプロトタイプのもジュールごとのパケット到達率より、パケットロスはセンサノードから親ノード間で8,970個(同2.91%)と最も多かった。親ノードからセンサGWでも76個(同0.03%)が欠落し、センサGW

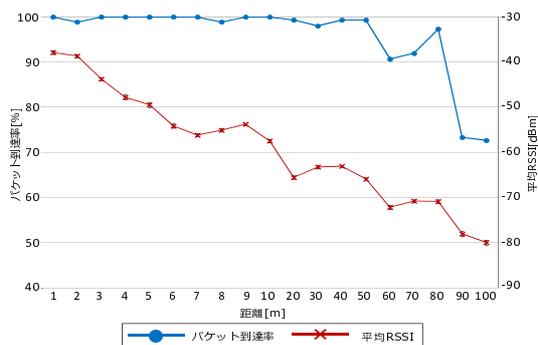


図 12 障害物がない空間でのパケット到達率および RSSI

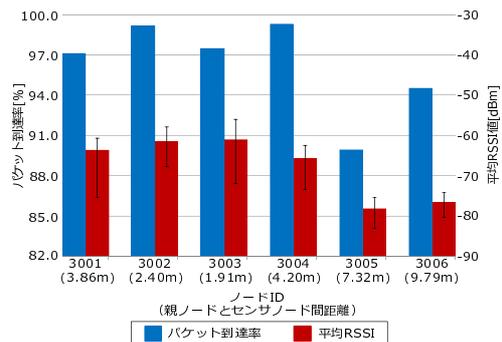


図 13 現場設置センサでのパケット到達率および RSSI

からクラウド上 DBMS にかけても 189 個 (同 0.06%) のセンシングデータの欠落が確認された。

センサノードから親ノード間でデータが欠落した要因の一つに、植物の畝や温室を区切るためのビニール製の内部被覆資材などの障害物による無線通信品質の低下が考えられた。図 6(a)の温湿度センサを障害物のない屋外空間に設置したときの距離による RSSI とパケット到達率の変化を図 12 に示す。距離に比例して RSSI が減少し、RSSI が $-70[\text{dBm}]$ を下回るとパケット到達率も低下するという関係性がある。一方、図 13 で示す本実験で現場設置した温湿度センサの RSSI と図 12 を比較すると、同一距離でも農業環境の方が RSSI は低下している。また、パケット到達率について図 12 と図 13 から比較すると、現場設置センサの方はパケット到達率が障害物のない場所での結果より低くなり、特に 3005 番のセンサノードではパケット到達率に 10% 以上の差が生じている。つまり、農業環境では RSSI を低下させる環境要因が存在し、RSSI の低下によってパケットロスが生じたものと考えられる。

図 14 は農業環境での RSSI 低下要因を分析するために温度、相対湿度のセンシングデータと夜間帯に温室を区切るビニール幕などの環境要因による RSSI およびパケット到達率の変化を示す。図 14 中の網掛けで示されたビニールによる内部被覆資材を使用している時間帯にデータ欠落数が増加し、また RSSI と相対湿度に正の相関関係がみられることから、無線通信がビニールと水分による影響を受けている可能性が考えられる。

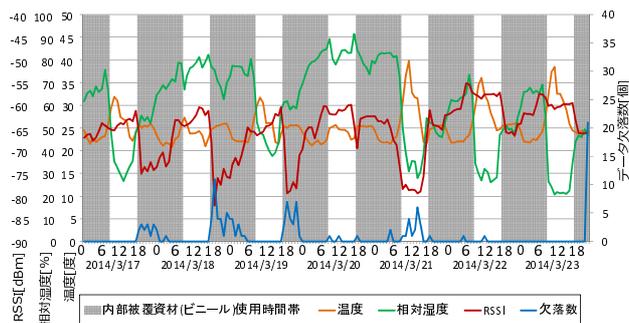


図 14 センシングデータとデータ到達率の時間推移

6. 電波暗室での詳細実験

6.1 実験内容

5.4 節で述べた無線通信に対するビニールおよび水分の影響について電波暗室で詳細実験を実施した。実験はセンサノードと親ノード間に障害物が無い場合、ビニールがある場合、ビニールに水滴が付着している場合、人間が立った場合の 4 つの環境でセンシングを行い、親ノードへのパケット到達率と RSSI によって環境要因が無線通信に与える影響を評価した。なお、RSSI は受信モジュールのチップ性能やアンテナ感度に依存するため、異なるチップを採用する無線モジュール間の単純な比較は行うことができない。そのため RSSI を同一の無線モジュールに対する環境変化による RSSI の推移で評価した。

また、無線モジュールや周波数帯の違いによる影響の変化も確認するため、2.4GHz 帯 IEEE802.15.4 規格の無線モジュール (アローセブ製) のほか、同じく 2.4GHz 帯を用いてタイムスロット方式と周波数ホッピング方式を採用する IEEE802.15.4e-TSCH の無線モジュール (Linear Technology 製) と、429MHz 帯 IEEE802.15.6 方式を適用した無線モジュール (のぞみ電子製) の 3 種類を使用した。

6.2 実験環境

実験は静岡大学創造科学技術大学院棟の電波暗室 (長辺 9.6m × 短辺 3.3m) 内で、各無線方式を採用するセンサノードと親ノードのペアをそれぞれ 1 組ずつ設置した。ノードの高さはフェージングの影響を考慮し、いずれも地上から 1.2m とし、ノード間距離は距離による伝搬損失による影響を考慮して図 12 の計測時の最短距離と同じ 1m とした。

6.3 実験結果

図 15 は環境要因の変化によるパケット到達率の変化を示し、図 16 は環境要因の変化による RSSI の変化を示している。図 15 および図 16 より、2.4GHz 帯を使用する IEEE802.15.4 規格および IEEE802.15.4e-TSCH はビニールや水滴、また人間が障害物となり、その影響を受けパケット到達率と RSSI の低下が発生している。一方 429MHz 帯

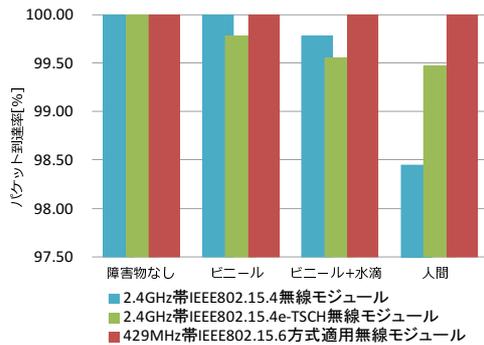


図 15 環境変化によるパケット到達率

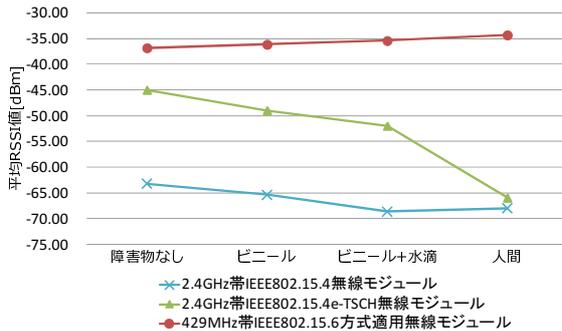


図 16 環境変化による RSSI

では RSSI の低下がみられず、2.4GHz 帯の無線モジュールでは最もパケット到達率が低かったノード間に人間が立った場合でも 249 個のパケット送信に対してパケット受信数が 249 個となりパケット到達率 100% を達成した。

周波数を低くすることにより RSSI とパケット到達率の低下が発生しなかったことについては、式 1.1 の自由空間伝搬損失モデル[8]と式 1.2 から、周波数 f を低くすることで受信電力 P_r が増大することが要因として挙げられる。

$$P_r = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi r)^2} P_t \quad (1.1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.2)$$

以上より、2.4GHz 帯は農業環境内のビニールによる内部被覆資材や多湿による結露や植物および土壌内に含まれる水分の影響を受け RSSI の低下やパケットロスが発生していたものと考えられる。その一方で 429MHz 帯では上記の現象が見られなかったことから、農業環境で 429MHz 帯無線通信を適用することでパケット到達率が向上しシステムの更なる高信頼化につながるものとする。

7. おわりに

本研究では、過酷な環境でも 99.99% 以上稼働する高信頼な双方向多点無線センサ/アクチュエータネットワークを提案し、プロトタイプとして農業向け環境制御システムを開発した。開発した農業向け環境制御システムによる温室内環境制御実験の結果、稼働期間中人為的なシステム停止

時を除いては不具合無くシステムが稼働することを確認した。一方、ノード間通信でセンシングデータの欠落が生じることを確認し、実験からビニールや水分が RSSI を低下させパケットロスが発生することを確認した。429MHz 帯では RSSI の低下やパケットロスが発生しなかったことから、農業環境での 429MHz 帯無線の使用に効果がある可能性を示すことができた。

今後、429MHz 帯無線モジュールを使用した WSN を現場環境で稼働させ実環境での評価を行う。また、予測制御などとの連携による知的アクチュエータ制御システムの実用化を目指す。

謝辞

本研究は、SCOPE 地域 ICT 振興型研究開発「高度農業 ICT を実現する高信頼双方向多点無線センサ/アクチュエータネットワークの研究開発 (H25~26)」により実施したものである。

参考文献

- 1) A. Matese, et al., "A wireless sensor network for precision viticulture: The NAV system", *Computers and Electronics in Agriculture* Vol.69, pp.51-58, 2009.
- 2) F.J. Pierce, et al, "Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 61, pp.32-43, 2008.
- 3) 星岳彦, "ユビキタス環境制御システムによる施設園芸生産の ICT 化", *農業情報研究* 17(1), pp.13-18, 2008.
- 4) FUJITSU Intelligent Society Solution 食・農クラウド Akisai 施設園芸 SaaS・施設環境制御 box (<http://jp.fujitsu.com/solutions/cloud/agri/uecs/>) (参照日 2014/04/30)
- 5) Camilli, Alberto, et al. "From wireless sensors to field mapping: Anatomy of an application for precision agriculture", *Computers and Electronics in Agriculture* 58.1, pp.25-36, 2007.
- 6) Huang, Jing, et al. "Development of a wireless soil sensor network", *Proceeding of the ASABE annual meeting 2008*, 2008.
- 7) Vellidis, George, et al. "A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation", *Computers and electronics in agriculture* 61.1, pp.44-50, 2008.
- 8) Vougioukas, S., et al. "Influence of foliage on radio path losses (PLs) for wireless sensor network (WSN) planning in orchards", *Biosystems Engineering* 114.4, pp.454-465, 2013.
- 9) Lance Doherty et al, "Towards 100% Reliability in Wireless Monitoring Networks", *ACM PE-WASUN*, pp.132-135, 2006.
- 10) B. Zhen, et al., "TG6 Technical Requirements Document(TRD)", *IEEE P802.15.08-0644-08-0006*, 2008.
- 11) Watteyne, Thomas, et al, "OpenWSN: a standards - based low - power wireless development environment", *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* 23.5, pp.480-493, 2012.
- 12) Young-Duk KIM et al, "RMRP: A Reliable MAC and Routing Protocol for Congestion IEEE 802.15.4 Based Wireless Sensor Networks", *IEICE Transactions on Communications vol.E96-B No.12*, pp.2998-3006, 2013.
- 13) Thelen, John, et al, "Radio wave propagation in potato fields", *Ist Workshop on Wireless Network Measurements*, Vol. 2, 2005.
- 14) 滝沢賢一, 他, "無線ボディアエリアネットワーク技術仕様の国際標準化動向", 平成 24 年度第 3 回医療電磁環境研究会, 2012.
- 15) IPA/SEC 重要インフラ情報システム信頼性研究会報告書 (<http://www.ipa.go.jp/files/000004741.pdf>) (参照日 2014/05/02)