

放射温度センサを利用した センサネットワークの基礎開発

田村 正敏^{1,a)} 村瀬 三寿希¹ 小川 智哉² 和田 拓也² 内藤 克浩^{1,b)}

概要：情報技術を活用した農業の中で、植物の成長度合いを推定することは、出庫時期の推定などにも応用できるため、様々な手法が研究されている。本研究では、植物の葉温が光合成の活性度に応じて変化する点に着目した成長度合いの推定システムのプロトタイプ開発を行う。葉温を測定するためには、何らかの手段で葉表面の温度測定を行う必要がある。非接触型の温度測定手法として、サーモグラフィーなどが知られているが、価格が高く圃場で多数利用するのは現実的ではない。そこで、本研究では放射温度アレイセンサを利用することにより、比較的安価なセンサを用いて、葉温の非接触測定を行う。開発したプロトタイプは、放射温度アレイセンサが接続されるセンサデバイス、情報を収集しクラウドサーバーに情報を中継するシンクデバイス、クラウドサーバー上の測定データを可視化するウェブサービスにより構成される。センサデバイスとシンクデバイス間では、独自のアクセス制御及び経路制御技術を採用しているため、省電力動作が可能となる。また、実証実験を通して、開発プロトタイプを用いて高信頼の温度測定が可能であることを明らかにする。

キーワード：センサネットワーク、放射温度センサ、圃場観測、TWE-LITE

1. はじめに

日本農業の特徴として、アメリカなどの広大な土地を用いた大量生産ではなく、付加価値の高い植物を少量生産することで利益を得ている。付加価値の高い植物を生産するためには、植物の成長状況及び圃場環境を把握することが重要となる。しかし、日本の圃場は小規模な圃場が多数ある場合が多く、各圃場の状況を頻繁に確認することは、大きな手間となっている。また、農業従事者の高齢化と人口減少に伴い、このような手間を惜しまない生産にも限界が見えてきている。近年では、このような問題を解決するため、農業に ICT を取り入れたスマート農業に注目が集まっている。スマート農業とは、「ロボット技術や ICT 等の先端技術を活用し、超省力化や高品質生産等を可能にする新たな農業」というものである [1]。

センサネットワークは、無線通信モジュール同士でネットワークを構成することにより、様々な植物及び圃場環境

の情報をセンシングするために利用されるスマート農業の一技術である [2], [3], [4]。また、センサネットワークには、インフラが整備されていない場所への設置を想定した省電力化を目指したシステム [5], [6], [7]、多数のノードを管理するためにネットワークの経路制御を効率的に行うシステムもあり [8], [9], [10]、様々な観点からセンサネットワークに関する研究は進められている。最近では、シンクノードがネットワーク内を移動することにより、センサノードからのデータ収集を効率化したモバイルシンクに関する研究も盛んに行われている [11], [12]。

圃場で収集される情報として、植物の成長度を推定するための葉温が着目されている。葉温は、赤外線カメラを用いることにより測定が可能であり、葉温を計測することにより気孔の状態を把握することが可能である。気孔では蒸散や呼吸、光合成などが行われているため、気孔の状態を把握することにより植物が正しく成長しているかを確認することが可能である。しかし、赤外線カメラは一般的な温度計に比べ高価であり、飛び地圃場に複数箇所の観測地点が必要な場合は、多額のコストが必要になる。

本研究では、赤外線カメラより安価な放射温度アレイセンサを利用したセンサネットワークの圃場への導入を提案する。放射温度センサは、赤外線カメラと比べて低解像度ではあるが、赤外線カメラに比べ安価であり、飛び地である

¹ 愛知工業大学情報科学部
Faculty of Information Science, Aichi Institute of Technology, Toyota, Aichi 470-0392, Japan

² 愛知工業大学経営情報科学研究科
Faculty of Departments and Graduate Schools, Aichi Institute of Technology, Nagoya, Aichi 464-0807, Japan

a) masatoshi-tamura@pluslab.org

b) naito@pluslab.org

ために複数箇所に設置することが前提である日本の圃場に
適していると考えられる。加えて飛び地圃場を管理する際
に、放射温度センサと無線通信モジュールを搭載したセン
サノードを圃場に設置し、センサノードの観測したデータ
を無線通信を行うことにより 1 箇所に収集する。これによ
り、離れた圃場の植物の葉温を視覚的に確認することが可
能になる。

2. 提案通信プロトコル

図 1 に、本研究で提案するセンサネットワークシステムの
概要図を示す。本研究では、パケット到着率の向上と、セ
ンサノードの省電力化を可能にする、圃場用マルチホッ
プネットワーク通信プロトコルを開発する。この通信プロ
トコルでは、独自のタイムフレームフォーマットを定義し、
ネットワーク内の全てのノードは、このタイムフレームに
従って動作することで、間欠動作やパケット衝突の回避な
どの MAC 制御を行う。

図 2 に開発したタイムフレームのフォーマットを示す。
本研究では、独自のタイムフレームフォーマットを定義す
ることによって通信を制御するスケジューリング方式を採
用している。タイムフレームフォーマットを利用した MAC
制御を実現するためには、ネットワーク内の全てのノード
が高精度なタイミング同期を行う必要がある。そのため、
本研究のタイムフレームフォーマットでは、最初にネット
ワーク内の時間同期を行う時間同期スロットが定義されて
いる。ネットワーク内の時間同期を終えると、ネットワ
ーク内の全てのノードがタイムフレームフォーマットに従
って動作可能になる。

時間同期スロットを終えると、ネットワーク内での経路
制御パケットの交換が可能になるため、ツリー型ネットワ
ークを構成するための経路制御スロットが開始される。経
路制御スロットでは、制御パケットの抑制や効率的なデー
タ通信を可能にするため、ツリー型ネットワークを構成す
るための経路制御を行う。ツリー型ネットワークを構成す
ることにより、ネットワーク内の全てのノードの経路情報
を保持せずに、自身の親ノードと子ノードの経路情報を
保持するだけで経路制御を可能にし、制御パケットの抑
制を可能にしている。

経路制御スロットを終えて全てのノードによりツリー
型ネットワークが構成されると、観測データの送信が可能
になる。そのため、経路制御スロットの次にデータ通信ス
ロットを開始することで、シンクノードにて観測データの
収集が可能にしている。以下に、時間同期スロット、経路
制御スロット、データ通信スロットの 3 つの詳細について
説明する。

2.1 時間同期スロット

図 3 に時間同期スロットでの動作例を示す。時間同期ス

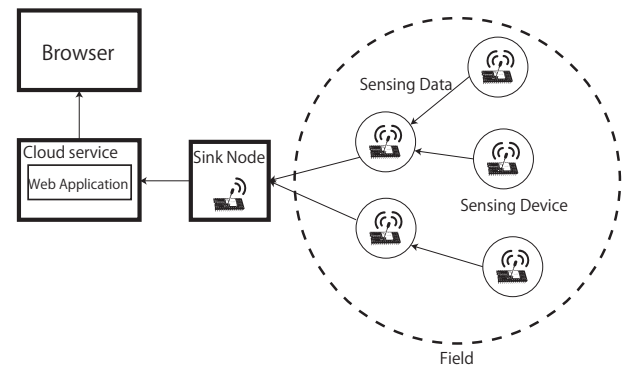


図 1 Sensor system

ロットでは、シンクノードからネットワークの経過時間情
報が格納された Tsync(Time synchronization) パケットを
自身の子ノードに送信する。Tsync パケットを受け取った
子ノードは、パケット内の経過時間情報と伝搬遅延時間か
ら親ノードと時間同期を行う。その後、Tsync パケットを
受け取った子ノードは更に自身の子に Tsync パケットを中
継する。これをツリー型ネットワークの末端ノードまで繰
返し行うことにより、ネットワーク内の時間同期を可能に
している。

2.2 経路制御スロット

図 4 に経路制御スロットの動作例を示す。経路制御ス
ロットでは、効率的なツリー型ネットワークを構成するた
め、シンクノードまでのホップ数を考慮した経路制御を行
う。経路制御スロットは、RREQ(Route REQuest) スロッ
ト、RREP(Route REPLY) スロット、RCON (Route CON-
struction) スロットの 3 つに分類されている。以下に各ス
ロットについて説明する。

- RREQ スロット

RREQ スロットでは、経路情報を持たないノードが、
経路要求のブロードキャストを行う。経路情報を持た
ないノードが経路要求を受信した場合、その経路要求
を破棄する。経路情報を持つノードが受信した場合、送
信元ノードと経路構築を行うため、RREP スロットを
用いて返信を行う。

- RREP スロット

RREP スロットでは、RREQ スロット内で経路要求
を受信したノードが、送信元ノードへユニキャストで
経路応答を行う。送信元ノードには、複数の経路応答が
送信されてくる場合があるが、その際はシンクノード
までのホップ数を考慮して経路構築を行う親候補ノ
ードを選択する。この時点で、一時的な経路構築が完了
する。

- RCON スロット

パケットが途中で消失した場合の一方方向による
経路構築を防ぎ、双方向による確実な経路構築

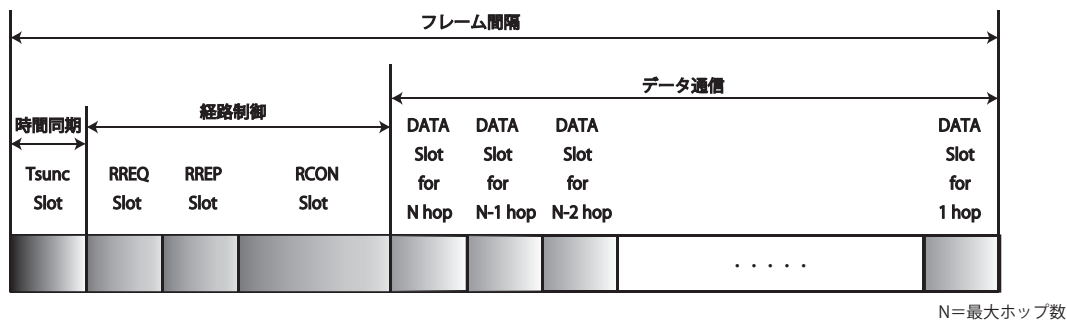


図 2 Time frame format

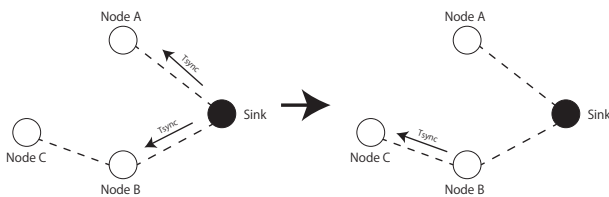


図 3 Time synchronization example

築を実現するために RCON スロットを設けている。RCON スロット内では,RCREQ(Route Construction REQuest),RCREP(Route Construction REPLY),RCACK(Route Construction ACKnowledgement) の 3 種類のパケットを交換することにより,経路構築を完了する。

RCREQ スロットでは,RREP スロットで選択された親ノードに RCREQ パケットをユニキャストする。RCREQ パケットを受信した親候補ノードは,経路要求元ノードのアドレスを子ノードとして記録し,同スロットにおいて RCREP パケットをユニキャストで返信する。RCREP パケットを受信した子ノードは,親候補ノードのアドレスを親ノードとして記録し,親ノードのホップ数に 1 を足した値を自分のホップ数として記録する。そして,同スロットにおいて RCACK パケットを親ノードに向けてユニキャストで送信する。RCACK パケットを受信した親ノードは,送信元アドレスが子ノードとして登録されていることを確認し,経路構築を完了する。

2.3 データ通信スロット

図 5 にデータ通信スロットの動作例を示す。データ通信スロットでは,末端ノードからシンクノードまでの最大ホップ数を N と規定し, N 分割することによりデータ通信のタイミングを分散制御する。 N 分割された最初のスロットにおいて, N ホップのセンサノードは送信を開始する。また,順にホップ数の多いノードからデータパケットを送信する。この制御を行うことにより,同一ネットワークで発生するパケットの衝突回避を可能にしている。

データパケットはマルチホップしてシンクノードまで送

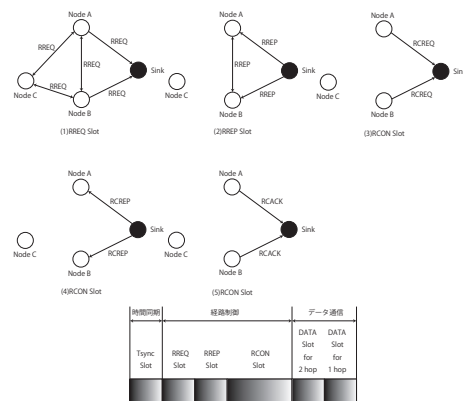


図 4 First routing example

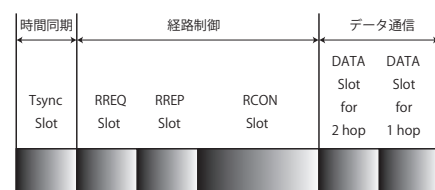
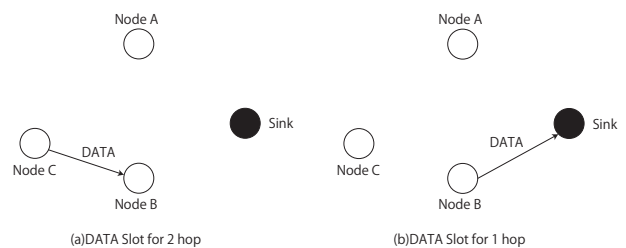


図 5 Data transmission example

信されるため,データの送信回数増加によるパケットロスが発生する確率も増加する。本研究では,データ送信時に確認応答要求を自身の親ノードに通知するよう設計している。親ノードは子ノードのデータパケットが到着した後,確認応答を子ノードに送信する。これにより,子ノードは自身のデータパケットが親ノードに送信したことを確認することが可能になる。子ノードのデータパケットが親ノードに到着せず損失した場合,子ノードに確認応答パケットが送信されない。この場合,子ノードは再度データパケットを親ノードに再送信する。再送制御により,データ通信の信頼性の向上を可能にしている。

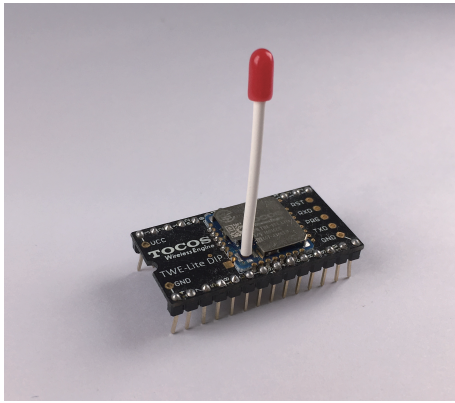


図 6 TWE-LITE DIP

無線通信規格	IEEE802.15.4 準拠
周波数帯	2.4GHz
通信速度	250kbps
通信範囲	1Km
消費電流	7.2mA

図 7 Specification of TWE-LITE DIP

3. 実装

3.1 仕様モジュール

本研究で開発したプロトタイプでは、無線通信モジュールに MONOWIRELESS 社製の TWE-LITE DIP を使用し、放射温度センサに Melexis 社製の MLX90620 を使用する。以下に、この 2 つのモジュールについて説明する。

- TWE-LITE DIP

図 6 に TWE-LITE DIP を、図 7 に TWE-LITE DIP の仕様を示す。TWE-LITE DIP は、IEEE802.15.4 の無線通信規格に準拠した無線マイコンモジュールである。通常時では 7.2mA 程度の消費電流で動作可能であるが、間欠動作の際のディープスリープ時には 0.1 μ A まで消費電流を抑えることが可能である。そのため、低消費電力で動作が可能であり、コイン電池で年単位の動作が可能である。通信範囲も非常に広く、マイコンに小型のアンテナをつけることで 1km 程度の距離であれば通信可能である。通信速度は 250kbps と低速ではあるが、圃場で定期的にデータの送受信を行う程度では十分である。

TWE-LITE DIP は、1 つのチップでマイコンとしての役割や、無線通信機能などを搭載した SoC(System-on-a-chip) で設計されている。マイコンとしての機能と無線通信機能を兼ね備えることにより、外部の無線通信モジュールを必要とせず、デバイスの小型化や無駄な通信手順などを省くことが可能になる。

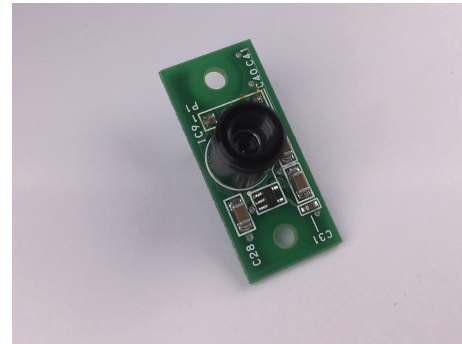


図 8 放射温度センサ (MLX90620)

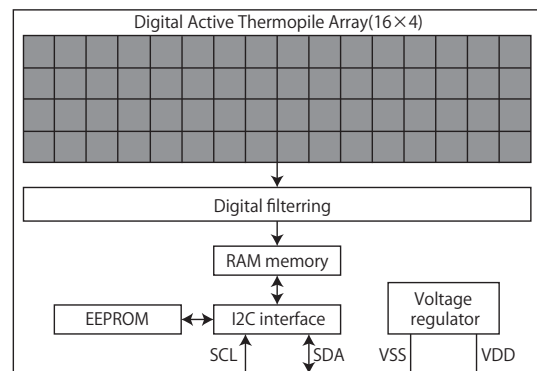


図 9 MLX90620 ブロック図

- MLX90620

図 8 に MLX90620 を示す。MLX90620 は、16 × 4 のピクセルに分けて対象物の温度を認識する放射温度アレイセンサである。電源電圧は 2.6V 程度で、9mA 未満の消費電流で動作可能である。MLX90620 は対象物の温度だけでなく、PTAT(Proportional To Absolute Temperature sensor) として周囲の気温も計測可能である。対象物の温度は -50 度 ~ 300 度まで計測可能であり、周囲の気温は -40 度 ~ 85 度まで計測可能である。

図 9 に MLX90620 のシステムブロック図を示す。TWE-LITE DIP と MLX90620 との通信は I2C 通信によって行われる。SCL(Serial CLock) と SDA(Serial DAta) には、それぞれプルアップ抵抗を接続する。MLX90620 には I2C インターフェイスが存在し、放射温度情報を取得し保持する RAM、及び取得した放射温度情報を変換するためのテーブルデータが格納された EEPROM にアクセスする際に使用される。TWE-LITE DIP は I2C インターフェイスにアクセスすることにより、放射温度情報を取得することが可能である。

3.2 ハードウェア設計

- シンクノード

図 10 に開発したシンクノードを示す。シンクノードでは、無線通信を行う TWE-LITE DIP に加えて、Atmel 2560 を搭載した独自の Arduino 互換ボードを接

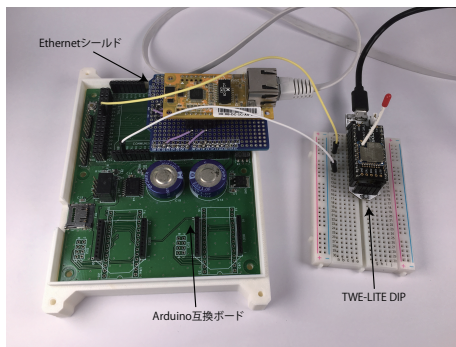


図 10 Sink node

続している。TWE-LITE DIP は、センサノードから送信されてきた観測データを受信し、シリアル通信により独自ボードに観測データを送信する。独自ボードには Ethernet シールドが搭載されており、PC と Ethernet ケーブルで接続することにより、TWE-LITE DIP からシリアル通信で送信されてきた観測データをクラウドに送信し、クラウド上の情報を PC 上のブラウザに表示することを可能にしている。図 11 にブラウザに表示した観測データを示す。

- センサノード

図 12 に開発したセンサノードを示す。センサノードでは、ユニバーサル基板上に 2.4V のバッテリーと TWE-LITE DIP、そして MLX90620 などのセンサを接続可能にした独自ボードを開発した。しかし、TWE-LITE DIP 及び MLX90620 は 2.4V では動作しないため、バッテリーの電圧を DC-DC コンバータを用いて昇圧し、TWE-LITE DIP 及び MLX90620 を動作させている。

3.3 タイムフレームフォーマットの実装

TWE-Lite DIP では、ToCoNet と呼ばれるソフトウェアが使用されている。そして ToCoNet を利用するための開発者用のソフトウェア開発環境として、ToCoNetSDK が提供されている。この ToCoNetSDK を利用することにより、TWE-Lite DIP 上で様々なセンサを扱うことや、通信プロトコルの開発が可能になる。本研究では、ToCoNetSDK と統合開発環境 Eclipse 利用し、C 言語による開発を行う。

TWE-LITE DIP は、図 13 の様なイベント駆動で動作している。本研究では、図 13 の動作フローにあるユーザ定義関数とパケット受信関数を拡張することにより、通信プロトコルで使用されるタイムフレームフォーマットを実現する。図 14 に拡張した実装の動作フローを示す。

ユーザ定義関数では、TWE-LITE DIP の内部タイマによる割り込み処理が 4ms 毎に行われており、その度に自身の経過時間情報を元に現在のタイムフレーム判定を行い、タイムフレームフォーマットに応じたパケットの送信や間欠動作を行う。

パケット受信関数では、ユーザ定義関数で送信されたパケットを受信すると、パケットに付与されているパケット識別番号からパケットの判定を行い、各パケットの受信処理関数へ遷移する。そのため、各パケットの受信処理においては、タイムフレームフォーマットに関係なく処理されることになる。そこで、経路構築と時間同期が終了していないノードから送信される RREQ パケットを、時間外に受信した場合、当該パケットを破棄する実装とした。

3.4 通信プロトコルの実装

- 時間同期スロット

時間同期スロットは、ユーザ定義イベント関数内の T_{sync} パケット送信関数と、パケット受信関数内の T_{sync} パケット受信関数によって行われる。時間同期スロットでは、自身のフレーム内の時間情報とシーケンス番号を格納した T_{sync} パケットをネットワーク内にブロードキャストする。 T_{sync} パケットを受け取ったノードは、 T_{sync} パケット受信関数にて、 T_{sync} パケットのシーケンス番号を参照し、新しいものであれば自身の時間情報と伝播遅延時間を元に時間情報の更新を行う。この伝播遅延時間は、別途時間同期を行うプログラムを用意し計測を行ったところ、10ms 程度であることを確認した。

- 経路制御スロット

経路制御スロットは、ユーザ定義イベント関数内の RREQ、RREP、RCREQ パケット送信関数と、パケット受信関数内の RREQ、RREP、RCREQ、RCREP、RCACK パケット受信関数によって行われる。RCREP 及び RCACK パケット送信関数においては、RCREQ 及び RCREP パケット受信時にそのまま遷移するように設計している。

RREQ パケット送信関数では、RREQ パケットをネットワーク内にブロードキャストする。その後、RREQ パケットを受信した経路情報を持つノードと経路構築を行う。RREP 送信関数にて経路構築は行われるが、RREQ パケットは時間外に送信されてくることもあるため、現フレーム内で RREQ パケットを受信した場合のみ、そのノードと経路構築を行う。RREP パケット送信関数では、自身のシンクノードまでのホップ数を RREP パケットに格納し、RREP パケット受信関数にて以後の経路構築を行うノードを決定する。

RREQ 及び RREP パケット受信関数では、それぞれのパケット情報を一時的に記憶し、その後行われる RCREQ 及び RCREP パケット受信関数にて情報の確定を行う。この処理により、経路構築の途中でパケットの損失が発生し、片方のノードだけで経路構築が完了されることを防ぐことが可能になる。そのため、RREQ

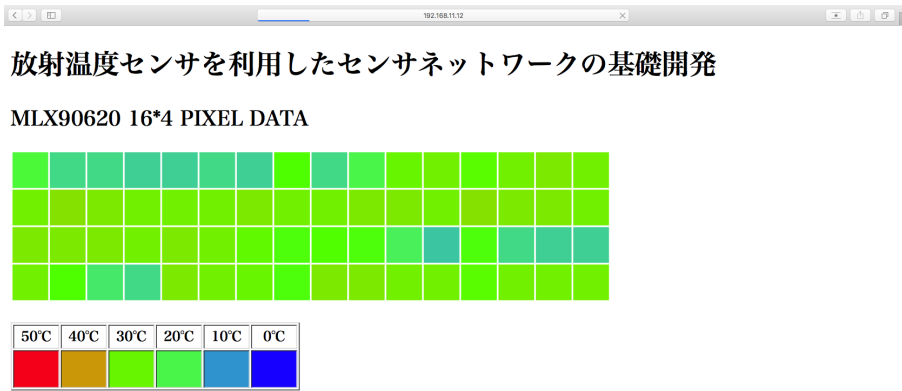


図 11 Observation data in browser

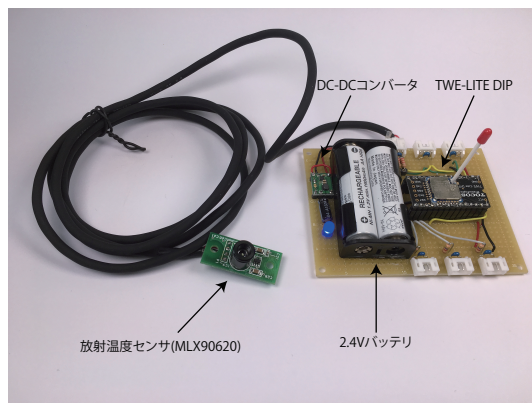


図 12 Sensor node

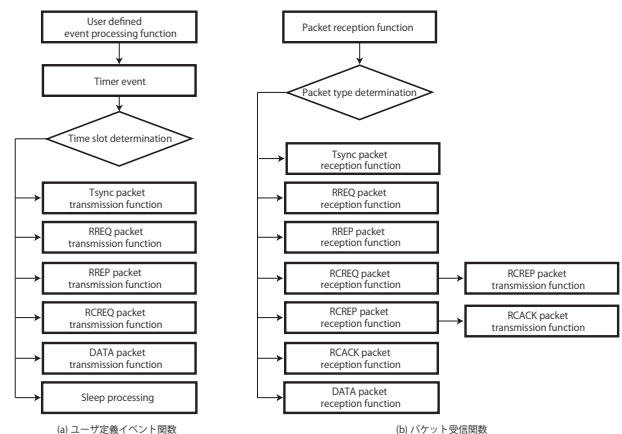


図 14 Extended flowchart

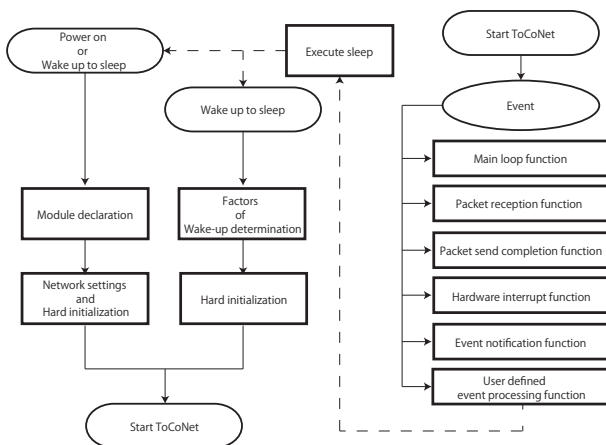


図 13 Basic Flowchart

及び RREP パケットの交換でパケットの損失が起きた場合には、一度経路情報を破棄し、再度経路構築を行うようにしている。

また、RCREP パケット受信時では、送信ノードのホップ数から自身のホップ数を算出し、経路情報を持

つノードとして、経路情報を持っていることを示すフラグを立てる。

RCACK パケット受信関数では、ルーティングテーブルに RCACK パケット送信ノードが登録されていることを確認する。

● データ通信スロット

データ通信スロットは、ユーザ定義イベント関数内のデータパケット送信関数と、パケット受信関数内のデータパケット受信関数にて行われる。データ通信スロットでは、末端のセンサノードからデータパケットが送信され、マルチホップを行うことによりシンクノードまでデータパケットを送信している。そのため、現在のフレームにおいて自身がデータを送信するタイミングでない時には間欠動作を行う。

このデータパケットを中継するノードでは、データパケットを複数受信している場合、一時的にデータをバッファに保持する。そして自身のデータの送信のタイミングになると、データパケットを送信する。このと

周波数帯	2.4GHz
送信出力	2.5dBm
計測回数	250 回
センサノード数	6 個

図 15 Experimental data

き、ツリー型トポロジの中央付近のノードでは、過剰なデータ送信により衝突の可能性が高くなる。そこで、送信タイミングを分散させるために一定の遅延時間を設けている。データを送信した後は、バッファに格納したデータパケットは削除している。なお、データパケットを送信する際には、ToCoNetSDK にある確認応答機能を利用し、データパケットが親ノードに到達しなかった場合に再送処理を行う制御をしている。

4. 実験

本実験では、本研究で開発した通信プロトコルを利用して、ネットワーク内のセンサノードが、どの程度のパケット到着率でシンクノードまでセンシングデータを転送可能なのか実験を行い、その評価を行う。また本実験では、データ通信スロット内で実装されている確認応答機能による再送処理により、どれほどパケット到着率の向上が可能であるか検証するため、再送処理を行わない場合と、再送処理を 1 回行う場合、そして再送処理を 2 回行う場合の 3 つの条件に分けて実験を行った。図 15 に本実験の諸元を示す。

実験は、ネットワーク内の全てのセンサノードが経路構築を終えて、シンクノードから計測開始パケットをブロードキャストしてから開始される。図 16 に実験の際に構築されたツリー型ネットワークを示す。各センサノードは、シンクノードへのデータパケットの送信回数を記録する。シンクノードでは、各センサノードのデータパケット到着回数を記録しておく。センサノードは実験回数分データパケットを送信すると、シンクノードに計測終了を通知する。そしてシンクノードにて、その時点でのパケット受信回数と、そのセンサノードのパケット送信回数を元にパケット到着回数を算出する。

図 17 にそれぞれの実験結果を示す。再送処理が行われない場合には、全体的にパケット到着率が低く、Node1 のみがパケット到着率が 90 % を超えるという結果になった。再送処理回数が 1 回の場合では、パケット到着率の平均が 90 % を下回り、加えてパケット到着率が全体的にホップ数に依存せず安定していないことが確認された。対して再送処理回数が 2 回の場合では、パケット到着率の平均は 97 % を超え、Node6 以外でパケット到着率がホップ数に依存しており、概ね想定した結果を得ることができた。この実験結果から、データ通信スロットに再送処理を導入することに明らかな優位性があることを確認した。

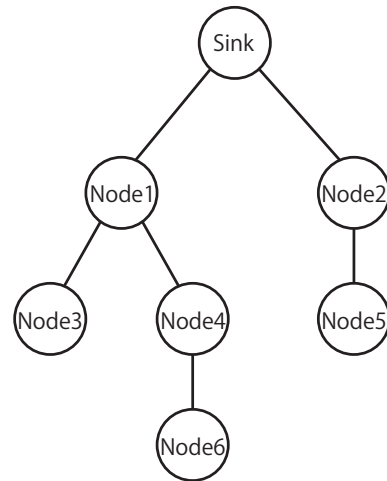


図 16 Experimental tree network

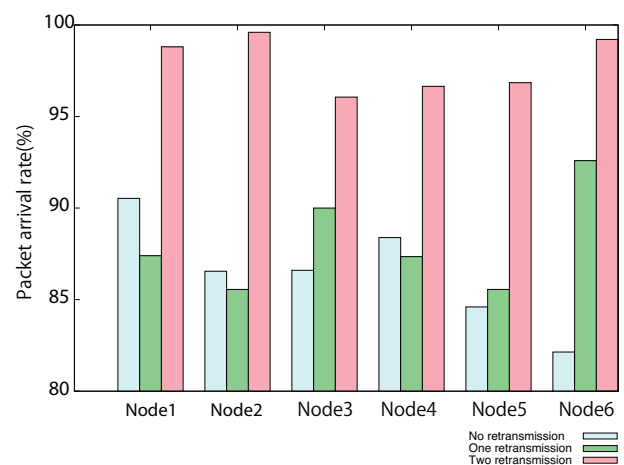


図 17 Experimental result

5. まとめ

本研究では、放射温度アレイセンサを利用したセンサネットワークのプロトタイプを開発した。本研究で開発したシステムを利用することにより、遠隔地でも視覚的に植物の葉温を観測することが可能であることが明らかになった。また、本研究で開発した通信プロトコルの MAC 制御及び経路制御を行うことにより、省電力且つ安定したデータの通信が行えることが確認された。今後の展望として、TWE-LITE DIP では最大で 127 バイト程度のパケットでしか通信を行えないため、パケットを分割することによりサイズの大きいパケットでも通信を可能にするスケジューリング方式の通信プロトコルの開発を計画している。

謝辞 本研究の一部は科研費 (15H02697, 17K00142) の助成を受けたものである。記して謝意を表す。

参考文献

[1] 農林水産省, スマート農業の実現に向けた研究会, http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g_smart_nougyo/, 2013.

- [2] 平藤雅之, 世一秀雄, 三木悠吾, 木浦卓治, 深津時広, 田中慶, 松本恵子, 星典宏, 根角博久, 澁谷幸憲, オープン・ワールドサーバ及びセンサクラウド・システムの開発, 農業情報研究, Vol.22, 2013.
- [3] Langendoen, Koen, Aline Baggio, and Otto Visser, Murphy loves potatoes: Experiences from a pilot sensor network deployment in precision agriculture, Parallel and Distributed Processing Symposium 2006.
- [4] Prabhu, SR Boselin, et al. "Environmental monitoring and greenhouse control by distributed sensor Network." International Journal of Advanced Networking and Applications 5.5 2014.
- [5] Anas Bushnag, Ali Alessa, Minzhi Li, and Khaled ELleithy. Directed diffusion based on weighted grover 's quantum algorithm (dwgq). In Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), 2015 IEEE Long Island, pp. 1-5, July 2015.
- [6] Noor Zaman, Tung Jang Low, T. Alghamdi, " Energy efficient routing protocol for wireless sensor network, "2014 16th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), pp.808-814, 16-19 Feb. 2014
- [7] Liu, Tian-hua, Si-chao Yi, and Xiao-wei Wang. "A fault management protocol for low-energy and efficient wireless sensor networks." J. Inf. Hiding Multimedia Signal Process 4.1 2013.
- [8] Jack Culpepper, Lan Dung, and Melody Moh. Hybrid indirect transmissions (hit) for data gathering in wireless micro sensor networks with biomedical applications. In Computer Communications, 2003. CCW 2003. Proceedings. 2003 IEEE 18th Annual Workshop on, pp. 124-133, October 2003.
- [9] Hoque, A. K. M., et al. "NLSR: named-data link state routing protocol." Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM workshop on Information-centric networking. ACM, 2013.
- [10] Kiani, Farzad, et al. "Efficient intelligent energy routing protocol in wireless sensor networks." International Journal of Distributed Sensor Networks 11.3 2015.
- [11] Tunca, Can, et al. "Distributed mobile sink routing for wireless sensor networks: A survey." IEEE communications surveys & tutorials 16.2 2014.
- [12] Khan, Abdul Waheed, et al. "VGDRA: a virtual grid-based dynamic routes adjustment scheme for mobile sink-based wireless sensor networks." IEEE Sensors Journal 15.1 2015.