

# 疎密センサネットワークにおける超音波センサを用いたアクティブウェイクアップ型すれ違い通信の提案と実装

中野 達彦<sup>1</sup> 田頭 茂明<sup>2</sup> 荒川 豊<sup>3</sup> 福田 晃<sup>4</sup>

## 概要：

本論文では、センサの密度が疎でセンサ間のアドホック通信が困難な疎密センサネットワーク（SWSN: Sparse Wireless Sensor Network）を対象とし、移動ノードの接近を検出した場合に限りセンサノードを起動し通信を行うアクティブウェイクアップ型すれ違い通信を提案する。アクティブウェイクアップ型のSWSNは、移動ノードの巡回サイクルがランダムである場合、Low Duty Cycle型のSWSNと比較して消費電力が小さいと考えられるが、移動ノードの通過時間という短い間に実際にデータ通信を行えるかが不明確である。そこで今回、アクティブウェイクアップのトリガーとして消費電力の低い超音波センサを用いたセンサノードを作成し、農場でフィールド実験を行い、超音波センサの設置角による移動ノードの検知率や通信可能時間を検証した。その結果、設置角によって、通信時間（検知時間）と検知率が変化するものの、少なくとも10km/hでのすれ違い通信で約20秒間、20km/hでのすれ違い通信で約10秒間、安定的な通信が可能であることを確認した。

## 1. はじめに

近年、農業のICT化に関する研究が盛んに行われている。これらの研究では、農家の勘と経験がその技術の大部分を占めていた旧来の農業に対して、ICT技術を利用して環境情報を収集、蓄積、分析することにより、臨機応変な農作業を可能とし、農産物の生産性を向上させることを目標としている。中でも本論文では、フィールドセンシングと呼ばれる、環境情報の収集と蓄積に関する部分に焦点を当てている。フィールドセンシングにおいて測量する環境情報として、気温や湿度、日射量、雨量、風向、風速などが挙げられる。

フィールドセンシングにおける重要な課題として、設置されたセンサノードへの給電と、設置されたセンサからのデータ収集という2つの課題がある。前者に関しては、広大な農場に電源ケーブルを敷設することはできないため、電池による長時間駆動、あるいはエナジーハーベスティング技術による半永続的な駆動が考えられる。我々は、将来的にはエナジーハーベスティングでの駆動を狙っているが、現在は太陽電池モジュールでの発電量測定などを行なっている段階であり、本論文の段階では電池駆動によってノードを作成している。いずれの場合も、センサノードは超低

消費電力で駆動することが要求条件となり、我々は様々な無線通信の中でも特に消費電力の低いZigBeeを用いたセンサネットワークを考えている。

そもそもセンサネットワークとはノード密度が高いネットワークと定義されており[1][2]、どのセンサノードも他の幾つかのセンサノードと相互に通信が可能で、シンクまでの通信経路を他のどのノードも所有するような距離に設置されることを前提として、アドホックなマルチホップ通信でデータを収集している。そのため、従来の研究では、マルチホップ通信における省電力なデータ転送方式といった研究が多い[3][4][5]。

それに対して、我々が想定する農場でのフィールドセンシングでは、必ずしもこの前提が成り立たない場合がある。その理由は、フィールドセンシングでセンシングする気温や湿度といった情報が、位置によってそれほど大きく変化する値ではないため、広大な農場に対して数個のセンサを設置するだけで良いためである。現在、700×500m<sup>2</sup>の茶畑に対して、わずか3台のセンサノードを設置しており、各センサ間の距離は400m以上となる。このような疎密センサネットワーク（Sparse Wireless Sensor Network: SWSN）では、ノード間でのマルチホップ通信は期待できない。

SWSNにおいてデータ収集を行う方法として、有線LANケーブルを敷設して直接接続で回収する方法や、中継ノードを追加設置してマルチホップ通信でデータを収集する方法などが挙げられるが、有線LANケーブルには敷設コ

<sup>1</sup> 九州大学 大学院システム情報科学府

<sup>2</sup> 関西大学 総合情報学部

<sup>3</sup> 九州大学 大学院システム情報科学府, Department of Knowledge Management, German Research Center for Artificial Intelligence, Kaiserslautern, Germany

<sup>4</sup> 九州大学 大学院システム情報科学府

ストと雑音の問題があり、中継ノードにはそのネットワークの面積が大きくなるほど必要な中継ノードの絶対数が肥大するという問題がある。そこで、一般的には、移動シンクあるいは移動中継ノード(リレーノード)を用いたデータ収集手法が採用されている。代表的な手法としては、Data MULE(Mobile Ubiquitous LAN Extensions)[6]やMessage Ferry[7]がある。いずれの場合も、センサノードにとってはその移動体とのすれ違い時にデータ通信を行うことになるため、最近ではすれ違い通信によるデータ収集手法(Opportunistic Communication)[8]などとも呼ばれることがある。

図1はData MULEのアーキテクチャを示している。Data MULEたるネットワークを構成するノードは、その特徴から3つに分類される。すべてのデータの集積地であるノードはAP層と、移動ノードはMULE層と、そしてそれ以外のセンサ層である。移動体はMULEと呼ばれ、車や人、動物など移動しうるもの全てを対象としている。MULEの移動に規則性はなく、完全にランダムである。図1のMULEの移動の軌跡はほんの一例である。また、互いに通信経路が存在するセンサ群はクラスターとなり、そのクラスターを代表するノードにデータを収集し、そのノードがすれ違い通信を行って効率化を図ることもある[9]。

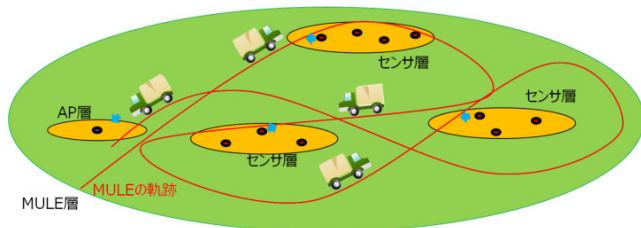


図1 Data MULE ネットワークアーキテクチャ

Data MULEを含め、センサネットワークではノードの省電力化のために、センシング時以外は基本的にスリープ動作に遷移し、センシング時のみ起動するという仕組みが取り入れられている。この仕組みは、自らのタイマーによる制御によって定期的にウェイクアップするLow Duty Cycle型(LDC型)と、外部からの物理的な信号によってウェイクアップするActive Wakeup型(AW型)の2つに分類することができる。代表的なLDC型Data MULEとしては、文献[10],[11]などが挙げられ、これらは、図2に示すシーケンスのように、ウェイクアップ時にセンサノード、あるいはMULEが発信するビーコンを利用して通信可能であることを判定し、データ通信を生起する。そのため、ウェイクアップした際に、移動ノードがビーコンを受信できる距離にいない場合は通信ができない。その結果、図3に示すように、無駄なウェイクアップにより電力を消費してしまうという問題がある。

そこで、本論文では、LDC型ではなく、AW型のData MULEを提案し、そのための超音波センサを用いたAW手法の提案とセンサノードの試作、さらに農場における

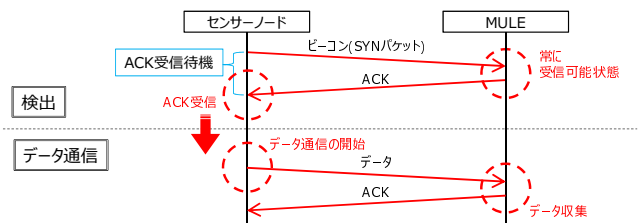


図2 LDC型すれ違い通信のシーケンス

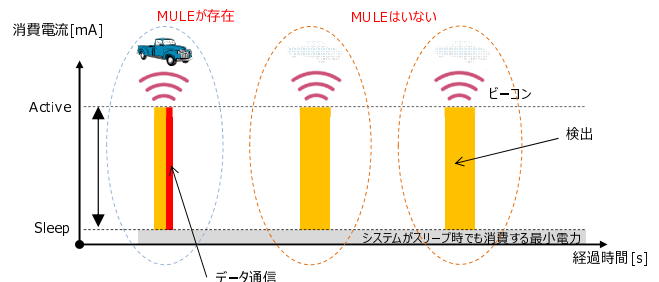


図3 LDC型検出手法の消費電力の問題点

フィールド実験結果を報告する。センサ本体を起動するための追加センサへの要求条件としては、消費電流が極めて小さいことと低コストであることが重要である。そこで、我々は、入手可能なセンサとして、モーションセンサ、RFレーザ、RFIDなどのセンサを比較した。その結果、消費電力の観点では、RFレーザやRFIDが適しているが、コストの観点からモーションセンサ、特に超音波を用いたセンサが適していると判断した。ただし、超音波センサは外乱の影響があることや指向性があるため設置角の検討が必要であるという課題があるため、実際にノードを作成した上で、フィールド実験を行った。

フィールド実験では、自動車内にデータ収集ノードを固定し、路上に設置したセンサの横を通過した際にデータ収集を行い、データ通信の生起確率および平均通信可能時間の計測、通信路の安定性調査を行った。その際、超音波センサの設置角を調整し、移動ノードの検知率と平均通信可能時間の関係も明らかにした。

その結果、超音波を用いたセンサによるAW型のすれ違い通信において、移動ノードが10km/hで移動した場合約20秒、20km/hで移動した場合約10秒の安定した通信時間を確保できることを示した。これらの結果は、フィールド実験の前に行った計算機シミュレーションでの見積りとも一致しており、超音波センサを用いたAW型すれ違い通信が実現可能であることを明らかにした。

以降、第2章において想定環境について説明し、第3章において外部センサの検討について詳細に説明する。そして第4章で提案方式について説明し、第5章においてフィールド実験の結果を示す。

## 2. 茶畑におけるフィールドセンシングについて

我々はワイヤレスセンサネットワークを茶畑に適用し、

フィールドセンシングを行い、これらのデータを統計的に分析することで茶畑におけるノウハウの定量化を行おうと画策している。具体的には、霜の降り得る環境条件の分析である。茶には、新芽時に霜が降りると品質が落ちるといいう問題があるため、防霜ファンを動作させこれを防止する必要があるのだが、従来では霜が降りたという事実を確認してから動作させる場合や、極論で言えば農家の長年の経験から来る勘で事前に動作させる場合が大半を占めていた。しかし、霜が降りてからでは防霜ファンの効果も限定的なものでしかない上、勘ではその技術の継承が難しい。フィールドセンシングによって、霜の降りる環境条件の分析（ノウハウの定量化）を行い、その結果未然に霜を防止することができ、防霜ファンの効果を最大限引き出す事になる。現在はセンサノードを3つ、茶畑に設置してフィールドセンシングを行なっている。これらセンサノードには各々温度センサが3つ搭載され、地上80cm、5m、地下50cmに設置されている。これらのセンサが取得したデータは、土中と地表、上空の気温の違いを示し、その情報は農作物に霜が降りる時機を示しうる目的の情報となる。また、気温だけではこの情報を明確にできない可能性も十分にありえることから、他にも湿度センサや日射量センサを搭載している。図4はそのセンサノードである。

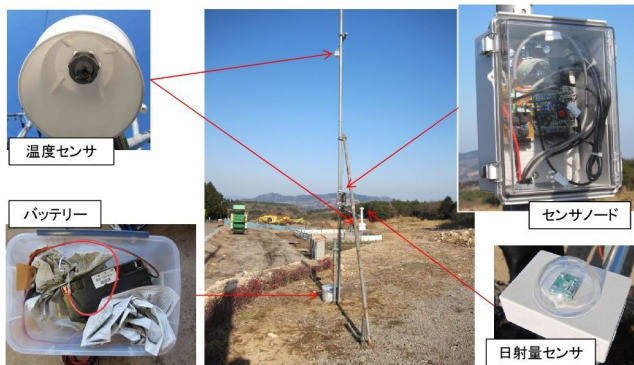


図4 設置しているセンサノードの構成

### 3. AWを実現するための追加センサについて

AWを実現するための追加センサを決定するため、モーションセンサ（超音波と赤外線）、RF レシーバ、RFID などのセンサを比較した。

#### 3.1 モーションセンサ

モーションセンサとは監視可能な空間の変動の検出を実現するセンサである。例えば超音波センサや赤外線センサがある。これらのセンサは指向性のある視野を超音波や赤外線といった反射性のある波で構築し、その視野の内部の物体が移動したことによる反射波の変動を感知することでセンシングを行なっている。その動作原理はすれ違いの検出に等しい。ただし、検知する物体の大きさは適度に必要であり、小さい物体では検知できない。モーションセンサ

を使用したアプリケーションの例としてはパーキングセンサ [12] などがある。しかし、これらのどの場合においても電源が確保できるという前提があるため、今回の内容とは趣旨が異なる。外乱の除去や判定値の選択方法などの技術的要素は参考になるが、比較的消費電力が高いため省電力化には向かない。

モーションセンサを使用した場合のウェイクアップシステムの構造は図5のようになり、路上に設置されたセンサ側から近づいてくる移動ノードを検知する。この方式を用いる場合、単純なものではあるが、モーションセンサのすれ違い検出判定処理を行う小規模の回路が必要となる。また、モーションセンサとこの回路の動作に多少の電力を消費することになる。従ってウェイクアップシステムをモーションセンサで実現するには、メインシステムの省電力化規模とモーションセンサの動作電力の面での検討が必要となる。

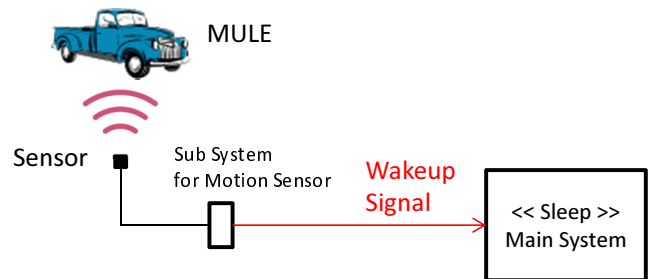


図5 モーションセンサによる AW システム

#### 3.2 RF レシーバ

RF レシーバとは無線による遠隔ウェイクアップ制御が出来る専用モジュールのことを指すが、最近では Ultra Low-Power Wakeup Module などとも呼ばれている。RF レシーバを用いたアクティブウェイクアップシステムを図6に示すが、原理的には、制御する側が前もって登録しておいた内容の packets を無線通信で送信し、RF レシーバはそれを受信後同調し、ID マッチングを行なって自分宛の packet であることを確信して、ウェイクアップの制御を行う。RF レシーバはアンテナ次第でモーションセンサや RFID に存在するような検出指向性を解消できる。また、無線通信機能がウェイクアップ信号を受信するという事に絞られるため、消費電力はかなり低い。しかし、ウェイクアップモジュールとして製品化されているものは現時点では確認できなかったため、現時点での実用化は困難だと判断する。また、現在研究中であるモジュールもその多くが据え置きの使用を想定しており、すれ違い通信のような移動通信でも可能か否かは実験して調査してみる以外不明である。

一方、純粋に RF レシーバと謳っていないモジュールも RF レシーバとして機能しうるものも存在する。例えば Powercast 社の P1110 などは RF パワーハーベスタと呼ばれる環境電波を用いて充電するモジュールであるが、この

モジュールを RF レシーバとして転用することも可能だと予測している。このモジュールの特徴は、電源を必要としないため消費電力は 0 であることや、DC に変換する周波数帯の対象を 800 ~ 900MHz の電波を対象としていることなどがある。最近ではスマートフォンを用いたすれ違い通信によるデータ収集の試みもあり [13], パワーハーベスタを使用した環境発電に関する実験を行った例も存在している [14]。今回、スマートフォンの 3G の電波で P1110 を利用してウェイクアップ制御ができないか検討したが、携帯電話は 3G でも周波数帯を適宜変えながら通信を行なっているため困難だと判断した。また、周波数帯がデバイスや法に適合しないため単純に適用することは難しいという問題もある。

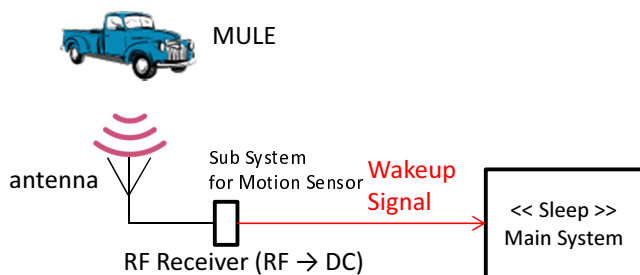


図 6 RF レシーバによる AW システム

### 3.3 RFID

RFID は NFC など で用いられている電波による ID 識別技術である。自ら電波を発信できるか否かという観点で RFID はアクティブタグとパッシブタグの 2 つに分類され、アクティブタグは電池を内蔵しているため高性能だが 1 個あたりのコストが高く、パッシブタグは電磁誘導で電力を得るため電池を必要としないが性能は低い。NFC など一般的に多く用いられているのはパッシブタグである。

例えば NFC は電磁誘導方式であるため距離は短い。しかし電波方式の RFID ならば数 m 程度の距離でも可能だと予想される。ただし指向性などの問題があるため、すれ違い通信への適用は困難を極める可能性もあるが現状は不明である。

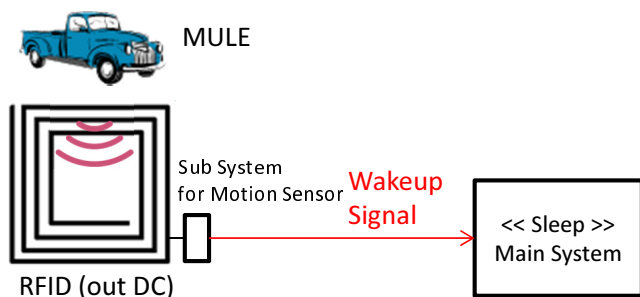


図 7 RFID による AW システム

### 3.4 3 手法の比較

モーションセンサ、RF レシーバ、RFID の 3 つの手法の特性を比較した結果を表 1 に示す。消費電力的には RFID や RF レシーバが好ましいが、欠点として現段階では初期コストが高いということがある。これは、これらがまだ一般的ではなく運用レベルでの実用化がなされていないためであり、今後の技術革新でこれらによる MULE 近接の検知が容易に可能となると予想できるが、現段階では超音波などのモーションセンサが適していると判断した。さらにモーションセンサの中でも、今回の実験環境が屋外であることを考慮すると、太陽光の外乱を受ける可能性が大きい赤外線センサではなく、超音波センサを採用した。

## 4. 提案手法

本章では、我々が提案する超音波センサを用いた AW 型すれ違い通信について説明する。提案システムでは、通常のセンサ本体に加えて、その本体を起動するための追加センサとして超音波を用いたモーションセンサを搭載している。以降の節において、追加センサを用いたノード検知手法およびそれに伴うセンサ本体の仕様について説明する。

### 4.1 超音波センサを用いたすれ違いの検知について

超音波センサを用いたすれ違い通信の検出における主な処理は、センサの値が閾値を下回るか否かを判定することである。この検出を繰り返し行うことですれ違いの検出が常時可能となる。この点において重要なポイントは、検出の閾値と周期である。

閾値は事前に決定しておかなければならないが、超音波は気温や湿度の影響を受けるため、厳しい閾値を設定すると、時として検知できない可能性がある。また超音波から得られる情報が雑音が含まれることがあるが、雑音はローパスフィルタによって除去が可能である。しかし、すれ違いの速度が大きい時に正しい値も除去してしまう恐れがあるため、事実上反射面が凹凸であるに発生する乱反射した値は対策不可能である。一般的に超音波センサは検出可能な物体との距離を返し、そのような物体が存在しないときは最大検出距離を返す。例えば 6m 先までの検出が可能な超音波センサならば、2m 地点に物体があれば 2m を、何もないならば 6m を返すことになる。この閾値の決定は、適用環境の事前調査から得たすれ違い時の超音波センサの値、雑音の程度、すれ違いの速度等を判断基準に基づいて行うべきである。

また、周期の決定では超音波センサのデータの取得間隔を考慮しなければならない。超音波センサは反射した超音波の帰ってくる時間で距離の測定を行なっているため、値の出力は周期的、例えば 100ms 毎となる。超音波センサを LDC 動作化させれば更なる消費電力の削減が可能だが、その場合この周期よりも大きい周期しなければならない。その上、超音波センサによっては起動時に初期化処理が動作し直ぐに監視を開始できないこともある。

検出手法	消費電流 [ $\mu\text{A}$ ]	検出範囲	欠点
超音波センサ	$O(10^4)$	Close	外乱. 消費電流やや大.
赤外線センサ	$O(10^4)$	Close	指向性がある.
RF レシーバ	$O(10^1)$	Close	コスト大.
Active RFID	0 (電池内蔵)	Medium	コスト大. 電池交換が必要.
Passive RFID	0	Closer	コスト大. 指向性がある.

表 1 アクティブウェイクアップを実現できる技術の比較

#### 4.2 すれ違い検知後の通信路確立について

超音波センサを用いて MULE の近接を感知したセンサノードは、ただちに SYN パケットを送信し、通信路の確立を行う。MULE はセンサ層からの SYN パケットを常に受信できるようにシステムの状態を設定しておく。MULE は自動車に搭載してあり、電源を確保できるという前提の元、MULE 側の消費電力は考慮しない。SYN パケットを受信したら ACK を返し、データ受信待機状態に移務する。センサノードは、MULE からの ACK が帰ってきた場合、データ通信を開始する。

#### 4.3 センサノードの省電力化について

センサ層を構成する各センサノードは、すれ違い通信時以外はシステムの状態維持に最低限必要な機能を残し、それ以外、特に消費電力の高い機能を優先的にスリープさせて消費電力を削減する。

#### 4.4 センサノードにおける遅延型ウェイクアップについて

従来手法と提案手法の状態遷移をステートマシン図 8 で示している。

従来手法はシステムの状態を Sleep, Detections, Communications の 3 つに区分することができ、またそのうちの Detections, Communications の 2 つの状態をまとめて Active 状態と定義できる。Sleep 状態においてはすれ違いの検出が行えないため、周期的に Active 状態となりすれ違いの検出を行う必要があるが、センサノードにおいて通信モジュールの消費電力が最も大きくなることから、結果、図 9 のように周期的に大きな電力を浪費することとなる。

提案手法では、システムの状態を Sleep&Detections と Communications の 2 つに区分できる。すれ違いの検出をセンサノードの通信モジュール以外で行うため、Sleep 状態にすれ違い検出を組み込み事が可能となり、結果、Active 状態の占める割合が減ることになる。また、すれ違い検出に通信モジュールを使用しないため、図 9 のように一様に微小に電力を消費する形となり、総合的に消費電力を削減することが可能である。また、すれ違い検出で消費する電力は AW が実現可能なセンサの消費電力に依存するため、手法によっては限りなく小さくすることも可能である。従来手法では Detections 状態の直前に来ていたウェイクアップのタイミングが、提案手法では Detections 状態の後になるため、このようなウェイクアップを遅延型と定義している。

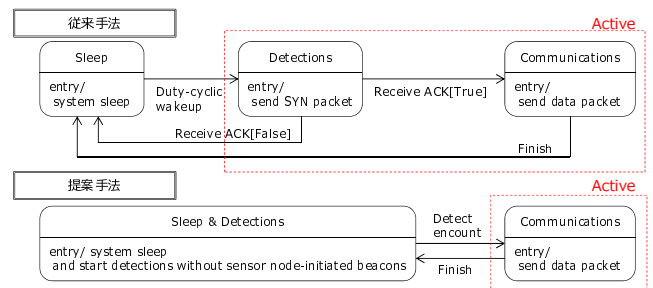


図 8 従来手法と提案手法のステートマシン

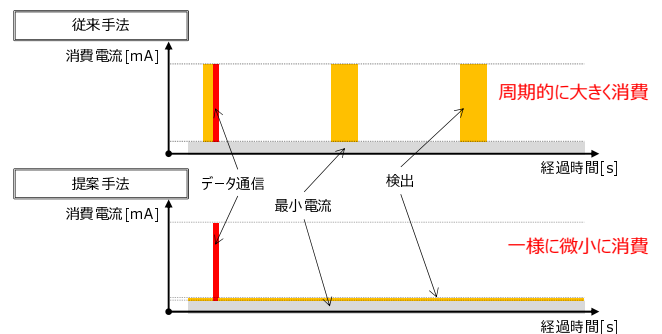


図 9 従来手法と提案手法の消費電流の時間的推移

### 5. 評価実験

本章では、提案システムが実環境でアクティブウェイクアップを実現し、通信が可能であることを検証するために行ったフィールド実験について説明する。ウェイクアップのための追加センサに関する消費電力を含め、提案センサネットワークの消費電力に関する評価は、今後行う予定であり、本論文では言及しない。また実験結果は、環境情報からシミュレートした予測に照らし合わせて評価した。

#### 5.1 実験環境

MULE として車を用い、ノードは車内に固定した。また、超音波センサを搭載したセンサノードは屋外に設置されているものとする。実際の実験環境を図 10 に示す。ここは大分県にある茶畑であり、我々はこの茶畑にセンサノードを複数台設置して気温や湿度、日射量のデータロギングを行なっている。

実験環境の事前調査より、すれ違い通信の実験環境をモデル化した。図 11 は実験環境の通信特性を示したものであり、その値は実測値である。通信安定領域はパケットロスが殆ど起こらず安定した通信が可能な領域を示し、通信可能領域はパケットロスが発生するものの再送処理を行う



図 10 実験環境

ことによりデータ通信が辛うじて可能な領域を示している。

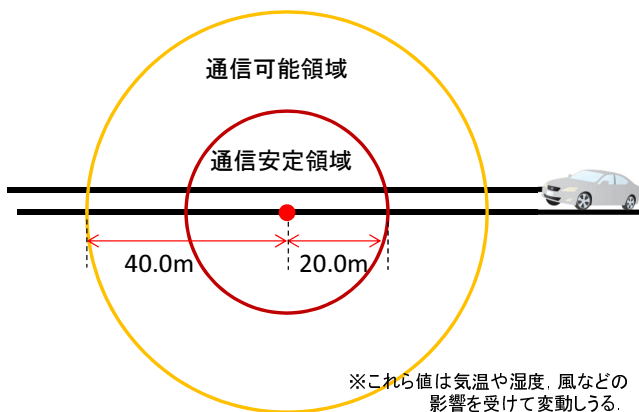


図 11 センサノードの位置と通信領域の定義

すれ違い通信の幾何学的モデルは図 12 に示した。車道幅は 5.8m とする。車は速度  $v$  で矢印の向きに移動し、センサノードとすれちがう。 $v$  には 10km/h, 20km/h を想定している。超音波センサには指向性が存在し、その視野は前方 6m, 左右  $30^\circ$  とする。また、すれ違い検出にあたり超音波センサの設置角度  $\theta$  を考慮し、 $\theta$  は  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  を想定する。

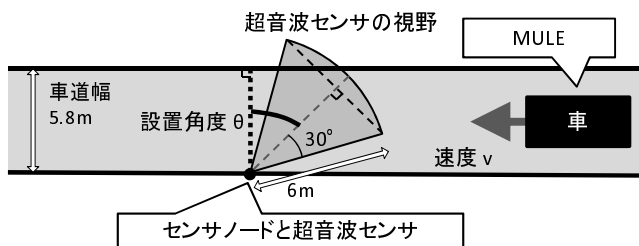


図 12 実験環境の幾何学的モデル

設置角度を想定する根拠を図 13 に示す。図 13 において超音波の反射面は道の中心線としている。上は  $\theta = 60^\circ$  を、下は  $\theta = 0^\circ$  を示している。図 13 の通り、 $\theta$  の違いによってすれ違いを早期に検出できる事がわかる。すれ違い通信において通信可能な時間は有限であるため、すれ違いを早期に検出できることは通信時間をより長く確保できることを示す。

運用性能の評価に関してその評価基準を 3 つ定義した。

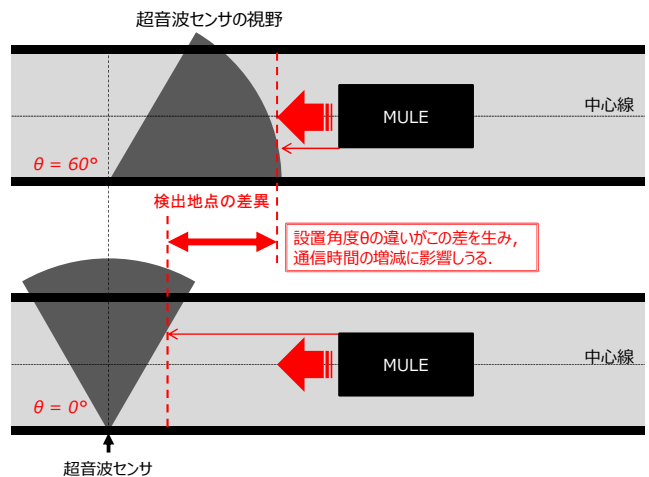


図 13 超音波センサの設置角度の重要性

### 5.1.1 すれ違い通信の生起

MULE の存在を検知できてウェイクアップし、すれ違い通信を生起できるかという判定。超音波センサの値は反射面の速度と向きに影響を受け、また、外乱(雑音)が入ることを想定しなければならない。超音波センサにとって一貫して反射面が一定の向きで無い時、その値は乱反射することも想定しておく。

### 5.1.2 通信時間

すれ違い通信が可能であった時間の測定。予め幾何学的に確保できる通信時間を  $v=10$  において約 15 秒、 $v=20$  において 8 秒弱と予想したためこれと比較して評価する。また、送るべきデータを想定し、少なくとも何秒以上の通信時間が必要かも加味する。現在茶畑に設置しているセンサノードには気温センサ 3 つと、湿度センサ、日射量センサの計 5 つのセンサが搭載されている。これらのセンサには各々個体差があり、センサノード側でその個体差を校正し、それによって取得される 1 つのデータサイズを 4B とする。この条件のもと、データとその時間を 10 分毎に取得し、データの回収を 1 週間を目途とすると、多くとも約 30KB のデータ量が必要だと見積もっている。ZigBee のデータ転送速度が最大 250kbps であることを考慮すると、この通信には約 1 秒必要となる。ただし、常に最大速度が出るとは限らないため、少なくとも 1 秒以上が必要と結論づける。

### 5.1.3 スループット

すれ違い通信の通信路の安定性を測るための、スループットに揺れがないかの検証。今回の様なすれ違い通信では距離の変動がかなり大きいため、通信路の特性に大きな違いがある可能性がある。

## 5.2 閾値と検出周期の決定

超音波センサを利用するにあたり、すれ違い検出における閾値を決定しなければならない。事前実験より  $\theta=0^\circ$  の時、車が最接近した時の超音波の値は 200cm 前後であった。また、車を検知できないときは 600cm 程度であった。この結果に従って、我々は閾値をこの平均の 400cm として

実験を行うことに決定した。また、今回の実験ではセンサノードの設置角度によるデータの違いを考慮するため、検出において雑音や乱反射のフィルタリングは一切行わない。

また、すれ違いの検出判定処理の起動周期は、最大感度でのすれ違いの検出を可能とするため、超音波センサの周期に合わせる。

### 5.3 実験結果

総括するとほぼシミュレート通りで満足な結果を得た。従って、運用性能に問題無いと判断した。以下、定めた評価基準に関して詳細を報告する。

#### 5.3.1 すれ違い通信の生起

超音波の取得値は、車の速度と反射面の向きに影響していて、 $\theta=60$  で速度が大きい時は検出できなかったが、それ以外は検出できた。特に  $\theta=0$  で反射面に垂直な時、取得値は安定していた。10km/h の結果を図 14 に、20km/h の結果を図 15 に示す。

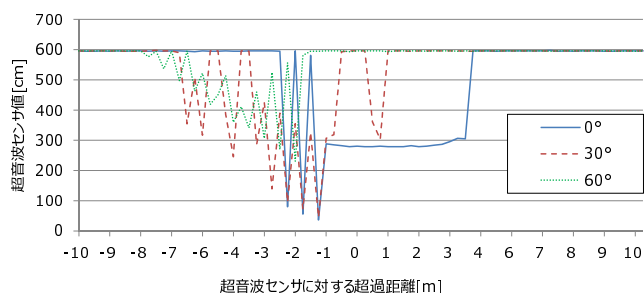


図 14 10km/h でのすれ違いにおける超音波センサの値の変動

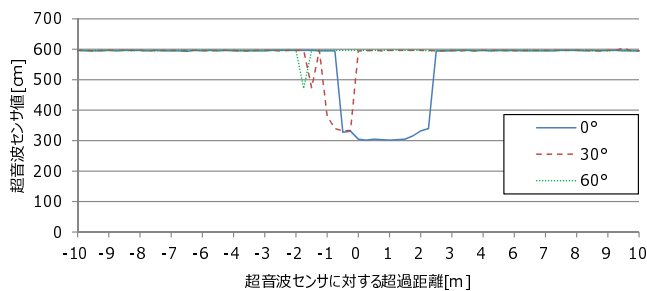


図 15 20km/h でのすれ違いにおける超音波センサの値の変動

$v=10$  の時で、かつ  $\theta$  が 0 でない時、値が乱反射していることがわかる。乱反射した値が本来の値を下回る値となるのは、ドップラー効果の影響が大きいと推測している。ここでのドップラー効果の影響とは、反射波は単純に音速ではなく車の速度の影響を受けた速度となるため、超音波センサがより近くにあると判断してしまっていることである。また、 $\theta=30$  の時が最も乱反射しているのは、車の前面と左側面のどちらも超音波をセンサ方向に反射できない相対位置関係にあるからである。逆に  $v=20$  のときほとんど乱反射していないのは、速度の影響が大きく、乱反射だと判断するほどデータ数が無いためだと分析している。

今回は閾値を 400cm に設定している関係上、 $\theta=60$ 、 $v=20$

の時にすれ違いを検出できていないことがわかる。閾値を 500cm に設定すると検出が可能であるが、この場合はすれ違いを誤検出してしまう確率がより大きくなることを考慮する必要がある。

$v$  の値にかかわらず、 $\theta=0$  の時は値が安定するため、安定的な検出を確立するには設置角度は車の進行方向に垂直に設置するのが適切だと我々は結論づける。この場合、検出時間も十分で、それは速度に反比例することも確認できる。従って、低速でのすれ違いであるならば超音波センサを LDC 化して、消費電力の削減を図ることも可能である。

今回は  $v=10$ 、20 の場合しか実験を行っていない。茶畑のような環境では道路は砂利道で整備されておらず、速度を出すと危険であったためである。理論的には、超音波センサの特性上、速度が上がるほど超音波は高々数回しか閾値に引っかかる値を返さないようになる。想定環境が屋外であり、超音波が風の外乱を受け、フィルタリングされるべき雑音が入ることを考慮すると、取得データの個数から低速での検出が限界だと想定している。雑音と通信正規成功率を一切考慮しないならば、100km/h 程度までは可能だと想定している。

今回は超音波センサによって検出する対象を自動車に想定しているが、自動車以外のものの検出は十分な検討が必要となる。自動車は表面積が大きいうえ、表面は平らであるため超音波センサで検知することに適している。これが例えば、ロボットや農業機械となると、体積、表面積が小さくなる場合や、表面が凸凹している場合がある。この時、超音波で検知できるほどの差異が値に現れない場合や、乱反射する場合があります、正確な値を取得することができない。したがって、自動車以外の検知の場合には、実際に検出できるかのテストを行った上で判断する必要がある。

#### 5.3.2 通信時間

シミュレートと同等の結果を得られ、10km/h では約 20 秒、20km/h では約 10 秒の時間を確保可能であった。この結果は図 16 に見て取れる。通信の終了は車が離れたことによる通信の不可能によるものに限定され、速度と通信時間が反比例していることから、およその値は正確であると判断できる。また、シミュレート以上の通信時間が確保できた場合もあったが、おそらく風や指向性、通信距離の動的変化等による通信路の特性が変化していたためだと思う。

従来の LDC 型のすれ違い通信では、起動のタイミングによって物理的に変動するため、確保できる通信可能時間は明示できない。しかし、LDC 型において消費電力の削減と通信成功率はトレードオフとなるため、消費電力化を突き詰めると、タイミング次第では通信時間を十分に確保できないこともありうる。しかし、今回のような超音波センサを用いたすれ違い通信においては、超音波センサの位置は固定されるため、通信時間は実験結果と同等の時間が常に確保できる。さらに、最低限の通信時間である 1 秒以上の通信可能時間を確保することも確認できた。

### 5.3.3 スループット

スループットは十分安定していた。従って今回のような、近距離での移動通信の通信であるすれ違い通信の通信路は安定していると言える。ごく偶に再送が発生していたが、近距離無線通信規格で有相対速度環境での通信による通信路特性の変化によるものとおもわれる。再送で補完が可能なレベルであった。詳細なデータは図 16 に示されている。

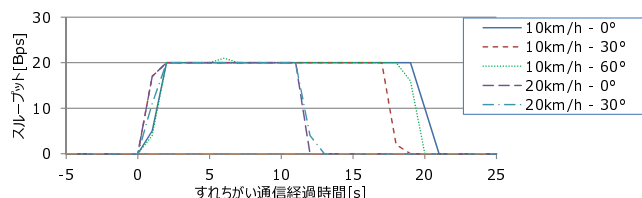


図 16 すれ違い通信におけるスループットの変動

## 6. 結論

ワイヤレスセンサネットワークが疎になる時すれ違い通信にてデータ収集は行われるが、この環境下では電源供給問題が同時に発生し、センサノードの省電力化が要求される傾向にある。消費電力の大きい通信機能の起動率を必要最低限に留めることで省電力化は果たされる。但し、既存の Low Duty Cycle よる手法では、この通信機能が周期的に起動する特性上、省電力化には限界があった。

そこで我々は、通信の間欠起動を解消するために、超音波センサを用いたアクティブウェイクアップを提案した。確保できる通信時間の長さ、超音波センサの指向性など懸念点があったため、フィールド実験を行った。その結果、提案手法では 10km/h でのすれ違い通信で約 20 秒、20km/h で約 10 秒、通信時間を確保できることを確認した。超音波センサの値に乱反射の影響が多く見られたが、センサノードの設置角度を車の進行方向に垂直にすることで解決可能であるという結論も得られた。また、すれ違い通信における通信路は安定して確立されることを確認した。

今後は、消費電力を加味した評価実験を行うとともに、アクティブウェイクアップを超音波センサ以外の方法で実現した場合の評価実験も実施する予定である。

### 謝辞

本研究は科研費（課題番号：22700076,22300025）の助成を受けたものである。

### 参考文献

[1] D.Estrin, L.Girod, G.Pottie, and M.Srivastava, "Instrumenting The World With Wireless Sensor Networks," Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP '01), vol.4, pp.2033-2036, 2001.

[2] I.F.Akyildiz, W.Su, Y.Sankarasubramaniam, and E.Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, v.38 n.4, pp.393-422, 2002.

[3] K.Martinez, J.K.Hart, and R.Ong, "Environmental Sensor Networks," IEEE Computer, Vol.37, No.8, pp.50-56, 2004.

[4] J.Burrell, T.Brooke, and R.Beckwith, "Vineyard Computing: Sensor Networks in Agricultural Production," IEEE Pervasive Computing Vol.3, No.1, pp.38-45, 2004.

[5] P.Zhang, C.M.Sadler, S.A.Lyon, and M.Martonosi, "Hardware Design Experiences in ZebraNet," Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys' 04), pp.227-238, 2004.

[6] R.C.Shah, S.Roy, S.Jain, and W.Brunette, "Data MULEs: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks," Sensor Network Protocols and Applications, pp.30-41, 2003.

[7] M.M.B.Tariq, M.Ammar, and E.Zegura, "Message ferry route design for sparse ad hoc networks with mobile nodes," MobiHoc '06 Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, pp.37-48, 2006.

[8] D.Hadaller, S.Keshav, T.Brecht, and S.Agarwal, "Vehicular opportunistic communication under the microscope," Proceedings of the 5th international conference on Mobile systems, applications and services (MobiSys), pp.206-219, 2007.

[9] J.Lebrun, C.Chuah, D.Ghosal, and Michael Zhang, "Knowledge-based opportunistic forwarding in vehicular wireless ad hoc networks," Vehicular Technology Conference, vol.4, pp.2289-2293, 2005.

[10] G.Anastasi, M.Conti, E.Monaldi, and A.Passarella, "An Adaptive Data-transfer Protocol for Sensor Networks with Data Mules," WoWMoM 2007:Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, pp.1-8, 2007.

[11] X.Wu, K.N.Brown, and C.J.Sreenan, "SNIP: A Sensor Node-Initiated Probing mechanism for opportunistic data collection in sparse wireless sensor networks," Proceedings of Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs), pp.726-731, 2011.

[12] S.Mathur, S.Kaul, M.Gruteser, and W.Trappe, "ParkNet: a mobile sensor network for harvesting real time vehicular parking information," MobiHoc S<sup>3</sup> '09 Proceedings of the 2009 MobiHoc S<sup>3</sup> workshop on MobiHoc S<sup>3</sup>, pp.25-28, 2009.

[13] Y.Yuanyuan, and W.Cong, "Adaptive Sensor Activation and Mobile Energy Replenishment for Wireless Rechargeable Sensor Networks," STONY BROOK UNIVERSITY CEAS Technical Report 834, 2011.

[14] X.Wu, K.N.Brown, and C.J.Sreenan, "Analysis of Smart Phone User Mobility Traces for Opportunistic Data Collection," Nokia Mobile Data Challenge Newcastle, June 2012.