

サービス指向ワイヤレスセンサネットワークの
理論とその実装に関する研究
**Theoretical Study and Implementation
on Service-Oriented
Wireless Sensor Networks**

2015年12月

大塚 孝信

序文

サービス指向 (Service-oriented) とは、ソフトウェア工学において定義されている業務の一処理をサービスと見なし、それらのサービスをネットワーク上で大規模に連携させるシステム構築の概念である。サービス指向アーキテクチャ (Service-oriented Architecture) として広く知られており、ユーザーの必要とする目的に合わせて容易に一処理 (サービス) の追加や削除が可能なシステムを構築することが出来る。近年、IoT(Internet of Things) や M2M(Machine to Machine) と呼ばれる、現実世界に存在するあらゆる物体をネットワーク化し、相互に作用させることを目的とした研究が行われている。そのなかでも、IoT や M2M の根幹をなす技術であるワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Network : WSN) の研究が広く行われている。しかし、多くの WSN や IoT 製品や研究においてはサービス指向、すなわち、ユーザーの必要とする目的に応じて容易にセンサの追加や削除を行うことが困難である。特に、目的に応じてセンサの追加や変更を行う場合、ハードウェアの変更やソフトウェアの書き換えが必要であり、汎用性が確保されていることが少ない。本論文では、ユーザーの目的に応じて高度なサービスを提供可能な、サービス指向ワイヤレスセンサネットワークの理論と実装に関して、著者が行ってきた研究をまとめたものである。理論に関する着眼点の1つは、異常と正常の判断が困難な課題における異常検知であり、実装に関する着眼点は、実フィールドにおける自律稼働と通信信頼性の確保である。

全文は以下の9章から構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景及び目的について述べる。その中で、従来のWSN分野の研究に対する本研究の位置付けを述べる。

第2章では、WSN分野における関連研究を示すとともに、本研究の課題について明確にする。

第3章では、プライバシーに配慮した異常検知を目指して、人感センサにおける異常検知手法を提案している。しかし、人感センサからのデータにおいてはノイズが多く含まれるため、ノイズの除去が大きな課題となる。我々は、ベイジアンネットワークを用いたノイズ除去手法について議論する。

第4章では、第2章で述べたノイズ除去に加え、独居高齢者のみまもりを目的とした、より実践的な異常検知手法について述べる。具体的には、住民の行動データを蓄積することで、正常・異常の判断が困難な分野における異常検知手法について提案する。

第5章では、環境情報における異常検知として、竜巻を代表とする異常気象の検知を高速に行うための手法について議論するとともに、シーケンシャルデータにおける異常検知手法について述べる。

第6章では、屋外におけるWSNの通信特性において、実フィールドでの実験における知見を基にした通信距離の延長と通信品質の向上手法について述べる。

第7章では、第5章において述べた屋外WSNの通信信頼性を確保するためのフルメッシュネットワークの実装手法について述べるとともに、実フィールド実験によって得られた知見から、大規模自律WSNに必要な要件についてまとめる。

第8章では、第3章から第7章までに述べたサービス指向WSNにおける、あるべき姿を具体的に示す。

第9章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題について述べる。

Abstract

The term "service-oriented" is defined in software engineering. That sense, considers one processing of business and services, is the concept of system construction to work on a large scale their services on the network.

A typical example of Service-oriented, is service-oriented architecture. Service-oriented architectures can be constructed easily and can be added to or removed from the service system to meet the user ' s requirements.

In recent years, IoT (Internet of Things) and M2M (Machine to Machine), all objects existing in the real world are networked; studies have been conducted with the aim of being coordinated with one another.

Among these, wireless sensor networks(WSN) have been studied extensively, as fundamental technology for IoT and M2M.

However, in the service-oriented in many WSN and IoT products and research works, it is difficult to add or remove the sensor conveniently according to the object and user's requirements.

In particular, if you add or change a sensor according to its purpose of use, it is necessary to rewrite the changes related to hardware or software; less versatility is ensured.. In this study, according to the user's requirement, advanced services can be provided, with respect to implementation and the theory of service-oriented wireless sensor networks; it is a summary of the author's research.

One of the viewpoints of the theory about abnormal and normal judgment is abnormal detection in difficult challenges. In addition, the viewpoints on implementation are secure communication reliability and autonomous operation in the real field.

The overall text consists of the following nine chapters.

Chapter 1 is an introduction; I have described the background and purpose of the present study. In this chapter, we described the relationship between this research and the study of traditional WSN field.

In Chapter 2 as well, we have presented related research in WSN field to clarify the challenges faced in the present study.

In Chapter 3, with the aim of anomaly detection considering privacy, we propose an anomaly detection technique in a human sensor. However, because it contains noise in the data from the human sensor, the removal of the noise is a big problem. We will discuss a noise removal method using the Bayesian network.

Chapter 4, in addition to the noise removal described in Chapter 2, only elderly living alone for the purpose of charm, will be described more practical anomaly detection technique. Specifically, it is possible to accumulate the behavioral data of the residents, a determination of normal or abnormal propose anomaly detection technique in difficult areas.

Chapter 5 explains abnormality detection in the environment information, as well as discusses techniques for a rapid detection of abnormal weather characterized by a tornado, and it describes abnormality detection method for sequential data.

In Chapter 6, in WSN of communication characteristics in the outdoors, we describe the extension and improvement method of communication quality on the basis of the communication distance, which is based on findings in experiments conducted in the real field.

In Chapter 7, we describe the implementation method of the full mesh network to ensure reliability in communication using outdoor WSN mentioned in the fifth

chapter; it was based on findings obtained by the real field experiment, for the requirements of large-scale autonomous WSN summarized in the chapter.

In Chapter 8, in the service-oriented WSN mentioned in Chapters 3—7 specifically indicate the way it should be.

Chapter 9 is the conclusion, and it summarizes the results obtained in the present study; we describe the future challenges.

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本研究の位置づけ	5
1.3 論文の構成	7
第2章 関連研究	9
2.1 序論	9
2.2 サービス指向 WSN における研究課題	10
2.3 WSN におけるハードウェア研究	13
2.3.1 消費電力削減のためのハードウェア	13
2.3.2 ロボティクス分野における WSN	14
2.4 WSN におけるソフトウェア研究	16
2.4.1 照明, 空調のフィードバック制御に関する研究	16
2.4.2 センサ情報を利用した研究	17
2.4.3 WSN における異常検知	18
2.4.4 通信制御に関する研究	18
2.4.5 通信信頼性に関する研究	20
2.5 結言	21
第3章 ベイジアンネットワークを用いたノイズデータ除去	23
3.1 序論	23

3.2	関連研究	24
3.2.1	関連サービス	24
3.2.2	異常検出に関する研究	25
3.3	ワイヤレスセンサネットワークによる異常検知	26
3.3.1	設置が容易なセンサネットワークの開発	26
3.3.2	モーションセンサの問題点	28
3.3.3	SVMによる異常検知手法	29
3.3.4	不均衡データへの対処	31
3.4	ベイジアンネットワークを用いたノイズ除去手法	32
3.4.1	センサネットワークの設置	32
3.4.2	ベイジアンネットワークの構築	32
3.4.3	結果ノードの設定	36
3.5	評価実験	38
3.5.1	実験設定	38
3.5.2	カーネル関数ごとの比較結果	39
3.5.3	SMOTE アルゴリズムの効果	40
3.5.4	ノイズ除去手法の効果	41
3.6	結言	43
第4章	住民の平均行動量に基づく異常検知	45
4.1	序言	45
4.2	異常検知のための行動モデル作成	46
4.2.1	関連サービス	46
4.2.2	異常検出に関する研究	47
4.3	センシングデータの取得	47
4.3.1	設置が容易なセンサネットワーク	47
4.3.2	設置環境	52
4.4	行動量の平均を用いた住民活動モデルの構築	53

4.4.1	日常の行動パターン可視化	53
4.4.2	時間間隔を取り入れた活動量のモデル化	54
4.5	実験結果	55
4.5.1	時間間隔の変化がモデルに与える影響	55
4.5.2	考察	61
4.6	結言	62
第 5 章	局所的な異常気象検知	65
5.1	序言	65
5.2	局地的異常気象検知の課題	65
5.2.1	気象予測システム	65
5.2.2	局地的な環境情報の取得装置	67
5.3	環境情報収集システムの試作	68
5.3.1	気圧情報取得システム	68
5.3.2	サーバアプリケーションの実装	69
5.3.3	システムの精度評価実験	70
5.4	異常気象検知アルゴリズムの提案	72
5.4.1	異常気象時の気圧変動	72
5.4.2	時系列データにおける気圧異常検知	74
5.4.3	時系列における異常な気圧データの検出アルゴリズム	76
5.4.4	グリッド配置されたノードと竜巻の検知	78
5.4.5	グリッド配置されたノードと竜巻の関係	79
5.5	評価実験	81
5.5.1	実験設定	81
5.5.2	実験結果	81
5.6	結言	83
第 6 章	屋外 WSN における	
	通信信頼性確保	85

6.1	序言	85
6.2	移動式 WSN の開発と課題	88
6.3	関連研究	90
6.4	電波測定試験	91
6.4.1	実験環境と実験期間	91
6.4.2	測定機材	94
6.4.3	実験設定	95
6.4.4	実験結果	96
6.5	実験結果まとめ	101
6.6	結言	101
第 7 章	大規模屋外 WSN の	
	課題と実装	103
7.1	序言	103
7.2	関連研究	104
7.2.1	WSN における研究動向	104
7.2.2	WSN の電波品質安定化に関する研究	105
7.3	可搬式 WSN の開発と技術的課題	106
7.3.1	可搬式アドホック水位計に必要な性能	106
7.4	技術的課題解決の提案とその実装	108
7.4.1	可搬型 WSN における通信信頼性	108
7.4.2	フルメッシュネットワークの特徴と課題	109
7.4.3	再接続が高速なフルメッシュネットワークの実装	111
7.4.4	低消費電力を実現するハードウェア設計	114
7.5	実フィールドによる運用実験結果	119
7.6	結言	123
第 8 章	サービス指向 WSN のためのミドルウェアとアーキテクチャ	125
8.1	序言	125

8.2	屋外サービス指向 WSN を実現するための課題	126
8.3	ハードウェア実装の課題と実装	127
8.4	ソフトウェア実装の課題と実装	130
8.5	ミドルウェアによるセンサリソースの配分	131
8.5.1	ノードの状態によるセンサリソースの制御	131
8.5.2	分散処理によるセンサ資源の融通	132
8.5.3	評価実験	135
8.5.4	実験結果	136
8.6	結言	137
第 9 章	結論	139

目次

2.1	サービス指向 WSN の概要	11
3.1	システム概要図	27
3.2	一般的なモーションセンサの検知範囲例	29
3.3	実験室の配置図とセンサユニット配置図	33
3.4	実験室内での移動モデル図	34
4.1	システム概要図	49
4.2	試作した受信ユニット	50
4.3	Web インターフェース	51
4.4	センサユニット筐体外観図, 内部図	52
4.5	センサユニット配置図	52
4.6	行動頻度の可視化	54
4.7	一般的な人間の行動例	55
4.8	異常の定義と行動量平均	55
4.9	[短期] 前後 15 分の行動頻度を考慮した場合	57
4.10	[中期] 前後 15 分の行動頻度を考慮した場合	57
4.11	[長期] 前後 15 分の行動頻度を考慮した場合	58
4.12	[短期] 前後 30 分の行動頻度を考慮した場合	58
4.13	[中期] 前後 30 分の行動頻度を考慮した場合	59
4.14	[長期] 前後 30 分の行動頻度を考慮した場合	59
4.15	[短期] 前後 60 分の行動頻度を考慮した場合	60
4.16	[中期] 前後 60 分の行動頻度を考慮した場合	60
4.17	[長期] 前後 60 分の行動頻度を考慮した場合	61
5.1	試作した気圧観測ノードと設置図	69
5.2	サーバアプリケーションの概要	70
5.3	気象庁の提供する気圧データの例	71

5.4	気象庁提供データと実測値の比較	72
5.5	茨城県における台風接近時の気圧観測データ	73
5.6	茨城県における前線通過時の気圧観測データ	74
5.7	茨城県における竜巻発生時の気圧観測データ	74
5.8	観測ノードのグリッド状配置	75
5.9	茨城県における前線通過時のスコアリング結果	77
5.10	茨城県における台風接近過時のスコアリング結果	77
5.11	茨城県における竜巻発生時のスコアリング結果	78
5.12	グリッド配置された観測ノードと竜巻の位置関係	79
5.13	生成した気圧値の出力結果	80
5.14	スコア値の出力結果	80
5.15	スコア値の出力結果	82
6.1	高所アンテナを利用した通信距離延長例	87
6.2	システム概要	89
6.3	実験サイトとシンクノードからの距離一覧	93
6.4	地上試験におけるアンテナ設置図	96
6.5	高所試験におけるアンテナ設置図	96
7.1	システム概要	107
7.2	ZigBee による再接続フロー	111
7.3	提案するプロトコルスタックの再接続フロー	112
7.4	実験時のネットワーク構成	113
7.5	充電回路のシミュレーション結果	115
7.6	実装した回路基板の回路	116
7.7	webUI による計測・中継ノード切替	117
7.8	ハードウェア・アーキテクチャ	117
7.9	実装した回路基板	118
7.10	通信ノード外観と特徴	119

7.11	実フィールドによる評価実験概要	120
7.12	実際の設置手順	121
7.13	webUIによるデータ表示の例	122
8.1	システム概要	128
8.2	ハードウェアアーキテクチャ	129
8.3	センサ接続時の動作概要	130
8.4	センサリソース配分の例	132
8.5	赤潮の判断フロー	134
8.6	集中管理と提案手法によるセンサ資源融通	135
8.7	テストネットワーク	136

表目次

3.1	取得センサデータ例	30
3.2	実験から求められた遷移確率	35
3.3	実験から求められた定常確率	36
3.4	実験から求められた原因ノードの確率	37
3.5	原因ノードの確信度	37
3.6	提案手法の各カーネル関数毎の評価値	40
3.7	SMOTE アルゴリズム適用後の各カーネル関数毎の評価値	41
3.8	ノイズ除去前の各カーネル関数毎の評価値	42
3.9	ノイズ除去後の各カーネル関数毎の評価値	42
4.1	出現頻度の例	54
6.1	地上試験1 TWE 使用ケース	97
6.2	地上試験1 Xbee 使用ケース	97
6.3	地上試験2 TWE 指向性アンテナケース	98
6.4	高所試験1 子機無指向性アンテナケース	99

6.5	高所試験1 子機指向性アンテナケース	100
7.1	比較実験結果	114
7.2	消費電力量のまとめ	116
8.1	実験結果	136

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

近年，インターネットの常時接続やスマートフォンの普及により，遠隔地の情報を即時に取得することが可能となっている．その中でも特に，回路基板の高密度化，シリコンデバイスの製造技術の向上により，無線通信モジュールやセンサの小型化，高性能化が進んでいる．また，スマートフォンに代表される機器の爆発的な普及により，従来は高価であったセンサや無線通信モジュールが一般的なユーザーでも容易に入手可能である．そのため，遠隔地の温度や湿度などの環境情報をユーザーが送信し，共有することで世界中の環境情報を収集する”Sensorpedia”[1]や”xively”[2]といったプラットフォームが登場してきている．しかし，これらのサービスにおいては情報を見ることは可能であっても，共有されたセンサ情報を処理し，ユーザーに適切なインタラクションを返す目的として設計されていない．また，ユーザーに対するサービスとしてのソフトウェア及びハードウェアに汎用性がなく，ユーザーの目的に応じたセンサの追加や削除が困難である．近年では，IoTやM2Mといった現実世界の“モノ”が相互に接続され，センシング情報に基づいて現実世界へフィードバックする研究が盛んに行われている．その中でも，ワイヤレスセンサネットワーク（Wireless Sensor Network：WSN）はIoTやM2Mの中核を成す技術であり，広く研究が進められている．WSNにおいてはセンシング対象に合わせて設計される製品が多く，新規センサの追加のためには電源回路や充電回路の再設計や，プログラムの書き換えが必要となる．そのため，サービス指向WSNにはまだ多くの課題が存在する．本研究の目的は，ユーザーの目的に応じて高度なサービスを提供可能な，サービス指向ワイヤレスセンサネットワー

クの実現である。

本論文では、WSNに関するこれまでの研究を概観し、その後において課題を述べる。まず、WSNを用いたアプリケーションである AnomalyDetection についての理論研究について述べ、その後屋外において運用される WSN の実装事例を挙げ、課題と解決方法について述べる。さらに、サービス指向 WSN の理論と実装について必要とされる要求をまとめ、サービス指向 WSN のためのミドルウェアとアーキテクチャについて述べる。

WSN における異常検知とその理論

WSN における有望なアプリケーションとして Anomaly Detection と呼ばれる異常検知が挙げられる。

Anomaly Detection の研究分野では多くが工作機器の状態監視や、クレジットカードの使用状況といった、正常と異常の判断がし易い分野が多く研究されている。本論文では、現実世界における異常気象や高齢者のみまもり分野における異常検知手法を実データを用いてモデル化することで、従来は異常・正常の境界が曖昧である異常検知を精度よく行う手法を提案する。また、現実世界のデータにおいては異常検知に害を及ぼす要因であるノイズデータが多く存在する。そのため我々は、ベイジアンネットワークを用いてノイズの特徴量をモデル化することでノイズデータを除去し、異常検知の性能の向上を実現している。

さらに、生活環境における異常検知である、独居高齢者の見守りを目的とした異常検知手法を室内における行動パターンの蓄積により、モデル化を行った。また、屋外における異常検知として、異常気象の検知を目的としたアルゴリズムについても提案している。

大規模自律 WSN における課題と実装

さらに、IoT や M2M の主要分野であるホームオートメーション分野やファクトリーオートメーション分野においては通信ノード及びセンサ向けの電力供給が有線で行われることが多く、バッテリー運用のような自律的で継続動作を前提としたものは少ない。

そのため、設置場所近傍に電源供給源が存在することを前提としており、設置箇所の制約が大きく、一般ユーザーが容易に設置することが困難であるため、機器設置コストの増加といった問題がある。さらに、電源供給を必要とするデバイスの多くは AC アダプタやトランスを内蔵しており、大型であることも設置の敷居を高めている。

我々は、一般ユーザーが容易に設置が可能であり、屋内においては置くだけで設置可能な高齢者見守りシステムや、屋外においては三脚に設置するのみで設置が完了し、災害時に任意の場所に容易に設置可能なアドホック水位計システムを実装している。それらの実装から得られた知見により、屋外における自律的に稼働可能な WSN システムの実装を通じて得られた課題を示すとともに、屋内外を問わず環境発電と蓄電デバイスのみで自律的に動作が可能な WSN システムの設計指針について示す。

さらに、屋外において広範囲に環境情報を取得する目的で構築されるセンサネットワークでは、通信距離を必要とするため、農業分野や、河川管理業務においては、設置場所付近の電波状況をあらかじめ測定しておき、事前調査のうえ、通信ノードの配置を考慮した後に、設置を行う手法が広く行われている。特に、我々の実装している移動式のワイヤレスセンサネットワークでは、通信ノードの移動による周囲の環境要因によって通信信頼性が大きく左右される。そのため、固定式のワイヤレスセンサネットワークとは異なり、移動により変化する周辺の電波状況や建築物、植物などの影響を定量化し、計測ノードの移動による電波品質を考慮した設置パターンを決定する必要がある。しかし、WSN 分野において広く行われている通信品質の確保に関する研究の多くが、“閉じた環境”での最適化を目的とした研究であり、周囲環境が動的に変化する移動式の WSN の通信品質を維持す

るアプローチはとられていない。特に、我々が実装を進めている移動式のワイヤレスセンサネットワークでは、固定式のワイヤレスセンサネットワークとは異なり、移動により変化する周辺の電波状況や建築物などの影響を定量化し、計測ノードの移動による電波品質を考慮した設置パターンを決定する必要がある。

我々は、無線通信の信頼性に焦点を当て、実フィールドにおいて、通信障害のない場所、市街地などの通信障害が多く存在する場所など、種々の環境要因ごとに、通信モジュール同士のパケットエラー率を測定した。また、測定結果に基づき、移動式のセンサネットワークに最適な設置パターンの提案を行い、設置場所の選定時間の短縮手法についても提案している。

サービス指向 WSN の実装

近年, Wireless Sensor Networks (WSNs) を活用した技術として、センサストリームだけではなく、現実空間に存在する”モノ”をネットワーク化する技術である, Internet of Things (IoT) の研究が広く進められている。IoT のアプリケーションとして注目されているスマートホームやスマートシティにおいては、住人や市民それぞれに最適なサービスを提供することを目的としている。そのため、ユーザーに必要な情報や環境を提供するアプリケーション層の研究対象として、Things-Oriented (TO) [112][113], Service-Oriented-Things (SoT) [114] といった, IoT 技術をベースとした研究が進められている。しかし、多くの研究が室内空間などの電源供給可能な場所に設置されることを前提としており、かつ、使用するセンサ類の変更を前提とした設計のものは少ない。我々は、屋外向け WSN システムの実装を行っており、屋外に設置された気圧センサを用いて竜巻を早期に検知する研究 [116], やアドホック簡易水位計の実装を行っている [117][118]。それらの研究を通じて得られた知見を基に、目的に応じて再構成可能なサービス指向 WSN を構築するためのシステムについて提案する。

1.2 本研究の位置づけ

サービス指向 (Service-oriented) とは、ソフトウェア工学において定義されている業務の一処理をサービスと見なし、それらのサービスをネットワーク上で大規模に連携させるシステム構築の概念である。サービス指向アーキテクチャ (Service-oriented Architecture) として広く知られており、ユーザーの必要とする目的に合わせて容易に一処理 (サービス) の追加や削除が可能なシステムを構築することが出来る。近年、IoT(Internet of Things) や M2M(Machine to Machine) と呼ばれる、現実世界に存在するあらゆる物体をネットワーク化し、相互に作用させることを目的とした研究が行われている。そのなかでも、IoT や M2M の根幹をなす技術であるワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Network : WSN) の研究が広く行われている。しかし、多くの WSN や IoT 製品や研究においてはサービス指向、すなわち、ユーザーの必要とする目的に応じて容易にセンサの追加や削除を行うことが困難である。特に、目的に応じてセンサの追加や変更を行う場合、ハードウェアの変更やソフトウェアの書き換えが必要であり、汎用性が確保されていることが少ない。

本研究の目的は、サービス指向 WSN の実現である。しかし、サービス指向 WSN の実現のためには、ソフトウェア工学だけではなく、ハードウェアについても統合した実装を行う必要がある。特に重要となるのが、自律稼働を実現するための電源管理と通信信頼性の確保である。電源管理においては WSN の電源消費を削減することが最も重要とされており [6]、ハードウェア側で消費電力を削減するアプローチや、ソフトウェア側で消費電力を削減するアプローチが広く研究されている。ハードウェア分野での研究としては、エナジハーベスティングを用いたセンサノードのための省電力は回路の研究 [6] や、プロセッサそのものを WSN に最適化させた研究 [8]、及び、回路そのものを間欠動作前提として設計した研究 [4] がある。また、ソフトウェアアプローチによる消費電力の削減も多く行われており、機械学習による予測をノード自身が行うことにより、通信コストの削減を実現した研究 [18] や、WSN における各ノードの設置位置を推薦するプログラムにより低

消費電力を実現する研究 [5] や、シミュレーションによって最適な通信間隔を測定し、実ノードへ反映することで低消費電力を実現する研究 [7] がある。

しかし、どの研究についても専用設計のプロセッサや専用の発電デバイスを用いており、汎用的に使用することができない。現実的な問題としては、環境発電デバイスや蓄電デバイスは多く存在するが、それぞれの発電デバイス、蓄電デバイスによって充放電制御を変更する必要があるが、そのようなデバイスの研究は行われていないのが現状である。サービス指向 WSN の実現のためには、ユーザーが求めるサービスに応じた発電デバイス、蓄電デバイスの使用が前提である。そのため我々はミドルウェアによりハードウェアを制御することで、ユーザーの求める環境に適応可能なサービス指向 WSN を実装する。

また、WSN においては、通信信頼性に関しても重要である。屋内外において、ノード間の電波伝搬の障害となる要因が数多く存在する。屋内においては、電子レンジや電化製品の発生するノイズが代表的なものである。また、屋外においては、樹木や建造物、及び自動車やトラックなどの車両が代表的な通信障害要因となる。通信障害が発生した場合、データの欠損だけでなく、データの再送処理による消費電力量の増加も発生することから WSN において通信信頼性を確保することは重要な課題である。通信信頼性に関する研究は広く行われており [10]、通信障害要因を事前にシミュレーションにより導出する研究 [11][9] や、実データを基に、屋外における電波障害要因を定量化する研究 [104][106] がある。また、プロトコルスタックと呼ばれるソフトウェア層を改良することで、通信エラー発生率を低減させる研究 [101] もある。しかし、多くの研究は屋外における通信限界の測定や、実際のフィールドにおける通信障害の発生を考慮していない。そのため、屋内外において動的に変化する環境による通信障害を予見することが困難である。我々はそのため、屋外において通信限界を測定したうえで通信障害の要因を様々な環境において測定することで、屋内外を問わず、意図せぬ電波障害要因に対応可能なシステムを提案している [106]。また、通信障害が避けられぬ場合においても、通信の再確立速度を向上させることで信頼性を確保可能なプロトコルスタックについても提案している [12]。

以上により、サービス指向 WSN の実現には多くの課題が存在する。我々は、ハードウェアとソフトウェア双方に関して研究を行っており、実フィールドにおいても多くの実験を行っている。そのため、従来の WSN 研究とは本質的に異なり、ユーザーの必要とするサービスを提供可能なサービス指向 WSN をハードウェア、ソフトウェア双方について統合した研究として実装している点が最も新しい点である。

1.3 論文の構成

本論文は、序論と結論を含めて全体を 9 章で構成している。第 1 章の序論に続いて、まず、第 2 章では、WSN における関連研究を示し、本研究の課題を明確にする。

つぎに、第 3 章においては、異常検知におけるノイズ除去について述べる。これは、第 4 章と第 5 章の基礎となるもので、WSN における異常検知の事例や理論について述べる。さらに、第 6 章から第 7 章では、大規模自律 WSN における実世界運用についての課題と設計について述べる。

第 3 章では、プライバシーに配慮した異常検知を目指して、人感センサにおける異常検知手法を提案している。しかし、人感センサからのデータにおいてはノイズが多く含まれるため、ノイズの除去が大きな課題となる。我々は、ベイジアンネットワークを用いたノイズ除去手法について議論する

第 4 章では、第 3 章で述べたノイズ除去に加え、独居高齢者のみまもりを目的とした、より実践的な異常検知手法について述べる。具体的には、住民の行動データを蓄積することで、住民行動のモデルを構築し、正常・異常の判断が困難な分野における異常検知手法について提案する。

第 5 章では、環境情報における異常検知として、竜巻を代表とする異常気象の検知を高速に行うための手法について議論するとともに、シーケンシャルデータにおける異常検知手法について述べる。

第 6 章では、屋外における WSN の通信特性において、実フィールドでの実験における知見を基にした通信距離の延長と通信品質の向上手法について述べる。

第7章では、第6章において述べた屋外 WSN の通信信頼性を確保するためのフルメッシュネットワークの実装手法について述べるとともに、実フィールド実験によって得られた知見から、大規模自律 WSN に必要な要件についてまとめる。

第8章では、第2章から第6章までに述べたサービス指向 WSN における、あるべき姿を具体的に示す。

第9章では、結論として以上についての成果をまとめ、今後の課題を述べる。

第2章 関連研究

2.1 序論

近年，従来は大型だった通信モジュールや各種センサ類の小型化が進むとともに，通信モジュールとセンサを組み合わせた無線通信によるセンサネットワークの研究が多く行われている．従来型のセンサを用いた研究では少数の高価なセンサを特定の場所に据え付けて測定を行い，測定値についてもセンサ近傍に出向かなければ得ることができない．しかし，近年のワイヤレスセンサネットワークは安価なセンサを任意の場所に大量にばらまくことで”点”の情報ではなく”面”で情報をとらえることが可能になっている．これにより，ある程度の精度が確保された安価なセンサを利用でき，少量の高価なセンサを用いるよりも精度の点でも有利となっている．また，ワイヤレスセンサネットワークの特徴としてリアルタイムの情報を取得可能ということが挙げられる．代表的な例として，橋梁や高速道路などの建造物における健全性をモニタリングする構造センシングや温度や湿度を大規模に計測して可視化を行う環境センシングなどが挙げられる．更に，取得した情報を照明や空調システムのフィードバック制御に用いることで電力消費量を減少させる研究も行われている．また，内蔵したプロセッサにより搭載した各種センサ情報によるフィードバック制御，他のユニットと相互通信を行うことで自律動作を行うロボット群についてもワイヤレスセンサネットワークであり，広く研究が行われている．更に，大規模にセンサ情報を取得する際には通信が集中することによるネットワークのスタック対策や無線通信の品質への対策が重要である．そのため，電波強度によって通信先を自動判断するアルゴリズムや通信の傍受を防ぐためのアルゴリズムについても研究されている．しかし，多くのWSNや

IoT 製品や研究においてはサービス指向，すなわち，ユーザーの必要とする目的に応じて容易にセンサの追加や削除を行うことが困難である．特に，目的に応じてセンサの追加や変更を行う場合，ハードウェアの変更やソフトウェアの書き換えが必要であり，汎用性が確保されていることが少ない．本章では，IoT や M2M の根幹をなす技術であるワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Network : WSN) の関連研究を示すとともに，サービス指向 WSN の課題と解決方法について述べる．また，WSN 分野における関連研究を通じ，サービス指向 WSN の課題点について述べる．本節の構成を示す．まずはじめに，2.2 節においてサービス指向 WSN における研究課題について述べる．その後，2.3 節においてハードウェアに関する研究と課題について述べる．また，2.4 節にてソフトウェアに関する研究と課題について述べ，最後に 2.5 節にて本章のまとめと今後の課題について述べる．

2.2 サービス指向 WSN における研究課題

サービス指向 (Service-oriented) とは，ソフトウェア工学において定義されている業務の一処理をサービスと見なし，それらのサービスをネットワーク上で大規模に連携させるシステム構築の概念である．サービス指向アーキテクチャ (Service-oriented Architecture) として広く知られており，ユーザーの必要とする目的に合わせて容易に一処理 (サービス) の追加や削除が可能なシステムを構築することが出来る．近年，IoT (Internet of Things) や M2M (Machine to Machine) と呼ばれる，現実世界に存在するあらゆる物体をネットワーク化し，相互に作用させることを目的とした研究が行われている．そのなかでも，IoT や M2M の根幹をなす技術であるワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Network : WSN) の研究が広く行われている．しかし，多くの WSN や IoT 製品や研究においてはサービス指向，すなわち，ユーザーの必要とする目的に応じて容易にセンサの追加や削除を行うことが困難である．特に，目的に応じてセンサの追加や変更を行う場合，ハードウェアの変更やソフトウェアの書き換えが必要であり，汎用性が確保されていることが少ない．

サービス指向 WSN においては、役務としてのサービスを担うソフトウェアだけではなく、環境に応じてサービスを実現するためのハードウェア技術についても必要となる。しかし、ハードウェアを目的に合わせて設計する場合、多くの研究と同じく、専用設計となりがちである。そのため我々は、サービス指向 WSN の実現のために、ミドルウェアによりハードウェアを制御する手法を提案している [13]。つまり、サービス指向 WSN の実現には、ソフトウェアとハードウェアの双方について理解した上で境界領域である分野を統合して研究する必要がある。サービス指向 WSN の概要を図 2.1 に示す。図にも示したとおり、ハードウェア、ソフ

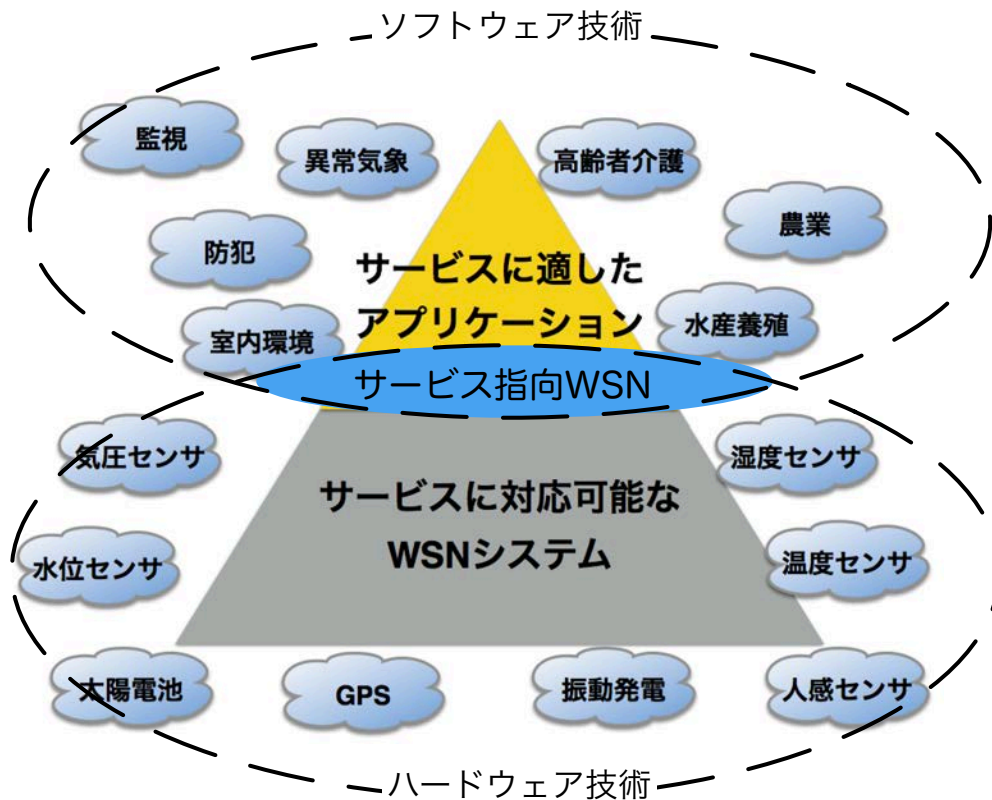


図 2.1: サービス指向 WSN の概要

トウェアどちらかに偏った研究ではなく、汎用的に使用可能な WSN システムを実装するうえではハードウェアとソフトウェアを統合する必要性が高い。その点においても、サービス指向 WSN における研究課題は数多く存在するが、以下に代表

的な研究課題を示す。

- 環境発電による自律稼働を実現するための電力消費削減
- 屋内外における電波障害要因に対する通信信頼性の確保
- 対象に応じた異常検知を実現するためのソフトウェア

特に重要となるのが、自律稼働を実現するための電源管理と通信信頼性の確保である。電源管理においては WSN の電源消費を削減することが最も重要とされており [6]、ハードウェア側で消費電力を削減するアプローチや、ソフトウェア側で消費電力を削減するアプローチが広く研究されている。ハードウェア分野での研究としては、エナジハーベスティングを用いたセンサノードのための省電力は回路の研究 [6] や、プロセッサそのものを WSN に最適化させた研究 [8]、及び、回路そのものを間欠動作前提として設計した研究 [4] がある。また、ソフトウェアアプローチによる消費電力の削減も多く行われており、機械学習による予測をノード自身が行うことにより、通信コストの削減を実現した研究 [18] や、WSN における各ノードの設置位置を推薦するプログラムにより低消費電力を実現する研究 [5] や、シミュレーションによって最適な通信間隔を測定し、実ノードへ反映することで低消費電力を実現する研究 [7] がある。

しかし、どの研究についても専用設計のプロセッサや専用の発電デバイスを用いており、汎用的に使用することができない。現実的な問題としては、環境発電デバイスや蓄電デバイスは多く存在するが、それぞれの発電デバイス、蓄電デバイスによって充放電制御を変更する必要があるが、そのようなデバイスの研究は行われていないのが現状である。サービス指向 WSN の実現のためには、ユーザーが求めるサービスに応じた発電デバイス、蓄電デバイスの使用が前提である。そのため我々はミドルウェアによりハードウェアを制御することで、ユーザーの求める環境に適応可能なサービス指向 WSN を実装する。

また、WSN においては、通信信頼性に関しても重要である。屋内外において、ノード間の電波伝搬の障害となる要因が数多く存在する。屋内においては、電子レンジや電化製品の発生するノイズが代表的なものである。また、屋外において

は、樹木や建造物、及び自動車やトラックなどの車両が代表的な通信障害要因となる。通信障害が発生した場合、データの欠損だけではなく、データの再送処理による消費電力量の増加も発生することから WSN において通信信頼性を確保することは重要な課題である。通信信頼性に関する研究は広く行われており [10]、通信障害要因を事前にシミュレーションにより導出する研究 [11][9] や、実データを基に、屋外における電波障害要因を定量化する研究 [104][106] がある。また、プロトコルスタックと呼ばれるソフトウェア層を改良することで、通信エラー発生率を低減させる研究 [101] もある。しかし、多くの研究は屋外における通信限界の測定や、実際のフィールドにおける通信障害の発生を考慮していない。そのため、屋内外において動的に変化する環境による通信障害を予測することが困難である。我々はそのため、屋外において通信限界を測定したうえで通信障害の要因を様々な環境において測定することで、屋内外を問わず、意図せぬ電波障害要因に対応可能なシステムを提案している。[106]。また、通信障害が避けられぬ場合においても、通信の再確立速度を向上させることで信頼性を確保可能なプロトコルスタックについても提案している [12]。

以上により、サービス指向 WSN の実現には多くの課題が存在する。我々は、ハードウェアとソフトウェア双方に関して研究を行っており、実フィールドにおいても多くの実験を行っている。そのため、従来の WSN 研究とは本質的に異なり、ユーザーの必要とするサービスを提供可能なサービス指向 WSN をハードウェア、ソフトウェア双方について統合した研究として実装している点が最も困難な課題であるとも言える。

2.3 WSN におけるハードウェア研究

2.3.1 消費電力削減のためのハードウェア

WSN 分野において、ハードウェアの研究として消費電力の削減に関する研究が広く行われている。WSN においては、自律的な稼働を前提としたノード設計を前

提としており、電力コスト、計算コストの制約が大きいためである [14]。そのため、回路設計や電源回路、及びデジタル通信回路などのハードウェアの設計が重要となる。特に、回路設計についてはアナログ回路の専門的知識が必要になるが、アナログ回路の設計は多くの先人達が残したノウハウが書籍化されており、障害は少ない。しかし、近年においては、FPGA[16] や SoC[17] を代表とする、汎用的に用いることが可能な集積回路が広く用いられてきている。そのため、ソフトウェアとハードウェアの境界がなくなってきたのも事実である。しかし、WSN の自律稼働に必要である、周辺回路である電源回路や充電回路はパッケージ化されておらず、そのため WSN 製品の多くが専用品となっているケースが多い。また、蓄電デバイスや環境発電デバイスに関しては、日進月歩で発展しており、デバイスごとの充電方法や運用方法が異なるため、ハードウェアの動向を知ることも重要である。ハードウェア分野での研究としては、エナジハーベスティングを用いたセンサノードのための省電力は回路の研究 [6] や、プロセッサそのものを WSN に最適化させた研究 [8]、及び、回路そのものを間欠動作前提として設計した研究 [4] がある。

しかし、どの研究についても専用設計のプロセッサや専用の発電デバイスを用いており、汎用的に使用することができない。現実的な問題としては、環境発電デバイスや蓄電デバイスは多く存在するが、それぞれの発電デバイス、蓄電デバイスによって充放電制御を変更する必要があるが、そのようなデバイスの研究は行われていないのが現状である。サービス指向 WSN の実現のためには、ユーザーが求めるサービスに応じた発電デバイス、蓄電デバイスの使用が前提である。そのため我々はミドルウェアによりハードウェアを制御することで、ユーザーの求める環境に適応可能なサービス指向 WSN を実装する。

2.3.2 ロボティクス分野における WSN

ロボットはその動作の自律性から、いくつかのタイプに分けることができる。その中のひとつとしては、センサによる視覚及び聴覚を備え外部からの情報提供がな

くとも自律的に環境を認識し行動する完全自律型ロボットがある。しかし、空間内を移動するロボットには人間が指示や命令を伝えることが必要である。さらに、通信によってロボットを動かすプログラムをダウンロードしたり入れ替えたりすることによって、環境や状態の変化に柔軟に対応したり、ひとつのロボットを多目的に利用することが可能になる。このように、現在のロボット研究においてセンサネットワーク技術は多くの共通点があり、更には、操作者だけでなく外部センサ、他のロボット等、様々な相手と通信を行うことで性能の向上を実現している。つまり、従来型の1対1の通信ではなく、1対複数、複数対複数の通信によりセンサ獲得したセンサ情報を共有するセンサネットワークとしてのロボティクス技術が多く存在する。現在では、ワイヤレスセンサネットワーク技術を用いて、通信の対象が他のロボットにも広がり、ロボット間通信によって情報交換しながら動作するロボットが多く研究されている。また、自律型ロボットであっても自らのセンサだけでなく外部との通信による情報も取得した方がよりの確な行動が可能となるため、空間情報を広く認識するロボットと局地的な空間情報を認識するロボットを組み合わせる移動経路を最適化する研究 [21] も行われている。また、ロボットの移動経路探索については iRobot 社の販売する Roomba が有名だが、Roomba は単純な接触スイッチを用いるのみで部屋全体の空間認識を行わないまま探索を行う包摂アーキテクチャを採用していることが知られている [36]。しかし、この方法では空間認識を行わないために、空間全体の移動パスを最適化することが出来ないため、全ての箇所を移動するには大きな時間がかかるといったデメリットが存在する。そのため、目的に応じてロボットの移動経路を最適化するために各種センサ情報を用いて最短経路での移動や目的に適した移動経路を導き出すための研究が広く行われている。具体的には、センシングユニットを搭載したロボット群をマルコフモデルを用いた移動経路を指定することで、センシング対象に応じたセンサノードのメッシュを構築する研究 [29]。限られた視界情報の中で探索を行い、自律的に建物内部を探索し、マッピングを行うアルゴリズム [32]。などが挙げられる。また、センシング情報を特定の場所に送信するのみのセンサノードと異なり、自律ロボット群の通信においては大量の相互通信を行うため、大規模な相

互通信ロボット同士の通信において通信の最適化が必要となるが、全てのロボットが相互通信を行うのではなく通信圏内にいる無作為のロボットが代表して他の通信圏内にある最も近いロボットを自動的に判別して通信を行う研究 [34]、も行われている。以上のようにセンサネットワークと昨今の自律ロボットに関する研究は共通点が多く、ロボットそのものがセンサノードの役割をしている研究も多く存在するため紹介した。これにより、単にその場所のセンサ情報を読み取るだけではなく、情報が必要な場所に自ら移動し、センシングを行うことも可能となり、災害や防犯分野においての活用が期待されている。

2.4 WSNにおけるソフトウェア研究

2.4.1 照明、空調のフィードバック制御に関する研究

本章では環境情報のセンシングについて説明する。環境情報とは、気温や室温、人が存在するなどの空間情報をセンサにより電気信号に変換することで得られるデータのことを示す。次に、センサをより身近にイメージするため、身の回りのセンサを紹介する。我々の生活の中では様々なセンサが実際に運用されているが、意識をしない限り見ることは少ない。例えば身近な例では自動水栓やセンサーライト及び空調装置が例として挙げられる。自動水栓とは手を出すだけで自動的に水が出る蛇口のことであり、センサーライトとは省電力のために人感センサを用い、人の動きがあると自動的に点灯し、しばらく動きが無いと消えるライトのことである。自動水栓は最近のホテルやデパートではすでに当たり前設置されているが、数年前までは、水を出すためには蛇口は手でひねる必要があった。空調装置に関しても、設定した温度に達すると装置が自動的に停止するのも内蔵された温度センサによるものである。それが、近年では手を差し出すだけで水が出る自動水栓が急速に普及した。しかし、自動水栓やセンサーライトや空調装置のセンサ類は現時点ではネットワーク化されていないが、生活環境に設置されたセンサ技術によって、生活が少しずつ手軽に便利になっていく技術がセンサネットワー

クいえる。センサネットワークでは温度センサや湿度センサといった環境情報を統合し、効率的に空調機器や照明機器をコントロールすることでエネルギー消費量を減少させることを目的とした研究が広く行われている。代表的な研究として大学内に設置された照度（明るさ）センサ，温度センサ，人感センサの情報から，人が多く集まっている部屋では空調や照明を稼働させ，そうでない部屋や時間帯には空調の設定温度を下げたり，照明を間引きするなどのコントロールを行うアルゴリズムに関する研究 [18][19]。などがある。これらの研究はスマートグリッドやスマートシティの実証実験にも応用されており，一般家庭向けには個別の住人の生活パターンを学習することで最適な空調パターンに調整する機器 [35] なども実用化されている。

2.4.2 センサ情報を利用した研究

センサ情報を解析，分析することで実世界での応用を目的としたアプリケーションの開発を行う研究は現在最も盛んに行われている分野である。例えば人が多く集まっている部屋では空調や照明を稼働させ，そうでない部屋や時間帯には空調の設定温度を下げたり，照明を間引きするなどのコントロールを行うアルゴリズムに関する研究 [18][19]。海上に設置されたセンシングブイの位置を周囲にある少量のビーコン情報から特定するアルゴリズムに関する研究 [26]。気温のセンシングを目的としたロボット群において，最も効率的にセンサノードを配置するアルゴリズムに関する研究 [22]。人体に装着した加速度，体温，脈拍センサの情報から正確な運動強度を算出するための研究 [30]。高齢者のみまもりを目的とし，人体に装着した加速度センサからの情報を基に摔倒などの異常動作を検知するための研究 [31]。などが挙げられる。これらの研究は，単にセンシング情報を可視化するだけでなく実際の機関などと協同で研究を進めており，実用化が期待されている。

2.4.3 WSNにおける異常検知

近年、センサを用いてセンシングしたデータやクレジットカードの使用履歴など様々なデータを解析することにより異常検出を行う Anomaly Detection[37] と呼ばれる研究が多くの研究分野とアプリケーションドメイン内で研究されている。Anomaly Detection の研究分野の主な技法は大半が、分類技法をもとにした技術のカテゴリ、最近傍法をもとにした技術のカテゴリ、及びクラスタリング技法をもとにした技術のカテゴリ、統計技法をもとにした技術のカテゴリに分類することができる。また、いくつかの技術は情報理論をもとにした技術のカテゴリ、スペクトル理論をもとにした技術のカテゴリに属している。以上のように様々な技法が存在しており、実際に運用されているシステムとしては、コンピュータ・ネットワーク上のハッキングされたコンピュータが不正に機密データを送信していることを意味する異常なトラフィックパターンの検出 [57]、MRI 画像中の悪性腫瘍の存在を示す異常の検出 [38]、宇宙機の幾つかの部品の障害を意味する宇宙機のセンサからの異常な測定値の検出 [39]、などが研究されている。ワイヤレスセンサネットワークからのストリーミングデータの信頼性がユーザの観点から重要なことから、センサ間の条件付き依存関係を考慮したベイジアンネットワークによるセンサの異常値を検出する研究 [40]、ワイヤレスセンサネットワークを使って位置検出を行うシステムにおいて、敵によって引き起こされる位置情報の異常を検出するため統計モデルを使う研究 [41]、気象データを収集する分散型ワイヤレスセンサネットワーク内の異なるノードから集めたデータを融合し、スペクトル理論を使った異常検出を行う研究 [42] などがある。

以上の研究の特徴として異常状態と正常状態の定義がしやすいことが挙げられる。

2.4.4 通信制御に関する研究

センサネットワークは通常、アドホック (ad hoc) 機能と、各ノードから中枢ノードへデータを送るためのルーティング機能 (routing algorithm) を持つ。つまり、ノード間の通信に障害がでると別の通信経路を自律的に再構築する機能がある。

ノードがグループとして連携するため分散処理の要素もある。しかしながら特に、無線ノード数が大幅に増加した際に、それら無線ノードをいかに管理・運用するかは、大きな課題である。無線ノードの数が増加すると、それら無線ノードの集中的な管や運用が困難になる。携帯電話システムや無線 LAN システムなどでは、基地局やネットワーク管理装置で集中的に無線ノードの管理を行っているが、センサネットワークシステムでは数千から数万といった膨大な数の無線ノードに対応するため、それら管理装置を必要としない管理や運用手法が求められる。その他にも、無作為な無線ノードの配置、無線ノードの故障、無線ノードのシステムへの追加、削除に柔軟に対処できる手法など、従来の集中管理的手法から自律分散的手法への転換により解決が期待されている課題が多い。また、センサネットワークではバッテリー駆動が基本となるため、省電力を目的とした通信制御も必要である。無線通信では送信距離の 2 から 4 乗に比例した送信電力が必要となるため、長距離を 1 ホップで通信する代わりに、複数の無線ノードを中継するマルチホップ通信を利用した通信により、1 ホップを短くすることで、消費電力の節約につなげようとする手法も存在する。しかし、マルチホップ通信を用いる場合、自律分散的なアクセス制御方式として広く用いられている CSMA (Carrier Sense Multiple Access) などのプロトコルでは、マルチホップ通信によるパケットの増加にともない通信衝突が頻繁に発生し、スループットの著しい低下が生じるという問題があるが、スループットの低下を目的として電波強度が高いノードの最短経路を自動で通信経路とするアルゴリズムの研究 [25][27] もある。また、衝突の起こらない通信方式として TDMA (Time Division Multiple Access) 方式がある。これは時間分割の多重化技術であり、1 フレームの特定スロットを各無線ノードが通信するタイミングとして割当てることによって通信タイミングの重複を避ける研究 [24] も行われている。また、マルチホップ通信においては非同期の通信となっているが、ノード間の通信距離によって同期速度を変更する研究 [33] などもある。更に、エージェントを用いて通信量をノード毎に最適化することで無線通信の信頼性を確保する研究 [20][28] なども行われており、大規模なセンサネットワークの運用の信頼性を確保することを目的として、多くの通信制御に関する研究が行われている。また、

不正なパケットを排除する技術に関しても研究されており、通信環境などの外的要因により不正なパケットが観測された際に、迂回するノードを自動で設定する研究 [23] もある。以上のように、ワイヤレスセンサネットワークの通信制御についても様々な研究が為されており、より大規模なセンサノードを運用する際にも通信の信頼性を確保できる技術の実用化が期待されている。

2.4.5 通信信頼性に関する研究

近年、個人で運用可能な環境情報取得装置は研究用途や家庭用として広く販売されている。農業用のワイヤレスセンサシステムである MEMSIC 社の Eko システム [102] を用いた研究 [58] も行われているが、ユニット単価が 10 万円程度と高く、大量に設置するには敷居が高い。更に、民生用の製品として、米デバイス社の Vantage シリーズ [72] などがあり、通信装置別途で 6 万円と、比較的low価格であるが専用のアプリケーションでのみ動作可能なため、大規模なデータ収集には向いていない。また、実験的な WSN による環境情報収集の例として、活火山に観測ノードを多数設置することで、噴火の予測などを目的としたデータ収集に関する研究 [90] も行われている。我々は、大規模に高密度の情報を収集可能なセンサネットワークデバイスとサーバーアプリケーションを開発し、環境データの収集を行っている [116]。また、ワイヤレスセンサネットワーク分野においては、消費電力の低減を目的としたセンサ配置の最適化に関する研究 [89] や、センサノードアプリケーションの構築にエージェント技術を適用した研究 [83] も存在する。さらに、運用面での管理容易化を狙い、目的に応じたノードのプログラムを用意しておくことで、用途に応じたセンサネットワークの構築の容易化についての研究 [85]、状況に応じたネットワークトポロジを自律的に構成する研究 [86] も存在している。しかし、WSN に一番求められていることは、ネットワークの安定である。すなわち、継続的なデータ収集を目的とし、固定式センサネットワークの配置を最適化することで、ネットワークの品質を一定に保つ研究が広く行われている。例えば、ノードの形成するトポロジの電波レベル (RSSI 値) を用いて、あらかじめ

定義された空間においてノード配置を最適化する研究 [99], ノードをクラスタとして捉えることで, 通信ルートを最適化する研究 [100], ノード間のマルチホップを行う中継局の位置を最適化することで, 通信エラーを低減させる研究 [101] などがある. また, 複数のシンクノードを配置し, シンクノードの位置を最適化する研究 [103] も行われている.

しかし, どの研究も”閉じた環境”での最適化を目的とした研究であり, 周囲環境が動的に変化する移動式の WSN の通信品質を維持するアプローチはとられていない. 特に, 移動式のワイヤレスセンサネットワークでは, 固定式のワイヤレスセンサネットワークとは異なり, 移動により変化する周辺の電波状況や建築物などの影響を定量化し, 計測ノードの移動による電波品質を考慮した設置パターンを決定する必要がある. 我々は, 無線通信の信頼性に焦点を当て, 実フィールドにおいて, 種々の環境要因ごとに, 通信モジュール同士のパケットエラー率を測定することで, 移動式のセンサネットワークに最適な設置パターンの提案を行い, 設置場所の選定時間の短縮手法について提案している [104].

2.5 結言

本章では, WSN における関連研究について示すとともに, サービス指向 WSN の課題について示した. サービス指向 WSN においては, ハードウェアとソフトウェアの融合が重要である. すなわち, ハードウェアだけが優れていてもソフトウェアとして完成していなければ使用に耐えないということである. 本章で紹介した基礎技術を組み合わせるだけでなく, 利用者の求めるサービスとして統合することが重要である. また, WSN においては, 無線通信技術や異常検知, 及び低消費電力などを代表とした多くの課題が存在するが, 自律稼働を目的とする WSN は主に計算量と消費電力といったハードウェア上の制約が大きい. そのため, ソフトウェアだけではなく, ハードウェア自体をソフトウェアにより制御することが重要である. 特に, ミドルウェアによるハードウェア制御を活用することで, より実用に則したサービス指向 WSN が実現可能である. そのためにも, ハードウェア

アについて深く理解するとともに、最新の動向を常に調査する必要がある。我々は、環境情報の取得や高齢者のみまもり用途といった、さまざまな分野においてWSNシステムを試作するとともに、ソフトウェアとハードウェアの両面において開発を行うことで、実運用における多くの問題点を解決している。さらに、無線モジュールや蓄電デバイスは多くの規格が提唱されつつあり、過渡期にある。そのため、長期的な視野をもち、最新技術を取り入れやすい構造を考慮した設計とすることが今後の課題である。

第3章 ベイジアンネットワークを用いたノイズデータ除去

3.1 序論

近年、通信モジュールとセンサを組み合わせた無線通信によるセンサネットワークの研究が多く行われている。代表的な例として、橋梁や高速道路などの建造物における健全性をモニタリングする構造センシングや温度や湿度を大規模に計測して可視化を行う環境センシングなどが挙げられる。更に、提供されているサービスとして潮流の状況や海面温度などを世界中に設置されたセンサにより測定することで情報を提供するサービスや個人が製作したセンサネットワークにより取得したセンシングデータを共有し、閲覧できるサービスなども存在する。しかし、センサネットワークの設置や運用には専門的な知識が必要であり、一般ユーザーにとってはまだ敷居が高い。

我々は、身近な問題である高齢化社会を題材として一般ユーザーにも設置が簡単に行え、かつ運用も容易に行うことが出来る高齢者みまもり用途のワイヤレスセンサネットワークを開発する。そして、開発したワイヤレスセンサネットワークを研究室内で稼働させ、「日常とは違う時間帯での活動という異常」を検出するため、各データインスタンスの取得時間を素性に Support Vector Machine(SVM)を用いて、自動的に閾値を決定し、正常と異常との分類を行った。異常検知においては、何をノイズデータと定義して、何を異常と定義するかが難しい。本研究における異常データは通常的生活とは異なる時間帯でのセンシングデータを異常と定義した。また、簡単に設置できるセンサユニットは専門的な知識を持たない一般ユーザーがセンサユニットを設置することが想定されるため、研究室内での

実験においても外的要因を特に気にせず設置を行った。その際、人の動きに起因しない外部環境の変化によるセンサの誤検知が発生し、それらノイズが異常検出における予測精度を低下させていることがわかった。そこで、本研究ではベイジアンネットワークを使ったデータ除去手法を提案する。我々は、ベイジアンネットワークを用いた提案手法により実際には実現不可能な移動パターン誤検知とし、ノイズデータと定義した。具体的には入り口を通過せずに発生した室内の移動パターンである。それらノイズデータをデータインスタンスより除去することで、異常検知精度が向上していることを確認した。本章の構成を以下に示す。まず、3.2節で本研究と関連する先行研究を紹介し、本研究の位置づけを示す。そして、3.3節で試作したセンサネットワークと異常検知手法について述べる。その後、3.4節において提案するノイズ除去手法について説明する。3.5節では、評価実験の結果と得られた知見について示す。そして最後に、3.6節で本章のまとめと今後の課題を示す。

3.2 関連研究

3.2.1 関連サービス

防犯分野で異常を検知するシステムは多く提供されている。代表的なのがセコム株式会社の提供するセコム・ホームセキュリティシステム [54] や ALSOK 総合警備保障の提供するホームセキュリティシステム [55] である。以上のシステムは主に侵入経路と生活空間に設置された人感センサ、窓や玄関などに設置された開閉センサ、警備会社への通報ユニットで構成されている。高齢者見守りの分野でも多くのサービスや研究があり、高齢者宅に設置された電気ポットを用いて電気ポットがいつ使われたかといった情報を親族に通知するサービス [48]、人感センサを用いて高齢者の行動パターンを分析し、異常時に通報を送るシステム [49][50]、RFID や荷重センサを家庭の各箇所に設置して行動パターンを分析し、異常時に通報を送るシステム [51]、ウェアラブルセンサによる体温情報監視システム [52] ま

た、カメラを用いた動画による異常検知システム [53], などがある。

以上のサービス・研究の問題点として、専用品を用いているため一般的にコストが高く・異常通報するシステムでは誤報が多いとシステムの信頼性が保てなくなる。また、常に動画を撮影するとプライバシーの問題があるといった点がある。我々は、人間の動きのみを検知するモーションセンサを用いることで、プライバシーに配慮したワイヤレスセンサネットワークを開発した。

3.2.2 異常検出に関する研究

近年、センサを用いてセンシングしたデータやクレジットカードの使用履歴など様々なデータを解析することにより異常検出を行う Anomaly Detection[37] と呼ばれる研究が多くの研究分野とアプリケーションドメイン内で研究されている。Anomaly Detection の研究分野の主な技法は大半が、分類技法をもとにした技術のカテゴリ、最近傍法をもとにした技術のカテゴリ、及びクラスタリング技法をもとにした技術のカテゴリ、統計技法をもとにした技術のカテゴリに分類することができる。また、いくつかの技術は情報理論をもとにした技術のカテゴリ、スペクトル理論をもとにした技術のカテゴリに属している。以上のように様々な技法が存在しており、実際に運用されているシステムとしては、コンピュータ・ネットワーク上のハッキングされたコンピュータが不正に機密データを送信していることを意味する異常なトラフィックパターンの検出 [57], MRI 画像中の悪性腫瘍の存在を示す異常の検出 [38], 宇宙機の幾つかの部品の障害を意味する宇宙機のセンサからの異常な測定値の検出 [39], などが研究されている。ワイヤレスセンサネットワークからのストリーミングデータの信頼性がユーザの観点から重要なことから、センサ間の条件付き依存関係を考慮したベイジアンネットワークによるセンサの異常値を検出する研究 [40], ワイヤレスセンサネットワークを使って位置検出を行うシステムにおいて、敵によって引き起こされる位置情報の異常を検出するため統計モデルを使う研究 [41], 気象データを収集する分散型ワイヤレスセンサネットワーク内の異なるノードから集めたデータを融合し、スペクトル理論を使った異

常検出を行う研究 [42] などがある。

以上の研究の特徴として異常状態と正常状態の定義がしやすいことが挙げられる。一方、我々は独居高齢者における異常は通常的生活パターンの中での異常を検知することを目標としている。そのため、通常的生活の中における境界が決定しづらい状況の中で異常と正常の境界を設定する必要がある。

本研究は、単純な人感センサのデータによる異常検知を行うため、教師あり学習を行うことが出来る SVM を用いることとした。更に、ノイズデータをベイジアンネットワークを用いた手法により除去することで、異常検知精度が向上することを確認した。

3.3 ワイヤレスセンサネットワークによる異常検知

3.3.1 設置が容易なセンサネットワークの開発

我々は独自にワイヤレスセンサネットワークシステム的设计・開発を行った。センサユニットは電池駆動、無線通信が可能で人感センサを搭載し、置くだけで設置が完了する。受信ユニットには、マイクロプロセッサを内蔵しており、センサ ID と検知時刻を統合してサーバーへ送信する。以上により、センサユニットに関しては置くだけで設置が完了するワイヤレスセンサネットワークシステムを開発した。

受信ユニットはセンサユニットから送信される情報と ZigBee モジュールが個々に持つ 64bit アドレスをサーバーへ送信する。サーバーは受信したデータを web ページを通して表示し、ユーザがセンシング状況を閲覧することを可能としている。

システムの概要を図 3.1 に示す。

また実際にセンサユニットを設置する際には回路基板を筐体に格納して設置を行う。使用する筐体も事前実験での知見 [3] からアクリル製 75mm 角の黒い立方体を用いて設置が容易な構造としている。

センサユニットの構成を以下に示す。

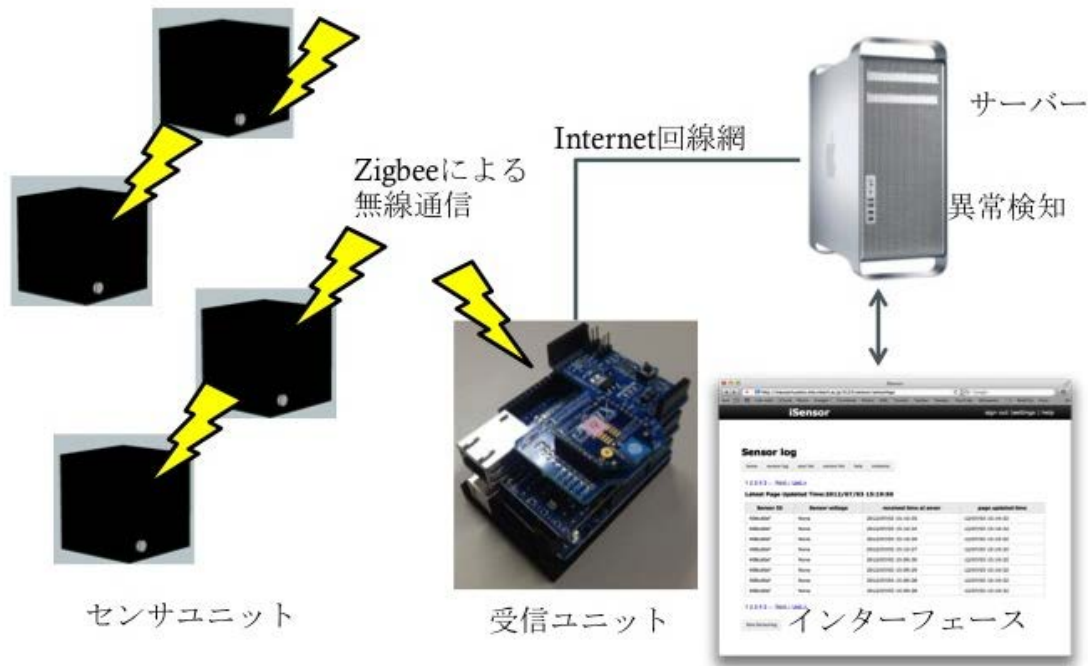


図 3.1: システム概要図

- Zigbee モジュール (Digi Corp. Xbee S2B)
- モーションセンサ
(Panasonic Corp. Motion sensor Napiion シリーズ)
- DC-DC コンバータ
(Linear Technology Corp. LTC3105)
- Li-バッテリー
(S.T.L Japan Corp. LI-3400SP 3.7V4000mAh)

現在の回路構成はユニバーサル基板上に実装されており、現状でも 75mm 角と小型であるが、専用の回路基板を設計することで更なる小型化を目指している。また、低消費電力の DC-DC コンバータを用いることで低消費電力を実現している、これによりバッテリーでの稼働時間を延ばすことができた。本 DC-DC コンバータは

250mv と超低電圧からの入力が可能となっており、主に環境発電（エネルギーハーベスト）や太陽光発電モジュール向けに設計されている。具体的には、振動発電や小型の太陽光発電モジュールからの超低電圧の入力にも耐えうる製品であるため、将来的には内蔵バッテリーだけでなく微小な振動発電装置や太陽光発電モジュールなどのユニットとのハイブリッド構造とすることで稼働時間を延ばせるよう採用している。

また、バッテリーを内蔵することで、置くだけでセンサユニットの設置が完了する。さらに、センサユニットは通常スリープ状態になっておりセンサからの入力により起動し受信ユニットへセンシング情報を送信していることで、低消費電力を実現した。

3.3.2 モーションセンサの問題点

我々は、設置場所のプライバシーに配慮し、人間の動きのみを検知し、個を判断できないモーションセンサーを用いている。モーションセンサは赤外線センサの一種であり、赤外線センサは、赤外領域の光（赤外線）を受光し電気信号に変換して必要な情報を取り出して応用する技術、またその技術を利用した機器である。利点としては、人間の視覚を刺激しないで物を見られることや、対象物の温度を遠くから非接触で瞬時に測定できるなどの特徴を持つ。モーションセンサは、生活の至る所で使用されており、代表例としては人体を検知した際にライトを点灯させるセンサライト等が挙げられる。また、検知範囲には指向性があり、対象とする検知範囲を把握しやすい。更に、距離が離れるとともに扇状に検出範囲が拡大するため、1つのセンサでカバーできる検知範囲が広いといった特徴がある。検知範囲例を図 3.2 に示す。

しかし、周囲との温度差がある物体に対しても反応してしまうという問題点がある。以下に具体的な誤検知の原因例を示す。

- 窓に一部分のみ太陽光が当たっている状況
- 出力の強い赤外線リモコン

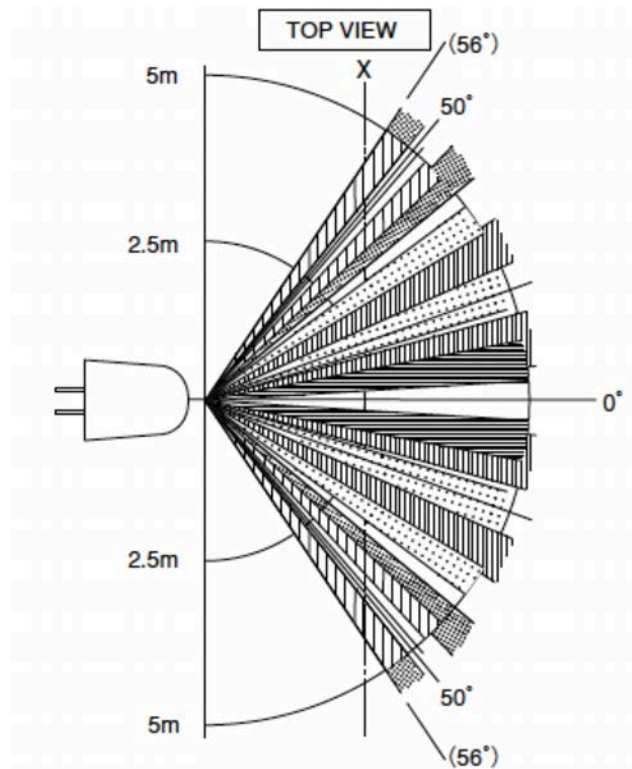


図 3.2: 一般的なモーションセンサの検知範囲例

- 洗濯機や扇風機に内蔵されたモーター等の熱源
- 白熱電灯などの熱源

3.3.3 SVM による異常検知手法

Anomaly Detection[37] の研究分野では一般に異常の定義はその異常の性質から 3つのカテゴリに分類されている。1つ目は個々のデータインスタンスがデータの残りの部分に対して異常とみなすことができる場合、そのインスタンスは点異常と呼ばれる。2つ目はデータインスタンスが特定の文脈に対して異常がある場合、そのデータインスタンスは文脈異常（または条件付き異常）と呼ばれる。各データインスタンスはコンテキスト属性と行動属性を持ち、コンテキスト属性により

各インスタンスの状況を行動属性で各インスタンスの文脈とは関係のない特性を定義する。3つ目は関連するデータインスタンスのコレクションがデータセット全体に対して異常である場合、そのデータインスタンスのコレクションは集団異常と呼ばれる。

本研究では介護ドメインと研究室ドメインにおいて共通する「日常とは違う時間帯での活動という文脈異常」の検出を目的としている。また実証実験では研究室室内において行っているが、共通する異常を対象としている点では研究室ドメインでの異常検出手法は介護や見守りドメインにおいても同様に適用可能であると考えている。

高齢者見守り支援における異常とは、日常の活動している時間帯という文脈からデータを解析し、日常とは違う異なる行動という文脈異常を検出することを目的としている。また、機械学習により設置宅毎に通常的生活パターンを学習させることによって個々の生活パターンに応じた異常検知を行うことが可能となる。

実際にワイヤレスセンサネットワークシステムから取得されたセンサデータの例を表3.1に示す。取得データは、センサノードの固有IDとバッテリー電圧、及びセンサ検知時刻である。

表3.1: 取得センサデータ例

デバイスID	電圧	検知時刻
40981d4f	3.8	2012-08-20 15:49:17 +0900
40981d4f	3.8	2012-08-20 15:49:31 +0900
40981d4f	3.8	2012-08-20 15:49:32 +0900
40981d4f	3.8	2012-08-20 15:49:36 +0900
40981d4f	3.8	2012-08-20 15:49:38 +0900
40981d4f	3.8	2012-08-20 15:49:45 +0900
40981d4f	3.8	2012-08-20 15:49:46 +0900
40981d4f	3.8	2012-08-20 15:49:47 +0900

SVMに用いる素性は、開発したワイヤレスセンサネットワークシステムにより収集したデータによって生成する。表3.1に示したデータにより3つの素性を生成する。1つ目はセンサデータの検知時刻の「時間」、2つ目はセンサデータの検知時刻の「分」、そして3つ目はセンサデータの検知時刻の「秒」である。

以上の特徴を用いてSVMに学習させる。素性は、先頭にラベル、続いて「時間」、「分」、及び「秒」を1行に書き込んだものを使用する。また、実験時には学習データとしての素性を生成する。学習データにおける素性は、先頭に、正例ならば"+1"、負例ならば"-1"を行の先頭に書き込む。上記に記した処理を行う事で、SVMに正常クラスと異常クラスを認識させている。

3.3.4 不均衡データへの対処

SVMによる異常検知手法で使用するSVMは教師あり学習を行い分類境界を設定する。教師あり学習を使用した異常検出では訓練データ内の異常データは正常なデータと比較して、はるかに少ないという問題がある。本問題は機械学習やデータマイニングの研究分野で問題として多く挙げられており、データセットが不均衡であるため、分類性能の低下を引き起こしている[44]。そのため、多くの解決法が提案されている。具体的には、ランダムなオーバースampling、ランダムなアンダーサンプリング、及び誘導されたオーバースampling、誘導されたアンダーサンプリング。またはこれらの技術を組み合わせた手法が存在する。

アルゴリズムレベルでは次のような解決法が提案されている。クラスの不均衡に対処するためそれぞれのクラスのコストを調整するもの、判定しきい値を調整するもの、デシジョンツリーの葉の確率推論を調整するものなどがある。

本研究では、負例データをランダムにオーバースamplingすることにより不均衡を解決するSMOTEアルゴリズム[43]により予測精度を向上する手法を採用した。更に、観測された異常データにおいてノイズが多数観測されたため、ベイジアンネットワークによるノイズ除去を行っている。次節で詳細を述べる。

3.4 ベイジアンネットワークを用いたノイズ除去手法

3.4.1 センサネットワークの設置

本項では、ベイジアンネットワークを用いたノイズ除去手法について述べる。本研究で開発した設置が容易なセンサネットワークでは、一般ユーザーが容易に設置できることを特徴としている。しかし、センサ設置の知識がないユーザーが設置した場合、白熱灯やモーター等の熱源反応を気にせず設置することも考えられる。そのため、本研究では外的要因によるノイズを除去することで異常検知の精度が向上させる。

実際のデータセットにも外部環境の変化によるセンシングデータといったノイズが含まれており、ノイズが予測精度を下げていることが判明したため、ベイジアンネットワークを用いたノイズ除去の手法を提案する。

本研究では、開発したセンサネットワークを本研究室内の実験室に3つのセンサを設置してセンシングデータを収集した。センサユニットは実験室の動線にあわせて設置しており部屋全体をセンシング可能とするべく動線に沿った配置となっている。実験室の見取り図とセンサユニットの配置図を図3.3に示す。また図3.3では各センサユニットの検知範囲も示している。センサユニットに搭載されたモーションセンサは、距離が離れると検知範囲が線形に増加するため、センサユニットを中心として、扇状の検知範囲となる。本実験で使用したデータは2012年12月1日から2012年12月8日のデータを用いた。図3.3が示すように実験室は中央に会議机があり、通路が多く存在している。そのため、一般の住宅のように廊下に向けて設置した場合と類似した環境と考える。

3.4.2 ベイジアンネットワークの構築

本実験では実験室内の各センサ a , b , 及び c の検知範囲を A , B , 及び C と設定し、4つのノード A , B , C , 及び室外を使用して実験室内の人の移動モデルを構築した。室外より実験室内に入るためには検知範囲 A を通らなければならない

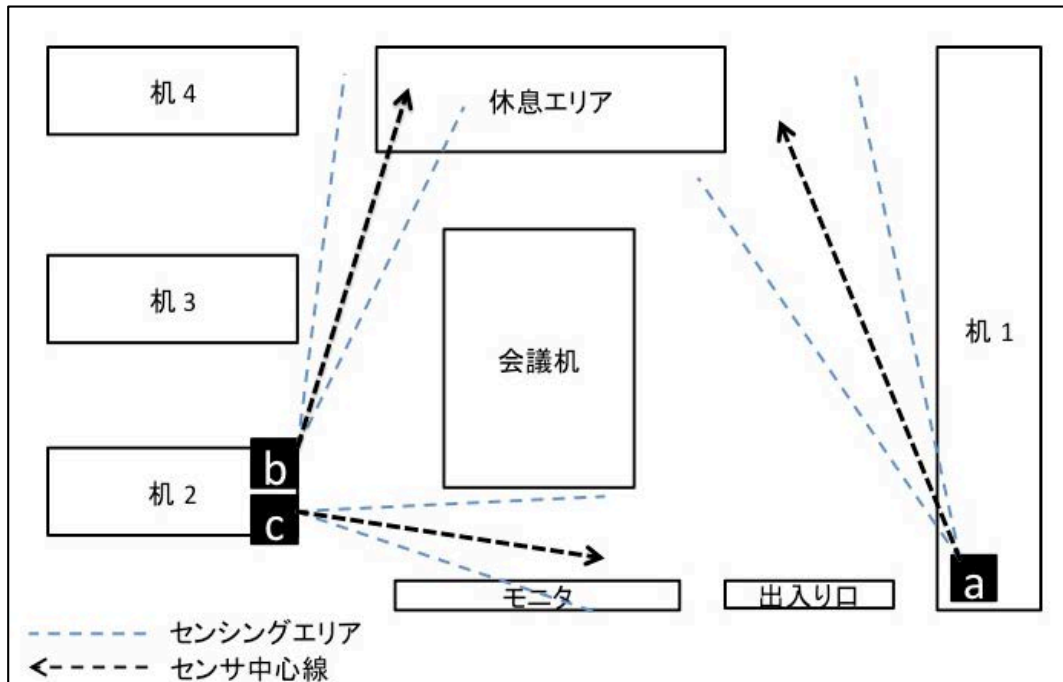


図 3.3: 実験室の配置図とセンサユニット配置図

ため、構築した移動モデルでは室外と検知範囲 A 間の移動と、室内での移動である検知範囲 A と検知範囲 B 間の移動、検知範囲 A と検知範囲 C 間の移動、及び検知範囲 B と検知範囲 C 間の移動が可能と設定している。そのため、検知範囲 B から室外、検知範囲 C から室外への移動は不可能と設定している。実際に構築した移動モデル図を図 3.4 に示す。

構築するベイジアンネットワークは原因となる確率変数をセンサを設置した実験室内のセンサ a の検知範囲からセンサ b の検知範囲への移動（以降 ab と表示する）などと設定する。

原因ノードとなる確率変数の確率設定の方法について述べる。確率設定ではセンサデータから一定時間以内に連続して発生したセンサデータの並びをカウントする。本実験では一定時間を 1 分間に設定してカウントした。1 分間という数値は、その場にいる人間をモーションセンサで検知した場合 1 分間の間に、全く動作を

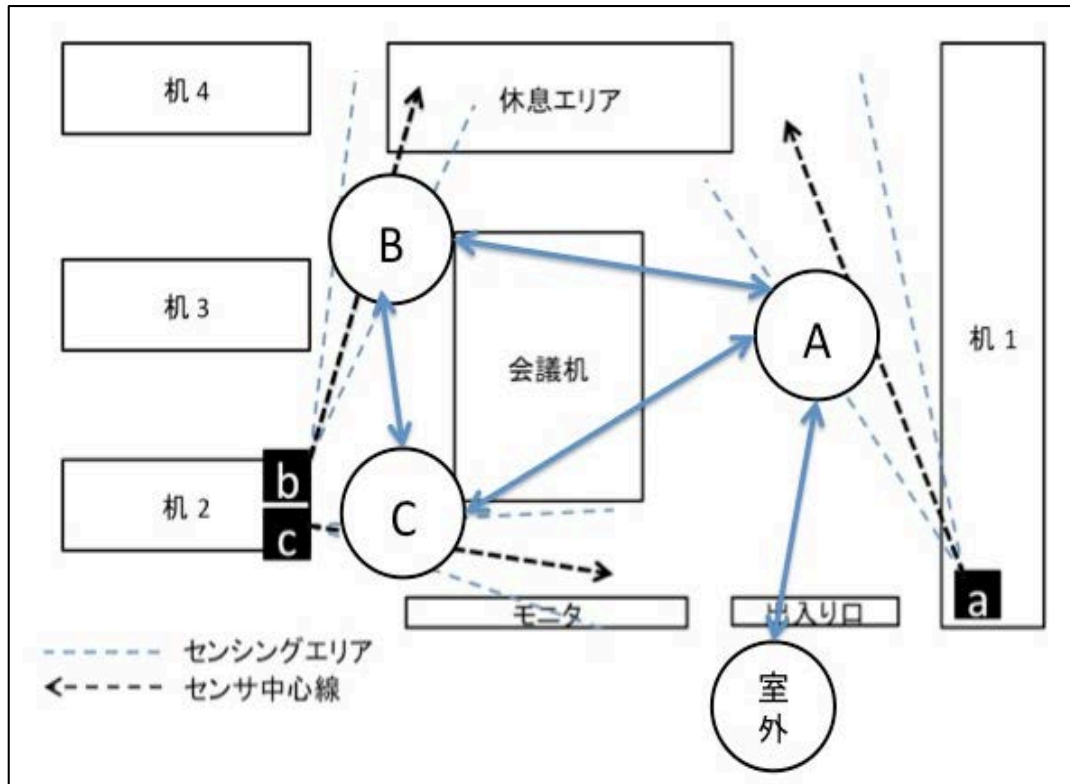


図 3.4: 実験室内での移動モデル図

しないことはあり得ないため、設定した。

以上により、センサデータの並びをカウントすることで、各センサの検知範囲内からの遷移確率を求める。

本実験ではそれぞれのセンサデータの並びのカウントと遷移確率を求めた。表 3.2 にセンサの並びのカウントと遷移確率を示す。

表 3.2 の遷移確率を遷移確率行列で表す。式 (3.1) に遷移確率行列の定義を示す。 δ (一定時間後) にセンサが反応した場合の列については 3 つの組み合わせのみとなる。

表 3.2: 実験から求められた遷移確率

センサデータの並び	カウント	遷移確率
AA	3836	0.4787818
AB	1421	0.1773590
AC	2658	0.3317524
AΔ	97	0.0121068
BA	1393	0.0733312
BB	7500	0.3948200
BC	9811	0.5164772
BΔ	292	0.0153717
CA	2696	0.0945169
CB	9774	0.3426588
CC	1568	50.5498878
CΔ	369	0.0129365
ΔA	87	0.1147757
ΔB	301	0.3970976
ΔC	370	0.4881266

$$P = \begin{pmatrix} p_{aa} & p_{ab} & p_{ac} & p_{a\delta} \\ p_{ba} & p_{bb} & p_{bc} & p_{b\delta} \\ p_{ca} & p_{cb} & p_{cc} & p_{c\delta} \\ - & p_{\delta a} & p_{\delta b} & p_{\delta c} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

式 (3.2) にセンサデータより計算した遷移確率行列を示す.

$$P = \begin{pmatrix} 0.47878 & 0.17735 & 0.33175 & 0.01210 \\ 0.07333 & 0.39482 & 0.51647 & 0.01537 \\ 0.09451 & 0.34265 & 0.54988 & 0.01293 \\ - & 0.11477 & 0.39709 & 0.48812 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$\pi_1 = P(a), \pi_2 = P(b), \pi_3 = P(c), \quad (3.3)$$

$$\pi_4 = P(\Delta)$$

$$\pi = \pi P, \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1 \quad (3.4)$$

定常確率 π にて表すことで、各ノードの定常確率を式 (3.3) で定義すると式 (3.4) より定常確率が求められる。定常確率は計算の結果、表 3.3 のように求められる。

表 3.3: 実験から求められた定常確率

π_1	0.138121243
π_2	0.331184645
π_3	0.504725888
π_4	0.025968225

求めた定常確率と遷移確率を積算し、各移動毎に生起する確率を求めた。求めた各移動の生起する確率を表 3.4 に示す。

3.4.3 結果ノードの設定

構築するベイジアンネットワークは実験室内を一定時間以内に連続して発生したセンサデータの並びと設定する。次に、条件付き確率 $P(X|Y)$ を求めることで $X \in$ 結果ノード、及び $Y \in$ 原因ノードが求められる。ここで、本実験では実験室内において検知範囲 A から検知範囲 A までの周回移動を 100 回行うことで、発生する

表 3.4: 実験から求められた原因ノードの確率

$P(\delta a)$	0.0046527
$P(aa)$	0.0661299
$P(ab)$	0.0487832
$P(ac)$	0.0935272
$P(bb)$	0.1307583
$P(bc)$	0.3439981
$P(cc)$	0.2775426
$P(\text{noise})$	0.0346079

センサデータ列のサンプリングを行った。サンプリングにより得られたデータより原因ノードの確率を計算した。以上の結果からセンサ間の移動結果ノードを観測各原因ノードの確信度を計算した。確信度の結果は表 3.5 に示す。

表 3.5: 原因ノードの確信度

	aa	ab	ac	a δ	ba	bb	bc	b δ	ca	cb	cc	c δ	δa	δb	δc
$P(\text{NOISE} X)$	0.021	0.021	0.020	0.021	0.021	0.020	0.020	0.554	0.020	0.020	0.020	0.448	0.021	0.665	0.643
$P(\delta A X)$	0.008	0.003	0.003	0.427	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.427	0.003	0.003
$P(AA X)$	0.742	0.040	0.039	0.305	0.040	0.039	0.038	0.039	0.039	0.038	0.038	0.039	0.305	0.039	0.039
$P(AB X)$	0.116	1.000	0.029	0.127	1.000	0.066	0.028	0.059	0.029	0.028	0.028	0.029	0.127	0.065	0.029
$P(AC X)$	0.221	0.057	1.000	0.243	0.057	0.055	0.054	0.056	1.000	0.054	0.092	0.101	0.243	0.056	0.122
$P(BB X)$	0.080	0.080	0.079	0.080	0.080	0.677	0.076	0.237	0.079	0.076	0.077	0.078	0.080	0.079	0.079
$P(BC X)$	0.225	0.226	0.224	0.226	0.226	0.465	1.000	0.420	0.224	1.000	0.349	0.380	0.226	0.461	0.453
$P(CC X)$	0.177	0.178	0.177	0.178	0.178	0.174	0.170	0.176	0.177	0.170	0.829	0.434	0.178	0.176	0.176

表 3.5 の太字項目が各結果ノードの確率変数が観測された時最も確信度の高い項目になる。この結果からノイズが原因であると推定されるセンサデータの並びは $b\delta, c\delta, \delta b$, 及び δ の 4 つである。この結果から図 3.4 で定義した実験室内の移動モデルから現実的に移動が不可能である $b\delta$ と $c\delta$ の移動が生起する確率はノイズと設定した。評価実験ではセンサデータを除去前と除去後で予測精度の比較を行う。

3.5 評価実験

3.5.1 実験設定

本項では、研究室内に設置されたセンサシステムからのデータをSVMを用いた異常検知により評価する。次に、ベイジアンネットワークを用いた提案手法によりノイズと推定されたセンサデータの並びを訓練データから除去し、得られた評価値の比較を行うことで提案手法の有効性を示す。

本研究において、異常検知手法の評価指標として、訓練データから異常クラスとラベル付けられているデータを分類する際の正解率、適合率、再現率、及びF値を用いて評価を行う。

正解率を式(3.5)で求め、F値の値は、適合率(Precision)を式(3.6)で求め、再現率(Recall)を式(3.7)で求め、各値を用いて式(3.8)でF値を計算する。正解率は、異常クラスと正常クラスと分類されたデータインスタンス数のうち、どれだけ正しく異常クラスと正常クラスに分類されているかを示し、適合率は、異常クラスと分類されたデータインスタンスのうち、どれだけ正しく異常クラスと分類されているかという正確性を表している。再現率は訓練データに含まれる異常クラスとラベル付けられたデータインスタンスの内どれだけ異常クラスと分類できているかという網羅性を表し、適合率と再現率の調和平均によりF値を表す。

$$\text{正解率} = \frac{\text{異常又は正常と判断したデータインスタンス数}}{\text{分類された全データインスタンス数}} \quad (3.5)$$

$$\text{適合率} = \frac{\text{異常データと判断したインスタンス数}}{\text{異常と分類されたデータインスタンス数}} \quad (3.6)$$

$$\text{再現率} = \frac{\text{異常クラスと判断したデータインスタンス数}}{\text{テストデータ中の異常データインスタンス数}} \quad (3.7)$$

$$F \text{ 値} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (3.8)$$

本研究で行う評価実験について述べる。

評価実験では、研究室に設置し稼働実験を行ったセンサシステムによるデータに対し手動でラベル付けを行い、その学習データを 5-fold-cross-validation 及び SVM の各カーネル関数に対しパラメータ調整を行う。

また、本論文では、精度向上手法として提案した不均衡データへの対処法の 1 つの SMOTE アルゴリズムに関し、ラベル付けをした学習データに対し SMOTE アルゴリズムを適用する。その後パラメータ調整を行うとともに、5-fold-cross-validation を各カーネル関数に対して実施して分類精度の比較を行うことで予測精度が向上したことを示す。またベイジアンネットワークによってノイズが原因と推定されたセンサデータの並びをセンサシステムからのデータセットから除去して、データを手動でラベル付を行った後、学習データに対し SMOTE アルゴリズムを適用する。その後パラメータ調整を行うとともに、5-fold-cross-validation を各カーネル関数に対して実施して分類精度の比較を行うことで提案手法がノイズ除去に対し有効であることを示す。

評価実験では、本研究で開発したセンサシステムから 2012 年 8 月 1 日から 2012 年 8 月 31 日までに得られたデータインスタンスを使用した。異常クラスとラベル付けされたデータインスタンスが 2,000 件であり、正常クラスとラベル付けされたデータインスタンスは 70,000 件である。異常クラスと正常クラスの合計 72,000 件のデータインスタンスを用いて、訓練データの生成を行った。正常クラス及び異常クラスのラベル付けは手動で行い、クラスを判別する基準として、前後 1 週間のデータと比較し日常的に活動していない時間帯を区別した。具体的には、日常的に移動していない時間帯に反応しているデータインスタンスは異常とラベル付けをし残りは正常とラベル付けを行った。

3.5.2 カーネル関数ごとの比較結果

本研究で提案した SVM によるデータインスタンスの検知時刻を素性に用いた異常検出手法による異常クラス正解率、適合率、再現率、及び F 値を表 3.6 に示す。

表 3.6 を見ると RBF カーネルを使った学習方法が最も良い予測精度をだしてい

表 3.6: 提案手法の各カーネル関数毎の評価値

	正解率	適合率	再現率	F 値
線形カーネル	0.853	1.000	0.853	0.921
多項式カーネル	0.859	0.995	0.861	0.923
RBF カーネル	0.859	0.995	0.861	0.923
シグモイドカーネル	0.776	0.871	0.866	0.869

る。しかしながら用いている訓練データが異常クラスとラベル付けされたデータインスタンスが 2000 件、正常クラスとラベル付けされたデータインスタンスを 70,000 件、合わせて 72,000 件の訓練データで、異常正常の割合が約 9 対 1 と極端で不均衡クラス分布になっている。不均衡なデータを用いた場合、予測モデルの精度が低下することが知られているため、不均衡の解消が必要である。また、使用している訓練データは開発したシステムが蓄積したデータをそのまま使用しているため、開発したセンサユニットの誤作動や故障・検出対象としている日常の活動している時間帯という文脈とは関係のない外部環境の変化によるセンシングデータといったノイズが使用しているデータセットに含まれていると考えられる。ノイズによる予測モデルの精度低下を防ぐためにもノイズの除去が必要である。

3.5.3 SMOTE アルゴリズムの効果

本論文では不均衡データへの対処によって予測精度を向上していることを示すため、研究室内に設置したセンサシステムからのデータを基にラベル付けを行った学習データに対し SMOTE アルゴリズムを適用した。その後パラメータ調整と 5-fold-cross-validation を各カーネル関数に対して実施することで分類精度を示す。SMOTE アルゴリズムを適用するデータは 7 万 2 千件のセンサデータに対し適用し正常クラス 9 千件、異常クラス 9 千件に調節を行った。SMOTE アルゴリズムを用いて不均衡データに対処した異常検出手法による異常クラスの正解率、適合率、再現率、及び F 値を表 3.7 に示す。

表 3.7: SMOTE アルゴリズム適用後の各カーネル関数毎の評価値

	正解率	適合率	再現率	F 値
線形カーネル	0.900	0.942	0.868	0.904
多項式カーネル	0.867	0.981	0.798	0.880
RBF カーネル	0.980	0.973	0.987	0.980
シグモイドカーネル	0.934	0.962	0.912	0.936

不均衡データの調整を行った結果、各カーネルによる学習モデルの予測精度は向上した。本結果から不均衡データへの対処を行うことで、予測精度の向上が示せた。また RBF カーネルによる学習モデルの予測精度が高いことから、現在使用しているデータ構造に適しているといえる。

3.5.4 ノイズ除去手法の効果

本研究では提案したベイジアンネットワーク用いたノイズ除去手法に対し、研究室に設置したセンサシステムからのデータを手動でラベル付けを行うことで学習データを作成する。その後、学習データに対し SMOTE アルゴリズムを適用している。さらに、ベイジアンネットワークによってノイズが原因と推定されたセンサデータを収集したデータから除去し、データを手動でラベル付けを行い、学習データを作成する。また、学習データを作成した後に、学習データに対し SMOTE アルゴリズムを適用する。その後、パラメータ調整と 5-fold-cross-validation[47] を実施して分類精度を示し、比較を行うことで、提案手法の有効性を示す。

ノイズ除去を行う前の異常検出手法による異常クラスの正解率、適合率、再現率、及び F 値を表 3.8 に示す。

ノイズ除去を行った後のデータを使用した異常検出手法による異常クラスの正解率、適合率、再現率、及び F 値を表 3.9 に示す。

ノイズ除去前の表 3.8 とノイズ除去後の表 3.9 の結果を比較して、ノイズ除去を行った結果、RBF カーネル以外のカーネルでは予測精度が向上した。本結果から

表 3.8: ノイズ除去前の各カーネル関数毎の評価値

	正解率	適合率	再現率	F 値
線形カーネル	0.983	0.983	0.984	0.983
多項式カーネル	0.991	0.998	0.984	0.991
RBF カーネル	0.992	0.993	0.992	0.992
シグモイドカーネル	0.979	0.979	0.980	0.979

表 3.9: ノイズ除去後の各カーネル関数毎の評価値

	正解率	適合率	再現率	F 値
線形カーネル	0.987	0.983	0.991	0.987
多項式カーネル	0.994	0.997	0.991	0.994
RBF カーネル	0.990	0.989	0.991	0.990
シグモイドカーネル	0.984	0.979	0.990	0.984

ノイズ除去による予測精度が向上した。また、ノイズ除去の結果 RBF カーネルを使った学習モデルでは精度が悪化している。理由としてはノイズ除去の際、精度の高い分類境界を作るサポートベクトルに当たるデータを誤って消去したためと考える。

本論文で行った実験の結果から、提案手法である SVM を使ったセンサデータの解析による異常検知手法により本研究の検出対象である「日常とは違う時間帯での活動という文脈異常」が検出できることを確認した。本論文で行った結果から、SMOTE アルゴリズムを適用したデータの解析結果が他のカーネル関数と比較し、予測精度が優秀であることを示した。また、ベイジアンネットワークによりノイズであると推定されるセンサデータの並びを特定し、ノイズを除去することで予測精度が向上した。本結果から提案手法はノイズ除去に対して有効であることを示した。

3.6 結言

本論文では、設置が容易なセンサネットワークによる異常検知手法を提案した。提案手法により本研究の検出対象である「日常とは違う時間帯での活動という文脈異常」が検出できることを示した。生活における人感センサのデータ列には、設置場所の環境要因や家電製品の動作などによる避けられないノイズデータが含まれる。我々は、それらのノイズデータをベイジアンネットワークにより除去することで、生活の中での異常を検知することが可能であることを示した。またベイジアンネットワークを実験により構築してノイズであると推定されるセンサデータの並びを特定し、そのセンサデータを除く前と除いた後のデータセットを用いて分類し評価を行った。結果、RBF カーネル以外のカーネルでは予測精度が向上した。結果からノイズ除去による予測精度の向上が示せた。RBF カーネルの性能低下理由としてはノイズ除去の際、精度の高い分類境界を作るサポートベクトルに当たるデータを誤って除去したためと考える。そこでノイズ除去の際にノイズでは無いデータの消去を防ぐため、ベイジアンネットワークの結果ノードの確率変数を2つのセンサ列から3つのセンサ列に増やして詳細化を行う。また原因ノードを多段化することでノイズ推定の精度を高めることで、より詳細にノイズ除去を行えるよう改善を図る。

本手法は、接触によるセンシングやカメラ画像によるセンシングとは異なり、ノイズ源の多いセンシング方法においても必要なデータのみを抽出することが可能であることを示した。特に、カメラ画像を使用せず、プライバシーに配慮した住民行動のセンシングにおいての有効性を示したが、精度の低いセンサを大量に使用した場合のノイズデータの除去などにおいて、本手法を応用することで、ノイズデータを除去することも可能であると考えられる。さらに、生活の中での異常を判断するためには、個人毎に異なる生活パターンを学習し、パターンから外れた値を検出した際に異常とみなすことが重要である。そのため、ノイズデータの除去だけでなく、個々人の生活習慣をモデル化することで、個人毎に異なる生活パターンの違いに対応可能な異常検知手法を構築する。

第4章 住民の平均行動量に基づく異常検知

4.1 序言

2章で述べたとおり、従来は大型だった通信モジュールや各種センサ類の小型化が進むとともに、通信モジュールとセンサを組み合わせた無線通信によるセンサネットワークの研究が多く行われている。従来型のセンサを用いた研究では少数の高価なセンサを特定の場所に据え付けて測定を行い、測定値についてもセンサ近傍に出向かなければ得ることができない。しかし、近年のワイヤレスセンサネットワークは安価なセンサを任意の場所に大量にばらまくことで”点”の情報ではなく”面”で情報をとらえることが可能になっている。これにより、ある程度の精度が確保された安価なセンサを利用でき、少量の高価なセンサを用いるよりも精度の点でも有利となっている。また、ワイヤレスセンサネットワークの特徴としてリアルタイムの情報を取得可能ということが挙げられる。代表的な例として、橋梁や高速道路などの建造物における健全性をモニタリングする構造センシングや温度や湿度を大規模に計測して可視化を行う環境センシングなどが挙げられる。更に、取得した情報を照明や空調システムのフィードバック制御に用いることで電力消費量を減少させる研究も行われている。また、内蔵したプロセッサにより搭載した各種センサ情報によるフィードバック制御、他のユニットと相互通信を行うことで自律動作を行うロボット群についてもワイヤレスセンサネットワークであり、広く研究が行われている。それに伴い、データの中での異常を検知する Anomaly Detection に関する研究の重要性が増している。我々は、人間の生活の中での異常な行動を検知することを目的とした研究を行っている。しかし、通常の行動の中

での異常を定義することは非常に難しい。本研究では、異常状態の定義を目的として、モーションセンサによって取得されたセンサデータを基に、行動量の平均を用いた住民活動モデルを作成するシステムを構築した。本稿の構成を以下に示す。まず、4.2節で本研究と関連する先行研究を紹介し、本研究の位置づけを示す。そして、4.3節でセンシングデータの取得方法について述べる。その後、4.4節において提案する住民活動モデルについて述べ、4.5節において実験結果と考察について述べる。そして最後に、4.6節で本稿のまとめと今後の課題を示す。

4.2 異常検知のための行動モデル作成

4.2.1 関連サービス

防犯分野で異常を検知するシステムは多く提供されている。代表的なのがセコム株式会社の提供するセコム・ホームセキュリティシステム [54] や ALSOK 総合警備保障の提供するホームセキュリティシステム [55] である。以上のシステムは主に侵入経路と生活空間に設置された人感センサ、窓や玄関などに設置された開閉センサ、警備会社への通報ユニットで構成されている。高齢者見守りの分野でも多くのサービスや研究があり、高齢者宅に設置された電気ポットを用いて電気ポットがいつ使われたかといった情報を親族に通知するサービス [48]、人感センサを用いて高齢者の行動パターンを分析し、異常時に通報を送るシステム [49][50]、RFID や荷重センサを家庭の各箇所に設置して行動パターンを分析し、異常時に通報を送るシステム [51]、ウェアラブルセンサによる体温情報監視システム [52] また、カメラを用いた動画による異常検知システム [53]、などがある。以上のサービス・研究の問題点として専用品を用いているため一般的にコストが高く・異常通報するシステムでは誤報が多いとシステムの信頼性が保てなくなる。また、常に動画を撮影するとプライバシーの問題があるといった点がある。そのため、我々は人間の動きを感知するモーションセンサのみを用いて、日常の生活をセンシングすることとしている。さらに、本研究と類似した製品として GE 社の QuietCare [56] も

存在する。QuietCare は我々と同じく人感センサを用いて住民の行動データを蓄積し、異常時に通報するシステムである。しかし、一定の行動がない場合に人間が判断して通報するというシステムを用いており、使用ユーザーが増加した場合には人件費が増大することが予想される。そのため我々は、日常の行動を蓄積し、平均行動量を用いて住民活動をモデル化することで異常を検出する。

4.2.2 異常検出に関する研究

近年、センサを用いてセンシングしたデータやクレジットカードの使用履歴など様々なデータを解析することにより異常検出を行う Anomaly Detection[37] と呼ばれる研究が多くの研究分野とアプリケーションドメイン内で研究されている。

しかし、多くの研究の特徴として異常状態と正常状態の定義がしやすいことが挙げられる。一方、我々は日常生活の中での異常は通常的生活パターンの中での異常を検知することを目標としている。そのため、通常的生活の中における境界が決定しづらい状況の中で異常と正常の境界を設定する必要がある。また、人間の行動は人によって異なり、一定ではない。本章では日常の行動の中での異常境界を判断するために、日常の行動パターンを可視化し、時間ごとの行動頻度をモデル化するシステムを提案する。

4.3 センシングデータの取得

4.3.1 設置が容易なセンサネットワーク

我々は独自にワイヤレスセンサネットワークシステムの設計・開発を行っている。本センサネットワークは誰でも簡単に設置できるセンサネットワークを目標として開発しており、センサユニットは電池駆動、無線通信が可能で人感センサを搭載し、置くだけで設置が完了する。受信ユニットには、マイクロプロセッサを内蔵しており、センサ ID と検知時刻を統合してサーバーへ送信する。通信方式には Zigbee を用いており、超低消費電力であり、容易にメッシュネットワークが

構築できる。消費電力については電源線も不要とするため、バッテリーで長期間動作可能であることが重要な要素である。例えばCR2032型ボタン電池のみで6ヶ月の稼働が可能であることと、例えばユニットAからユニットBへ通信したいときにピア to ピアの通信だけでなく他のユニットを自動で検知することで最適な通信ノードを用いて通信するメッシュネットワークが特別な設定なしに実現することができる。また、Zigbee モジュールは個別に 64bit アドレスを持ち、一つのネットワーク上に最大 65,536 個の Zigbee モジュールを接続することが可能であるため、多くのセンサユニットを接続する必要があるセンサネットワークには適している。Zigbee モジュールはリピータの役割も持っており、電波強度が弱い際には中間地点に設置された Zigbee が情報をリレーションすることにより最適な通信経路を選択することが可能となっている。メッシュネットワークの機能は通信状態が悪くなりがちな大きな家屋に設置するセンサネットワークを構築する上で非常に重要な要素である。本研究では、人感センサを搭載した誰でも簡単に設置が可能であり、かつ設置場所を自由に変えられることを特徴としている。システムの概要を図 4.1 に示す。

受信ユニットはセンサユニットから送信される情報と ZigBee モジュールが個々に持つ 64bit アドレスをサーバへ送信する。受信ユニットは AVR マイコンである Arduino を用いている。Arduino を用いることによりサーバーに全てを依存するのではなく、センサデータとセンサアドレスの統合といった簡単な処理は受信ユニットで行うこととしている。更に、PIC 等の汎用プロセッサと比較してプログラムの際に使用できるライブラリも多くあり、ソフトウェアや SDK のアップデートも盛んに行われている。Arduino 互換機も多く販売されており、プログラムのソースコードを様々な互換機にそのまま使用することも挙げられる。また、OTA(Over The Air) 経由でのソフトウェアアップデートにも対応しており、最新のソフトウェアを遠隔地から更新することも可能としている。外部 API によって Zigbee との相互通信機能もサポートされているため Zigbee モジュールのアップデートがあった場合でも遠隔地から Zigbee モジュールのファームウェア更新が可能である。これにより、常に最新のソフトウェアでの運用が容易に行える。

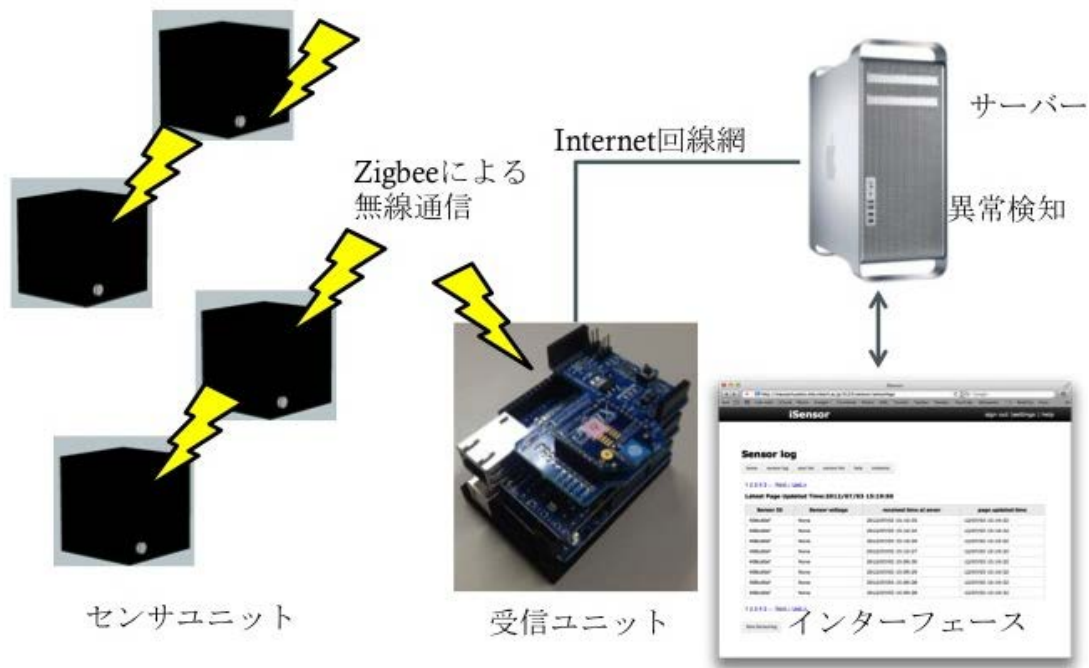


図 4.1: システム概要図

以下に受信ユニットの構成を示す

- Arduino Ethernet
- Zigbee モジュール
- Wireless SD シールド

Arduino Ethernet は POE 電源供給に対応しており、Ethernet ハブが POE 電源供給対応であれば電源ケーブルをつなぐ必要はなく、Ethernet ケーブルのみを接続すれば動作可能である。Wireless SD シールドはセンシングデータを micro SD カードに格納することも可能である。試作機では標準の Arduino ユニットを用いているが、Arduino は互換機が多く販売されており、超小型、低価格といった多くの用途別の製品群を選択することにより様々な用途に対応することができる。ま

た，大量に生産されているため低価格で入手が容易であることも特徴である．試作した受信ユニットを図4.2に示す．

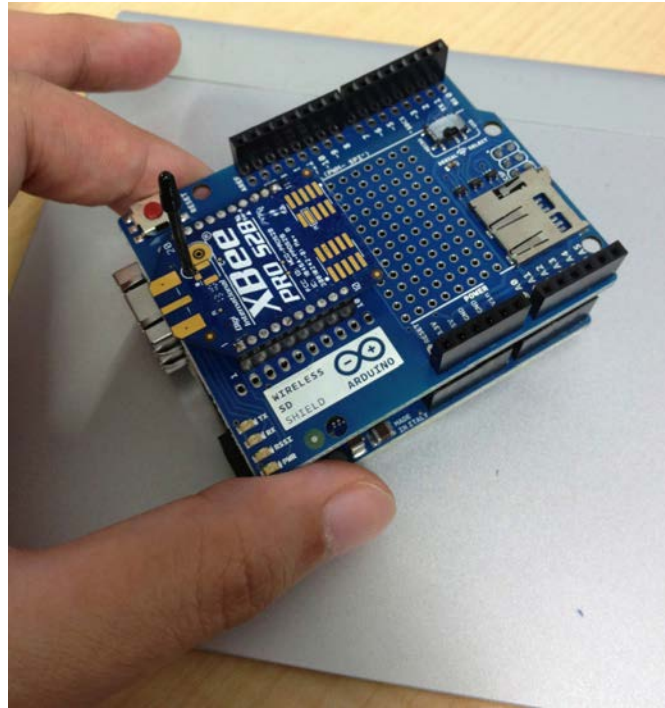


図4.2: 試作した受信ユニット

サーバは受信したデータを web ページを通して表示し，ユーザがセンシング状況を閲覧することを可能としている．web インターフェースでは以下の情報を閲覧することができる．

- センサ検知時間
- デバイス ID(Zigbee ユニットの 64bit アドレス)
- センサ設置位置
- センサを設置した部屋の名称

サーバは Ruby によって記述されており，5 秒ごとに最新の情報に更新されることで最新データを視覚的にわかりやすく表示している．また，64bit アドレスに

よって容易にセンサの設置位置と設置した部屋の情報をユーザーが自由に変更できる。この機能により、センサを追加した場合でも容易に設置場所欄へ追加したセンサを登録でき、設置場所毎にログを閲覧することができる。web インターフェースを図 4.3 に示す。

The screenshot shows the 'iSensor' web interface. At the top, there is a navigation bar with 'sign out | settings | help'. Below that, the page title is 'Place sensor log' and the current page is 'Sensor log'. A navigation menu includes 'home', 'sensor log', 'place list', 'sensor list', 'help', and 'contacts'. The page indicates it was last updated on 2012/07/08 13:01:13. A table displays the following data:

Device Id	Sensor voltage	Place	Time
4078f01e	None	秘書机前	2012/07/06 15:56:23
4078f01e	None	秘書机前	2012/07/06 15:56:22
4078f01e	None	秘書机前	2012/07/06 15:56:21
4078f01e	None	秘書机前	2012/07/06 15:56:20
4078f01e	None	秘書机前	2012/07/06 15:56:18
4078f01e	None	秘書机前	2012/07/06 15:56:17
4078f01e	None	秘書机前	2012/07/06 15:56:15
408cd0ef	None	玄関	2012/07/06 15:56:10
408cd0ef	None	玄関	2012/07/06 15:56:09
408cd0ef	None	玄関	2012/07/06 15:56:08
408cd0ef	None	玄関	2012/07/06 15:56:06
408cd0ef	None	玄関	2012/07/06 15:56:06

図 4.3: Web インターフェース

web インターフェースはスマートデバイスなどのブラウザを内蔵した端末やPCなどを用いることでどこからでもアクセスすることを可能としている。そのため、通知型のシステムと比較して、確認したい時にアクセスすることで自由に最新状況を閲覧できる。

使用する筐体については事前実験での知見 [3] からアクリル製 75mm 角の黒い立方体を用いて、家具や電化製品の上などに置いた際にもあまり目立たない外観としている。センサユニットの外観と内部の写真を図 4.4 に示す。

現状では、連続稼働時間は3ヶ月程度であるが、通信間隔の設定を変更することにより6ヶ月程度までは稼働可能である。以上のように、一般家庭でも運用が容易なセンサネットワークを開発しており、本研究にて開発している異常通報システムを用いることで一般家庭における異常行動を通報することを目標としている。

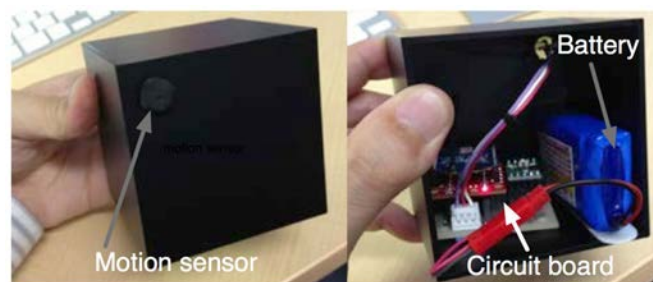


図 4.4: センサユニット筐体外観図, 内部図

4.3.2 設置環境

我々は実センシングデータを基に異常検知を行うため研究室に4つのセンサユニットを設置し、センシングデータを収集した。センサユニットは学生の動線に合わせて設置しており、人間の活動の激しい動線に対し直角に配置している。設置位置を部屋のレイアウトに合わせて変更することで生活空間のほぼ全てを網羅することが可能となった。研究室に設置したセンサユニットの配置図を図4.5に示す。本研究室は大きく分けて2つのエリアに分かれており、それらの机か

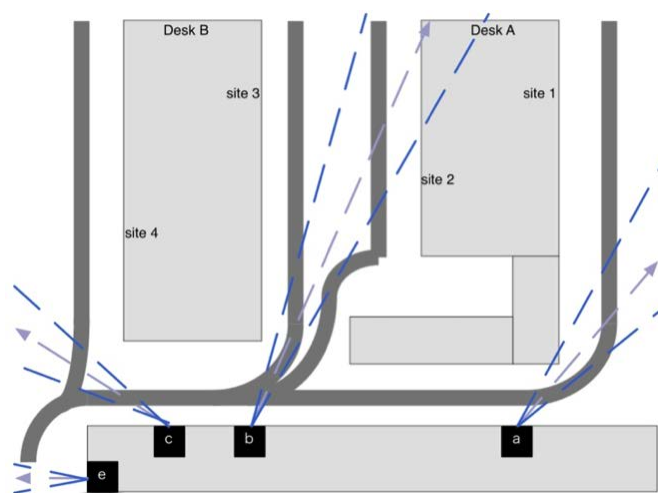


図 4.5: センサユニット配置図

ら出入り口へ向かう経路への動線を図示している。またセンサはそれら動線に対

し直角に配置しており、センシング最大距離は約5mであるため、研究室全体のセンシングが可能である。また、動線が比較的単純のため、企業や一般家庭と類似したセンサ配置となっている。本研究では、これらのセンサによって収集されたデータを用いて実験を行っている。

4.4 行動量の平均を用いた住民活動モデルの構築

4.4.1 日常の行動パターン可視化

本研究では、我々が開発した、センサネットワークによるデータを用いて行動パターンの可視化及び異常検知をテストした。本センサネットワークは通常、室内の玄関（センサ e）と行動動線（センサ a と b, 及び c）に設置され、行動ログを24時間クラウドサーバに保存している。我々はまず、居住者の行動を可視化するため、一日を1分毎のスロットに分け、出現回数をカウントすることで行動頻度を可視化している。出現回数のカウント結果は確率として算出され、分単位における出現頻度がセンサごとに計算される。行動量の可視化には、ベイズの定理を応用した以下の計算式を用いている式(4.1) idにはセンサ id, Timeは24時間を1分毎に区切った時間である。これにより、あるセンサの時間(分毎)の出現確率を求めることができる。

$$P(ID | Time) = \frac{P(ID, Time)}{P(Time)} \quad (4.1)$$

出現回数のカウントはセンサごとに行っており、出現回数のカウントを蓄積した日数で除算することにより、1分のスロットごとの出現確率を計算している。出現回数のカウント例を表4.1に示す。

次に、算出された出現頻度を一日の行動頻度のパターンとして出力することで、住民活動モデルを作成する。図4.6に行動頻度を可視化したグラフを示す。

以上により、住人の行動ログを蓄積したデータを用いることで一日の中で住人が最も活動する時間帯、活動量の少ない時間帯を可視化することができる。

表 4.1: 出現頻度の例

時間	1/1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	カウント回数	出現確率
12:00	0	1	0	1	1	0	1	0	4	0.571
12:01	0	1	0	0	1	0	1	0	3	0.428
12:02	1	1	1	1	1	0	1	1	7	1
12:03	1	1	0	1	1	1	1	0	6	0.857
12:04	0	1	0	0	1	0	1	0	3	0.428
12:05	1	1	0	1	0	0	1	0	4	0.571
12:06	1	1	0	0	1	0	1	1	5	0.714

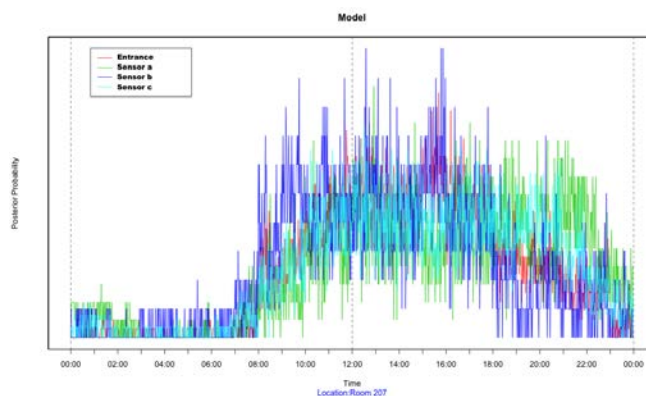


図 4.6: 行動頻度の可視化

4.4.2 時間間隔を取り入れた活動量のモデル化

しかし、人間の行動はパターンは決まっても、行動する時間にはばらつきがある。一般的な行動例を図 4.7 に示す。図 4.7 に代表されるように排泄行動や食事及び就寝など、一定のパターンで行動はしていても各個人の性格や暮らし方により時間にばらつきが生じることが多い。そのため、1分毎の行動をそのまま可視化した場合には行動頻度の高い時間と行動量の低い時間の上下動が大きく、異常状態と正常状態の定義が難しい。

そのため、前後の一定の時間間隔で行動頻度を平均することで異常が定義可能な住民行動モデルを作成する必要がある。具体的な例を図 4.8 に示す。

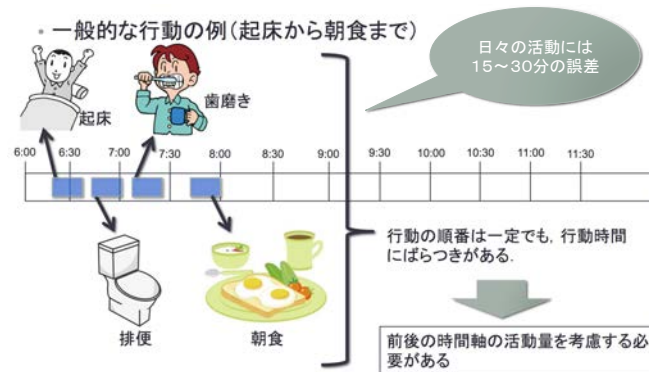


図 4.7: 一般的な人間の行動例

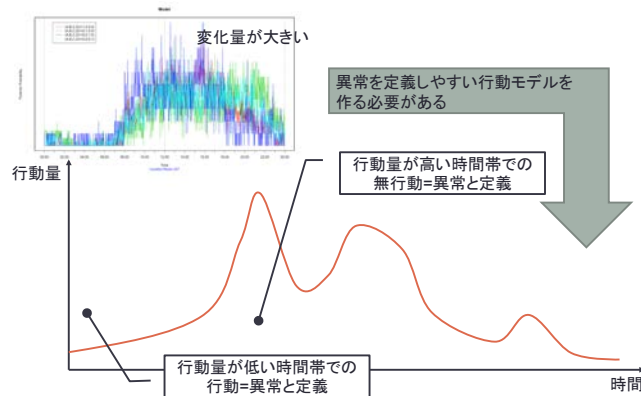


図 4.8: 異常の定義と行動量平均

我々は、前後の行動頻度の平均を用いることで、行動頻度の高い時間と低い時間を可視化することで、異常状態の定義を可能とするモデルを作成した。

4.5 実験結果

4.5.1 時間間隔の変化がモデルに与える影響

本研究では、3章で述べたセンサネットワークのデータを用いて住民行動モデルを作成した。

データ収集期間と件数は以下である。

- 短期データ蓄積期間：2013/7/1 から 2013/7/6
- 中期データ蓄積期間：2013/7/1 から 2013/7/20
- 長期データ蓄積期間：2013/7/1 から 2013/8/30

住民活動モデルの作成には長期（2ヶ月間）と中期（10日間）及び短期（5日間）の蓄積データを用いており、住民行動モデルの蓄積期間と時間間隔の変化がグラフにどのような影響を与えるかを考察した。

更に、前後間隔を変化させることで住民行動における特徴量を消さず、異常を定義可能な可視化を行うために以下の前後時間を用いた住民活動モデルを作成した。

- 前後15分の行動頻度を考慮した場合（短期：図4.9, 中期：図4.10, 長期：図4.11）
- 前後30分の行動頻度を考慮した場合（短期：図4.12, 中期：図4.13, 長期：図4.14）
- 前後60分の行動頻度を考慮した場合（短期：図4.15, 中期：図4.16, 長期：図4.17）

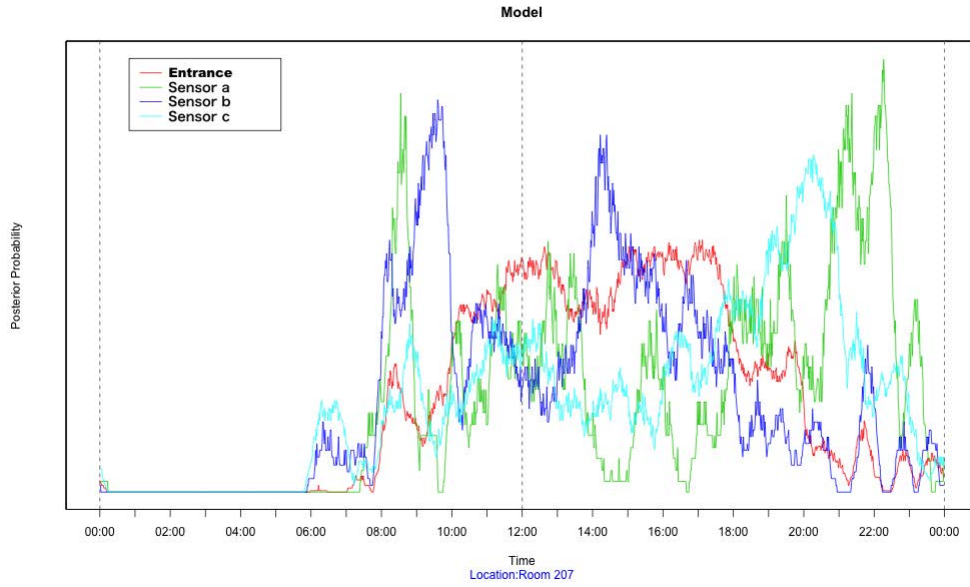


図 4.9: [短期] 前後 15 分の行動頻度を考慮した場合

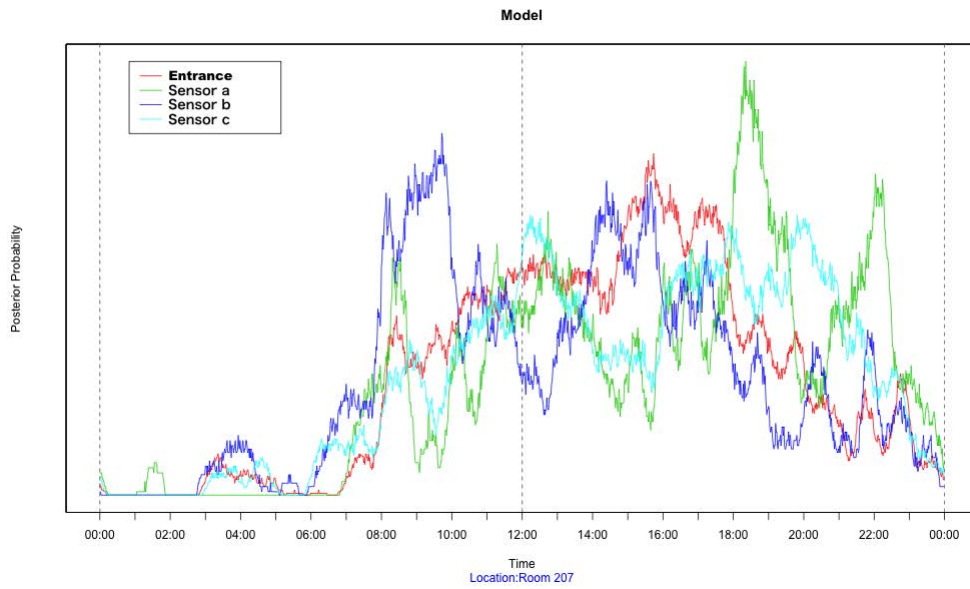


図 4.10: [中期] 前後 15 分の行動頻度を考慮した場合

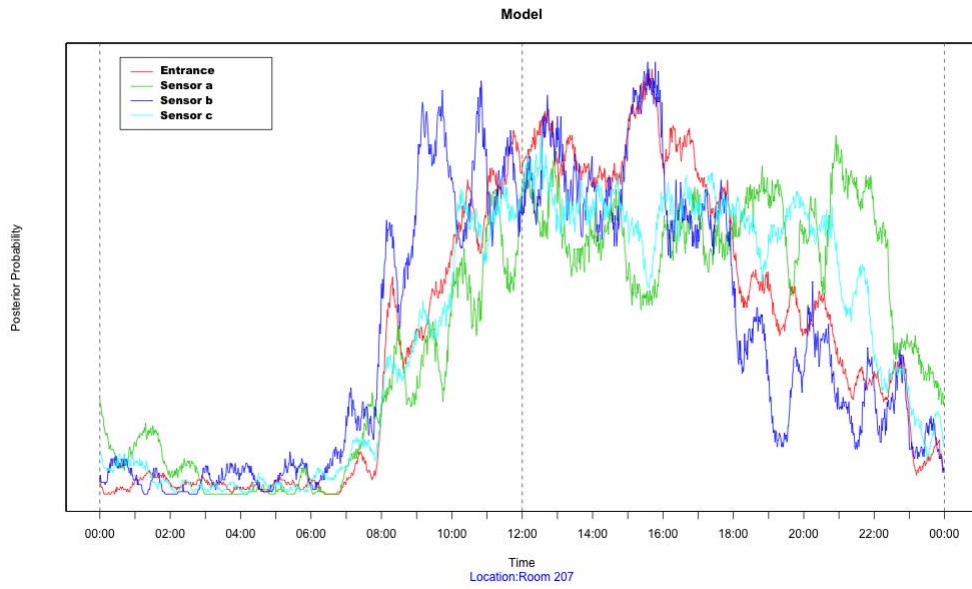


図 4.11: [長期] 前後 15 分の行動頻度を考慮した場合

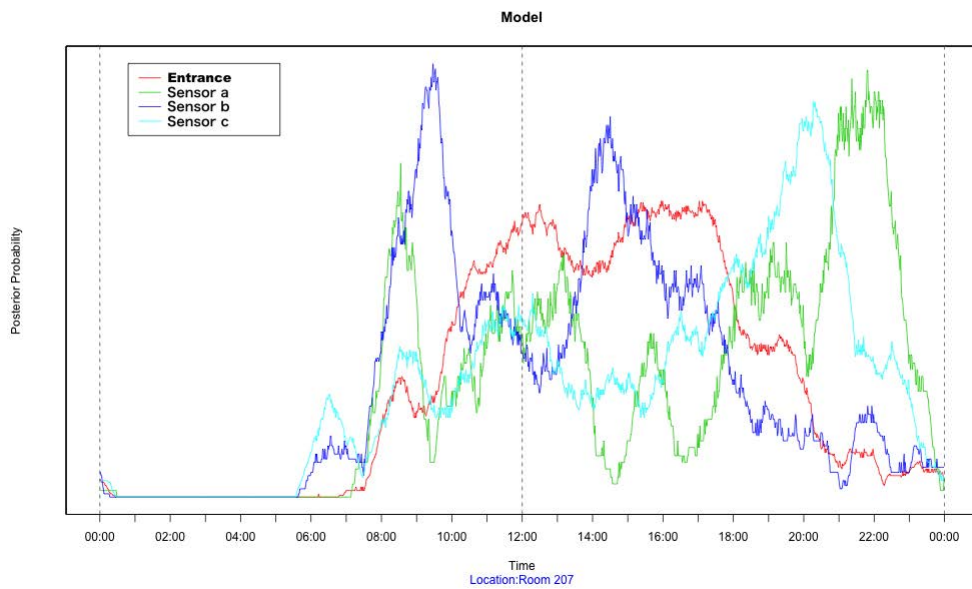


図 4.12: [短期] 前後 30 分の行動頻度を考慮した場合

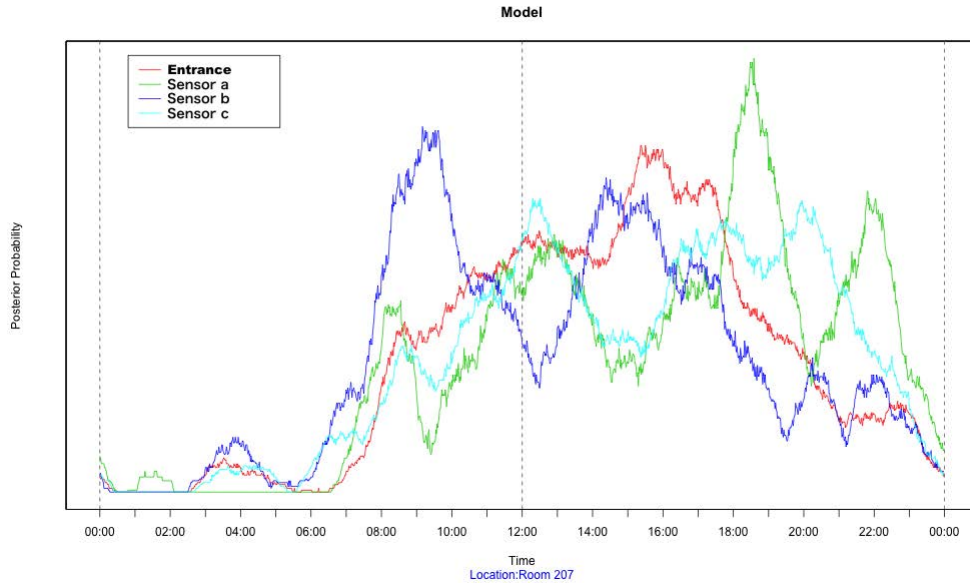


図 4.13: [中期] 前後 30 分の行動頻度を考慮した場合

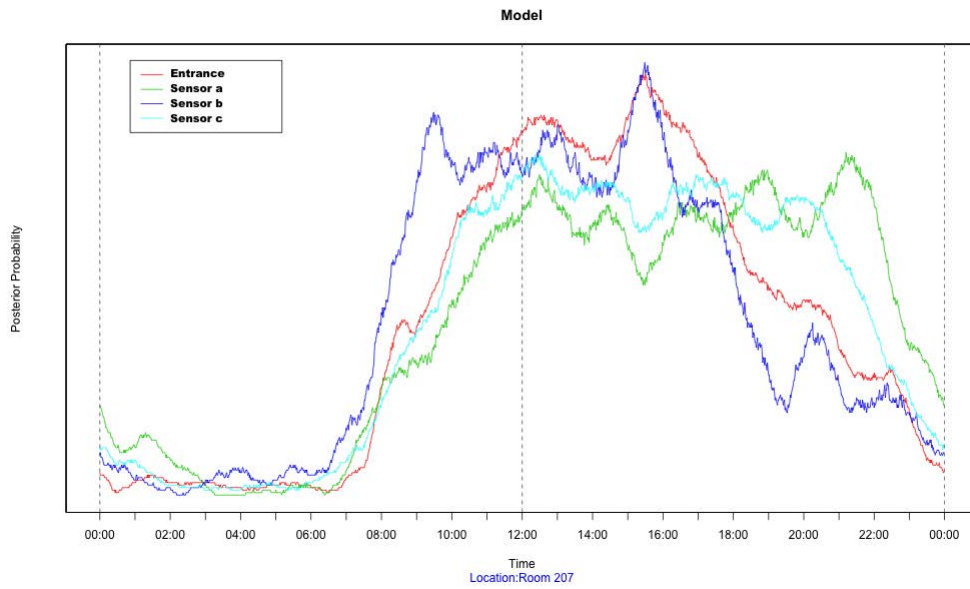


図 4.14: [長期] 前後 30 分の行動頻度を考慮した場合

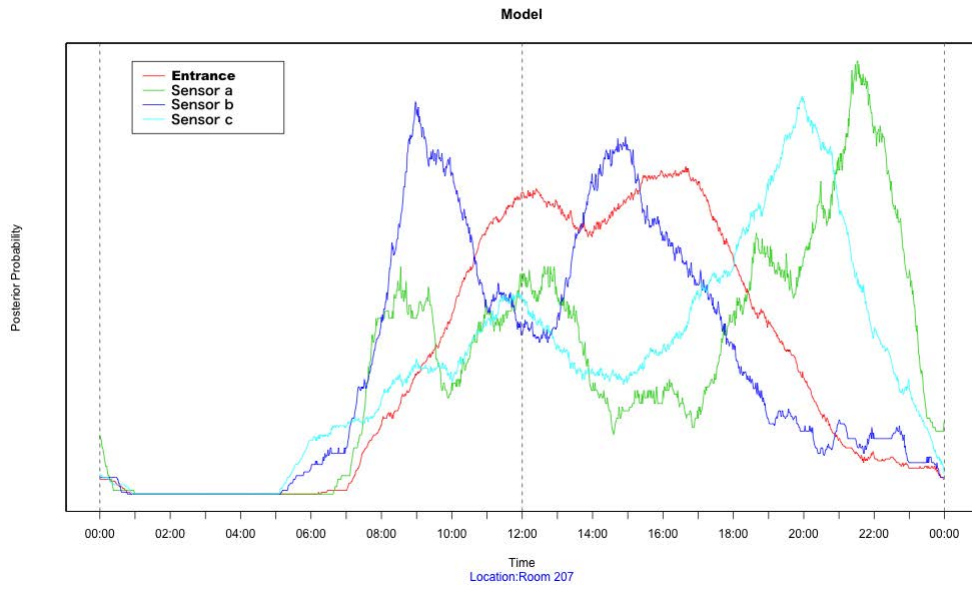


図 4.15: [短期] 前後 60 分の行動頻度を考慮した場合

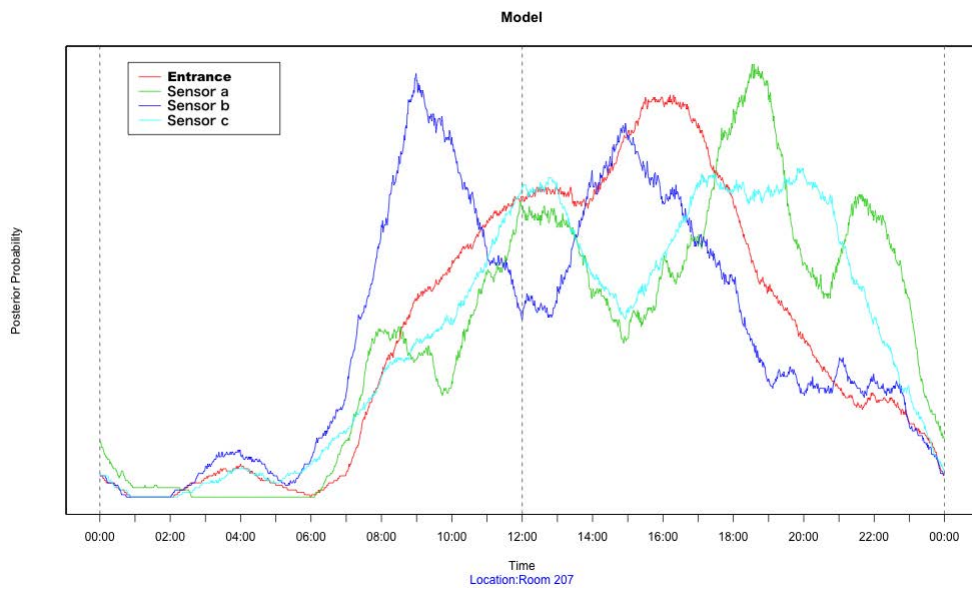


図 4.16: [中期] 前後 60 分の行動頻度を考慮した場合

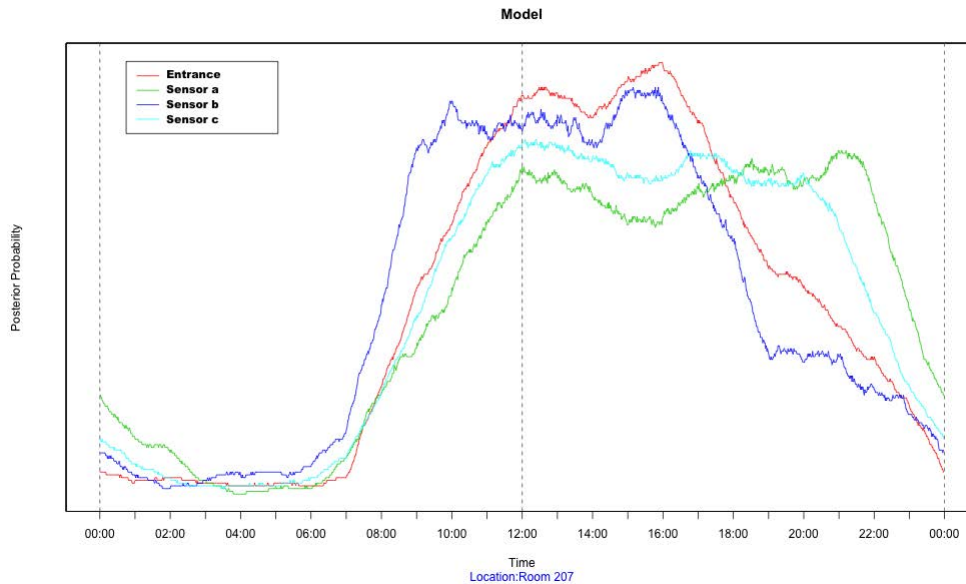


図 4.17: [長期] 前後 60 分の行動頻度を考慮した場合

4.5.2 考察

実験結果により、前後関係の間隔を長くとるに従い、活動頻度の差が大きくなり、日常的に活動している時間帯と活動量の少ない時間帯が明確となる。そのため、異常状態の定義がしやすくなると考える。また、蓄積日数に関しては5日間の短期データと10日間の中期データ、及び2ヶ月間の長期データを比較した。研究室の結果において、短期データでは活動量の蓄積が十分ではなく、特徴量が偏っていることが見て取れる。また、中期データに関しては長期データと類似した特徴量になっているが、まだ完全ではない。蓄積データについては、研究室の環境と一般の居住環境とを同一に論じることはできないため、設置箇所に応じた最適なデータ蓄積期間を選択する必要がある。

しかし、センサごとの特徴量も平均化されてしまうため、本来は行動頻度が低い時間帯にもかかわらず、行動頻度が比較的高く表示されたりといった不都合が

生じる。例を挙げてみると、前後15分の行動頻度を考慮した結果(図4.11)を見た場合、午前9時付近に一旦行動量が少なくなる時間帯が観測されるが、前後30分の行動頻度を考慮した結果(図4.14)では午前9時付近の特徴量データが平均して上がっていることがわかる。また、前後60分の行動頻度を考慮した結果(図4.17)では、特徴量の変化が少なくなることもわかる。本結果より、研究室内の住民活動の場合前後15分~30分程度の間隔を用いることが最適ということがわかった。

4.6 結言

実験結果により、異常定義が可能な住民活動モデルの構築を行った。異常検知に関する多くの研究の特徴として、異常状態と正常状態の定義がしやすいことが挙げられる。一方、我々は日常生活の中での異常は通常的生活パターンの中での異常を検知することを目標としている。そのため、通常的生活の中における境界が決定しづらい状況の中で異常と正常の境界を設定する必要がある。

人間の行動は人によって異なり、一定ではない。我々は日常の行動の中での異常境界を判断するために、日常の行動パターンを可視化し、時間ごとの行動頻度をモデル化するシステムを提案した。提案手法を用いることで、個々人の異なる生活パターンへの対応が可能になるとともに、モデルデータを常に更新し続けることで季節や曜日ごとに異なる行動パターンへの対応も可能となる。よって、個人の生活パターンを自動的に学習し、個々人に適した異常検知を行うことが可能とする、サービス指向WSNの異常検知アプリケーションとして適している。また、設置開始直後といった、データが蓄積されていない場合においても10日間程度の学習を行うことでモデル化が可能となるため、比較的早期に異常の検知が可能となる。そのため、従来は困難であった日常の中での異常が定義可能であることを示した。日常の中で異常を定義することにより、高齢者のみまもりや、侵入者の検知をはじめとした、多くの分野に適用できる。今後は、住民活動モデルによる異常検知システムの実装、住民活動ごとへの最適な時間間隔の設定を行うことで日常の中での異常を通知するシステムとして実装をすすめていく。

また、3章にて論じたノイズ除去手法と組み合わせることで、異常検知の精度を向上させるとともに、安価なセンサを大量に設置した上でデータ処理を行うことにより、WSNの特徴である、点ではなく面でデータを取得する用途に適したアプリケーションの構築を目指している。

第5章 局所的な異常気象検知

5.1 序言

近年，局地的な豪雨や竜巻といった，従来の気象システムでは予測が困難な異常気象が多く発生している．これらの異常気象は幅 100m から 200m の狭い範囲で発生することが多く，事前に予測するためには現在の広域気象観測システムに加え，局所的な気象情報を基にした気象予測システムが必要である．しかし，従来の気象観測システムは一般的に高価であり，設置箇所の増加にも限界がある．そのため，我々は局所的な温度と気圧を安価に取得するためのシステムを試作した．本研究では，我々が試作した局所的な環境情報を取得する観測ノードの使用を前提として，時系列での気圧値の異常を検知することにより，局地的な異常気象を事前に予測及び通報することを目的としたアルゴリズムを提案する．本章の構成を示す，まず，5.2 節で本研究と関連する先行研究を紹介し，本研究の位置づけを示す．そして，5.3 節で実装した観測システムについて述べる．その後，5.4 節において提案するアルゴリズムについて述べ，5.5 節において実験結果を示す．そして最後に，5.6 節で本章のまとめと今後の課題を示す．

5.2 局地的異常気象検知の課題

5.2.1 気象予測システム

現在，我々の生活に気象予測は深く浸透している．我が国での気象予報は，全国各地に設置された気象ポスト，衛星画像，及びレーダ等により取得された情報を基に，計算機シミュレーションにより気象確率を算出している．近年では，降水

の有無に関しては85%程度の確率で正答しており、世界的に見ても信頼性の高い予報システムといえる。近年では、各地に設置されたレーダーサイトや、気象衛星による環境情報の計測が主流となっており、ミリ波レーダーを用いた霧の観測 [59] や、ドップラーレーダーを用いた竜巻の観測 [60] がある。また、最新の動向として、電波ではなく、レーザー光を発射して大気中の塵や微粒子からの反射光を受信することで風速を観測する、ドップラーライダーを用いた観測も始まっている [61]。更に、気象予測を目的としたシミュレーション研究も広く行われており、雲解像モデルを用いた積乱雲のシミュレーション研究 [62] や都市や州単位での領域に分割してシミュレーションを行う領域気象モデルに関する研究 [63] などがある。しかし、気象予測の最小単位は市区町村単位であり、局地的に発生する異常気象は100mから200mの範囲で発生することが多く、予測が困難である。さらに、従来よりの気象予測ポストは、降雨量と風速、および温湿度を計測するアメダスは、日本国内において概ね20km間隔（1300箇所）設置されてはいるが、気圧に関しては、通常では広い範囲でゆるやかに推移することが多いため、各都道府県において、多くても2箇所程度でのみ観測が行われている。しかし、近年ではこれらのシステムでは予測が困難な局地的な豪雨や、局地的な気圧変化による竜巻などが多く発生している。特に、竜巻に関しては過去10年間で100個以上が観測されており [75]、予測に関する研究も行われている [76]。竜巻や局地的な豪雨を発生させる原因としてスーパーセルと呼ばれる特殊な積乱雲 [64] や、局地前線にともなって発生する積乱雲 [66][65] が挙げられ、発生原因の解明が望まれている。しかし、竜巻を代表とする局地的な異常気象の発生は幅100mから200mの狭い範囲で発生することが多く [77]、都市単位での気象予測システムでは予測に必要な観測データが十分ではない。これら異常気象の予測精度向上のためには、高密度な気圧や温湿度データが必要であるが、気象ポストに代表される観測機器は一般的に高価であるため、観測地点の密度を増加させるにも限界がある。特に、局地的な異常気象の代表例としての竜巻は、米国において広く研究されているが、竜巻直下の気圧変化を取得した例は1~2例と少ない [67]。さらに、竜巻は”いつ”、”どこで”発生するかが予想しづらく、そのため、竜巻のメカニズムを解明するという意味でも

直下の気圧変化を取得することが望まれている [70][71]. 代表的な竜巻観測網として、全米に設置されたドップラレーダー網 [68] を用いて竜巻予測を行っているが、的中率は5~10%程度であり、高くない [69]. そのため、常日頃からグリッド状に設置し、細かな間隔で気圧を測定することで竜巻直下及び近傍の気圧変化を測定することで、竜巻や局地的な異常気象のメカニズムを解明する必要がある. そのため、我々はまず、局地的な環境情報を取得した上で異常気象の検知を行うことを目的として、大量に設置が可能な安価で設置の手間が少ない環境情報取得装置を試作し、グリッド上に設置した際に局地的な異常気象を検知するアルゴリズムについて提案する.

5.2.2 局地的な環境情報の取得装置

個人で運用可能な環境情報取得装置は研究用途や家庭用として広く販売されている. 農業用のワイヤレスセンサシステムである MEMSIC 社の Eko システム [102] を用いた研究 [58] も行われているが、ユニット単価が10万円程度と高く、大量に設置するには敷居が高い. 更に、民生用の製品として、米デイベス社の Vantage シリーズ [72] などがあり、通信装置別途で6万円と、比較的低価格であるが専用のアプリケーションでのみ動作可能なため、大規模なデータ収集には向いていない. 更に、竜巻直下の環境情報の変動を収集するために作られた装置もある [71]. しかし、どの製品や研究においても大規模にグリッド上に設置し、細かな間隔で環境情報を取得するためには価格が高く、またシステムも大規模なノード数を想定しているものではない. そのため、我々は、安価なコストで精度よく環境情報を測定可能なシステムを開発し、局地的に発生する異常気象の予測に用いることを目的としている.

5.3 環境情報収集システムの試作

5.3.1 気圧情報取得システム

本研究では、環境情報を取得する観測ノード。取得した環境情報を格納し、異常時にユーザへ通報を行うサーバアプリケーションについて実装した。観測ノードはセンサにより気圧と温度を測定し、3G回線によりセンシングデータをサーバへ送信する。観測ノードの構成と価格を以下に示す。

- 気圧、温度センサ：LP331AP 1.2 千円
- 音湿度センサ：SHT-25 2 千円
- Zigbee モジュール：TOCOS TWE-Strong 3 千円
- 3.7 V 2000 mAh リチウムポリマー 電池 1 千円
- 充放電回路：Li-Po rider 1 千円
- 充電装置：Li-Po ライダ 1 千円
- 3W 80mm*100mm 太陽電池 1 千円

観測ノードは搭載された太陽光発電装置と蓄電池により、外部電源を必要とせず環境情報を測定することができる。また、屋外での使用を想定し、防水加工された筐体の実装した。観測ノードの外観と設置風景を図 5.1 に示す。

観測ノードは市販品で構成されており、既存研究と比較しても安価である。また、3G 通信を Zigbee 等の無線通信で共有することにより、大量に設置が可能である。そのため、既存製品や他研究と比較しても大規模な観測が安価に実現可能である。さらに、太陽光発電装置と蓄電池を内蔵しており、屋外に設置することで永続的な動作を可能としている。



図 5.1: 試作した気圧観測ノードと設置図

5.3.2 サーバアプリケーションの実装

サーバアプリケーションは主として3つの機能を備えており、センサデータを時系列で表示するグラフ機能とセンサ名称等を管理できるユーザインターフェース(UI)、観測データを格納し、CSV形式での出力を行うデータベース部、しきい値の設定としきい値を超えた際にユーザへ e-mail 及び SMS へ通報する警報モジュール部に大別される。サーバアプリケーションの概要を図 5.2 に示す。サーバアプリケーションは web での使用を前提としており、ユーザーは警報時の通報先 e-mail アドレス、SMS 送信先携帯電話番号の登録及び変更やセンサ情報の閲覧を行うことができる。また、個別のセンサをグループとして登録することで、グループ内

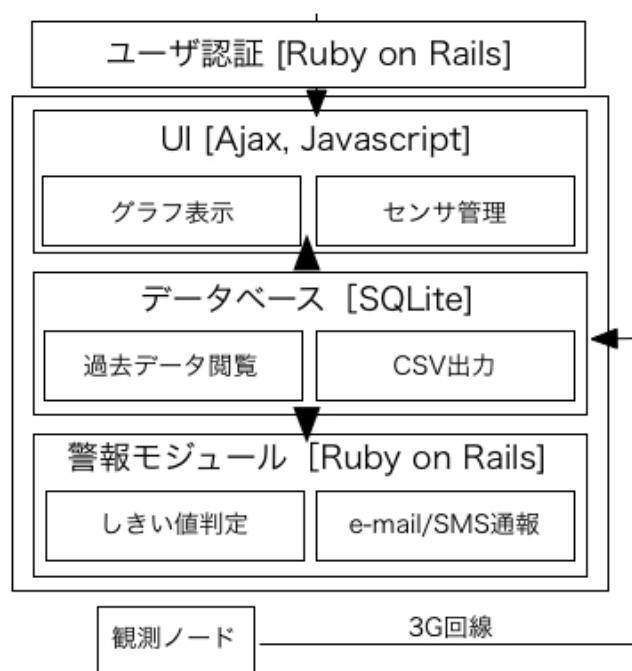


図5.2: サーバアプリケーションの概要

の他のセンサ情報との比較や、各センサ毎のしきい値の設定を行うことを可能としている。現在では、一定のしきい値による通報機能のみ実装されているが、本研究で提案する異常気象検知アルゴリズムを実装することにより、異常気象発生時の迅速な通報を行うことを目標としている。

5.3.3 システムの精度評価実験

次に、本システムの精度検証を行うため、気象庁の提供する気圧データとの比較を行った。気象庁の提供するデータは、当日であれば1時間毎、当日以降であれば10分毎の気圧情報が閲覧可能である。気象庁のwebページでは、観測地点ごとのデータが自由に閲覧可能である。気象庁の提供する実際の気圧データの例を図5.3に示す。

精度評価実験には2014/1/14 17:00~2014/1/15 5:00 愛知県名古屋市昭和区に

国土交通省
気象庁
Japan Meteorological Agency

ホーム | 防災情報 | **各種データ・資料** | 知識・解説 | 気象庁について | 案内・申請

ホーム > 各種データ・資料 > 過去の気象データ検索 > 10分ごとの値

10分ごとの値

一覧表 | グラフ | 見出しの固定 | メニューに戻る

前年 | 前月 | 前日 | 翌日 | 翌月 | 翌年

日ごとの値 | 1時間ごとの値 | **10分ごとの値**

つくば(観野) 2009年4月11日 (10分ごとの値)

時分	気圧(hPa)		降水量(mm)	気温(°C)	相対湿度(%)	風向・風速(m/s)				日照時間(分)
	現地	海面				平均	風向	最大瞬間	風向	
00:10	1016.2	1020.0	-	11.7	88	1.6	南南東	2.7	南南東	
00:20	1016.3	1020.1	-	11.4	90	1.0	南南東	1.7	南南東	
00:30	1016.1	1019.9	-	11.7	90	1.4	南南東	1.9	南南東	
00:40	1016.1	1019.9	-	11.2	91	1.7	南南東	2.3	南南東	
00:50	1016.0	1019.8	-	11.0	92	2.0	南南東	2.3	南南東	
01:00	1015.8	1019.6	-	11.1	92	1.8	南南東	2.6	南南東	
01:10	1015.7	1019.5	-	11.3	93	1.4	南南東	2.2	南南東	
01:20	1015.8	1019.6	-	11.0	93	1.2	南南東	1.8	南南東	
01:30	1015.7	1019.5	-	10.9	93	1.2	東南東	1.5	東南東	
01:40	1015.5	1019.3	-	10.3	93	0.8	東	1.2	東南東	
01:50	1015.4	1019.2	-	10.3	94	0.6	東	1.0	東南東	
02:00	1015.3	1019.1	-	10.3	94	1.1	東南東	1.6	南東	
02:10	1015.2	1019.0	-	10.0	95	1.3	南東	1.6	南東	
02:20	1015.3	1019.1	-	9.9	95	1.0	南東	1.3	南東	
02:30	1015.4	1019.2	-	9.7	95	1.2	南東	1.5	南南東	
02:40	1015.4	1019.2	-	9.6	95	1.1	南東	1.4	南南東	
02:50	1015.5	1019.3	-	9.6	95	1.3	南東	1.5	南東	
03:00	1015.7	1019.5	-	9.3	95	1.2	南東	1.4	南東	
03:10	1015.8	1019.6	-	9.4	95	1.3	東北東	1.8	北北東	
03:20	1015.8	1019.6	-	9.0	95	1.6	北北東	2.1	北東	
03:30	1015.8	1019.6	-	9.3	95	2.1	北東	2.5	北東	
03:40	1015.9	1019.7	-	8.9	95	1.6	東北東	2.3	北東	
03:50	1016.0	1019.8	-	9.0	95	1.5	北東	2.3	北東	
04:00	1016.0	1019.8	-	8.8	95	1.3	東北東	2.0	北東	

図 5.3: 気象庁の提供する気圧データの例

において、本システムの測定データと気象庁の提供する気圧データを比較した。精度評価の結果を図 5.4 に示す。精度評価の結果では、気象庁提供データと比較して、概ね 3hpa 高い数値が観測されているが、計測地点付近の気象庁の提供する測定機器の設置場所の標高が、計測地点よりおよそ 25m 程度高い場所に位置するため、気象庁設置の機器と同等の測定精度であることが確認できた。本研究では、我々の試作した観測ノードの使用を前提として、竜巻を想定した異常気象検知アルゴリズムについて提案する。

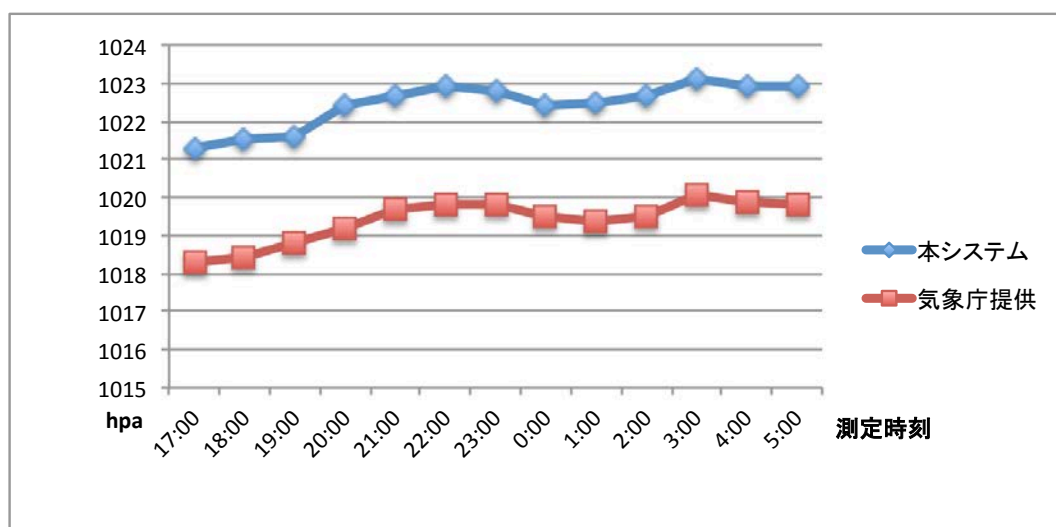


図 5.4: 気象庁提供データと実測値の比較

5.4 異常気象検知アルゴリズムの提案

5.4.1 異常気象時の気圧変動

本研究で提案するアルゴリズムは、異常気象の際の気圧変化に焦点を当て、異常気象の際に起こる気圧変化を早期に検知し、通報することを目的としている。我々はまず、気圧変化の代表的な例として竜巻を選定するとともに台風と前線通過時の気圧変化のデータと比較した。

- 茨城県における台風接近時のデータ (図 5.5)
2013 年 10 月 15 日 17 時 00 分頃発生
気象データ観測地：高層気象台, 茨城県つくば市長峰
- 茨城県における前線通過時のデータ (図 5.6)
2013 年 3 月 31 日～2013 年 4 月 2 日 発生
気象データ観測地：高層気象台, 茨城県つくば市長峰
- 茨城県常総市における竜巻発生時のデータ (図 5.7)

2012年5月6日17時00分頃発生

気象データ観測地：高層気象台，茨城県つくば市長峰

これらの気圧データは、気象庁の提供する観測値 [78] を基に作成しており、竜巻発生地点の近傍観測点のデータである。気象庁の提供するデータは、当日のリアルタイムデータは60分毎に更新され、翌日5時以降には10分毎のデータを閲覧することができる。竜巻発生地点直下のデータではないが、各データとも竜巻の発生以前から気圧の下降が発生し、竜巻発生時には急激な気圧下降が生じていることが見て取れる。いずれの気象データについても、気圧観測地点から竜巻発生地点までは5km～15km離れているため、竜巻直下のデータでは更に激しい気圧降下が起きているものとする。また、竜巻は移動するものであり茨城県で発生した竜巻 [79] では被害長さが35kmに達するものもあり、竜巻の詳細な気圧データを取得するためには観測地点数を増加するとともに、グリッド状に配置することで竜巻の移動による詳細な気圧変化が取得可能になると推察される。更に、台風接近時と前線の通過時の気圧変化はゆるやかに気圧が降下しているが、竜巻発生時には激しく乱高下した後、再接近時には気圧が急降下していることがわかる。我々はこれら気圧データをスコアリングすることにより、竜巻を代表とした局地的な異常気象を早期に検知するアルゴリズムについて提案する。

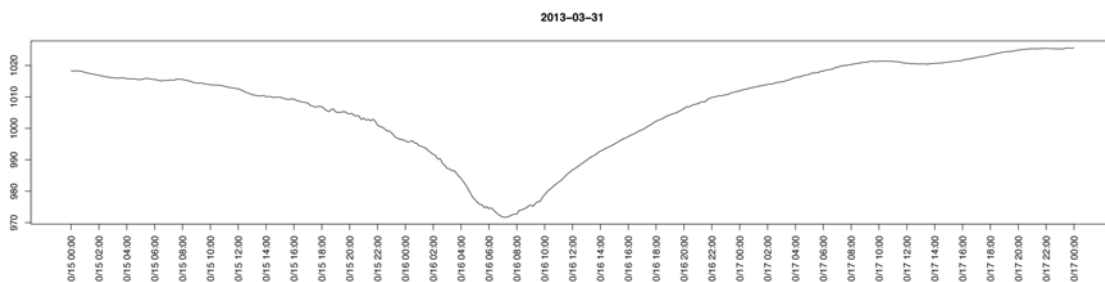


図 5.5: 茨城県における台風接近時の気圧観測データ

これらの実データにより、竜巻発生初期の段階で気圧降下が発生し、竜巻発生・通過時には急激な気圧降下が起こることを確認した。我々は、竜巻による人的被害を最小限に留めることを目的とし、時系列で気圧変動を監視することにより、竜巻

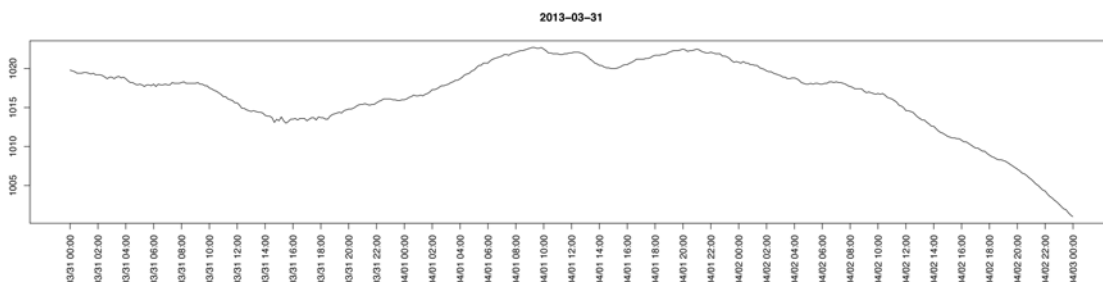


図 5.6: 茨城県における前線通過時の気圧観測データ

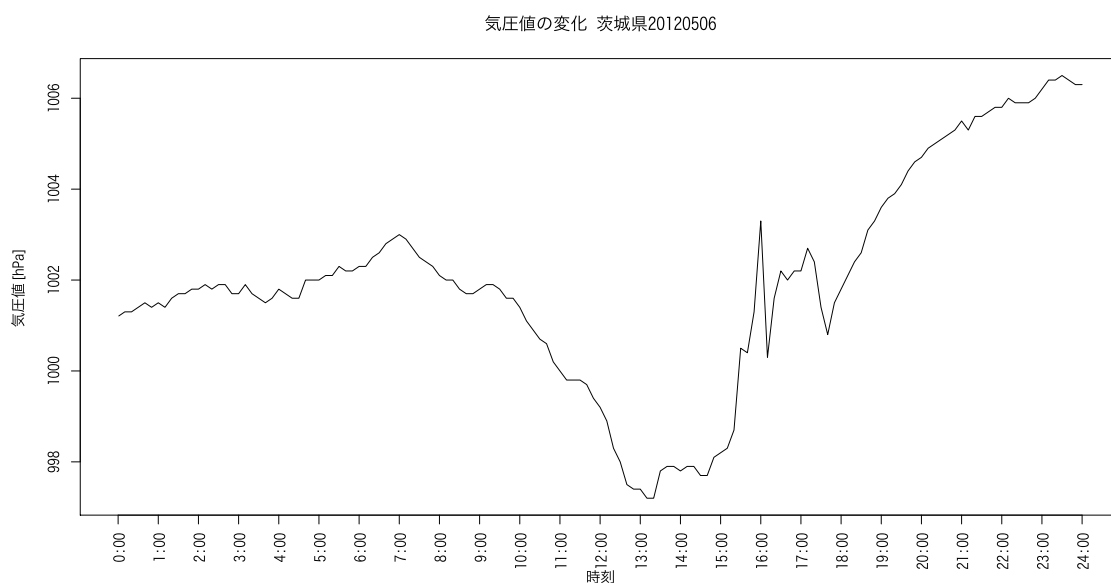


図 5.7: 茨城県における竜巻発生時の気圧観測データ

発生時の初期段階で検知することを目的とした異常検知アルゴリズムを提案する。

5.4.2 時系列データにおける気圧異常検知

5.4.1 項で述べたように竜巻の初期発生時の検知には時系列での気圧変化を観察することが重要であることがわかった。また、竜巻が直近に迫っているか、そうでないかについても避難や屋内待機を判断するためにも重要な情報である。そのため、我々は観測ノードを 1km 間隔の格子状に配置することで、局地的な気圧変化

を観測する。更に、個々の観測ノードで取得した気圧データにより竜巻の移動経路を観測することで、竜巻が遠い場合に安全な場所に避難すべきか、竜巻の近くにいるため屋内に留まるべきかを判断可能なシステムを目指している。また、特定の観測ノードが異常値を検出した場合、気圧センサの異常であることも考えられる。そのため、近隣の観測ノードの気圧値と比較することで、機器の不具合なのか、観測データが正しいのかを判断することができる。観測ノードの配置例を図5.8に示す。

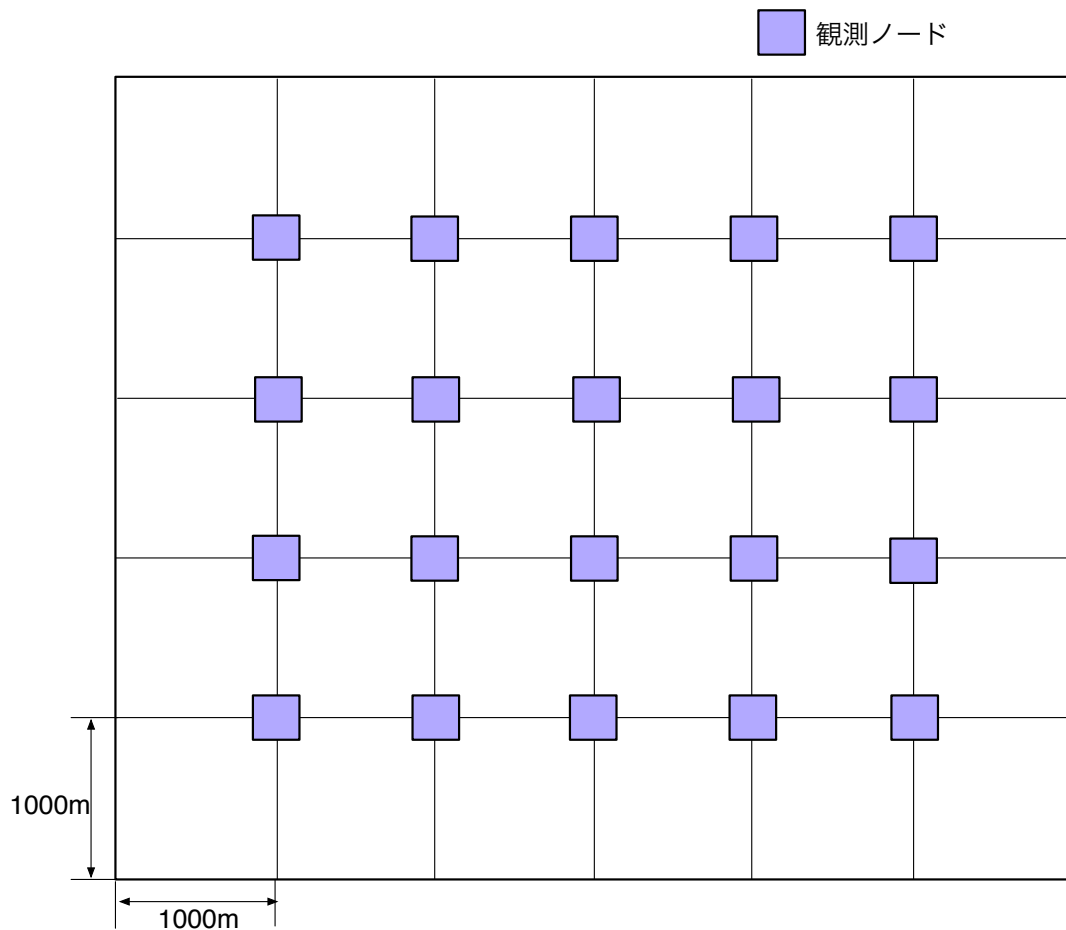


図 5.8: 観測ノードのグリッド状配置

以上により、各観測ノードの気圧値の変動を監視することで竜巻の発生初期状

態の検知と共に、観測ノード個別の気圧変化を取得することで竜巻の移動経路を把握することができ、竜巻が迫っているのか、離れていくのかについても検知できると考える。

5.4.3 時系列における異常な気圧データの検出アルゴリズム

次に、時系列における異常な気圧データの検出アルゴリズムについて述べる。各観測ノードの気圧データは式(5.1)で表される。観測ノードにおける気圧データは X_{node} で表され、取得した時間のデータは時刻 t 、日付 d 、年 y で表される。

$$X_{node}(t, d, y) \quad (5.1)$$

次に、時系列における気圧変動を式(5.2)によりスコアリングする。各観測ノードの時刻ごとのスコアは min で指定する過去のデータの二乗誤差で計算され、時系列における気圧データの変動をスコアとして出力する。本項では $min = 10$ と設定し過去10分間の気圧測定データと比較することでスコアを算出している。本項では、竜巻が多く発生している茨城県の気圧変化の実データをもとに提案手法の有効性を示すとともに、竜巻がグリッド上に配置したセンサノードを通過した際に起こると予想される気圧変化を仮定し、シミュレーションを行った結果についても示す。スコア算出に利用する過去データの違いによる比較実験については5.5節 評価実験において実施する。

$$val_{node}(t, d, y) = \sum_{i=-1}^{min} \{x_{node}(t, d, y) - x_{node}(t - i, d, y)\}^2 \quad (5.2)$$

更に、提案したアルゴリズムによって時系列での異常がスコアリング可能であることを確認する。テスト気圧データは、5.4.1項にて述べた実際の竜巻発生時の気圧を用いて、式(5.2)によりスコアリングする。スコアは、過去5分間に気圧の

変動がない場合は0に近づき、過去10分間の気圧変動が大きくなるほど値が増加する。テストデータのスコアリング結果を茨城県における竜巻発生時のスコアリング結果を図5.11に示し、前線通過時のスコアリング結果を図5.9に示す。また、茨城県における台風接近時のスコアリング結果を図5.10に示す。

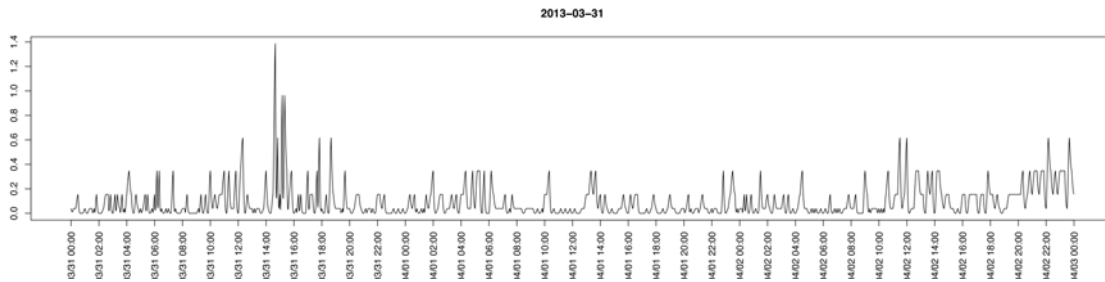


図 5.9: 茨城県における前線通過時のスコアリング結果

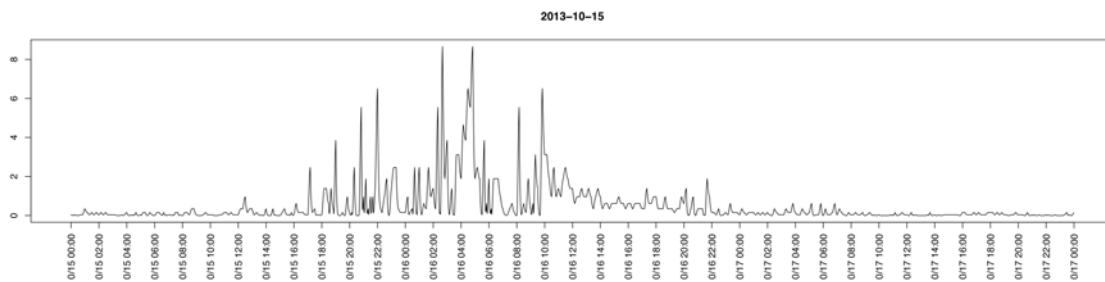


図 5.10: 茨城県における台風接近過時のスコアリング結果

スコアリング結果を観察すると、気圧変化に従ってスコア値が増加しているのがわかる。特に、竜巻の接近時気圧の最低値以前にスコア値の大幅な変化が観測できる。本結果により、時系列での気圧変動が検知可能であることを示すとともに、竜巻発生時には、前線の通過や台風接近時とは異なるスコアリング結果であることを示した。更に、竜巻の初期段階でのスコアも台風接近時と比較して高い数値が出ていることから、竜巻の早期検知が可能なことを示した。

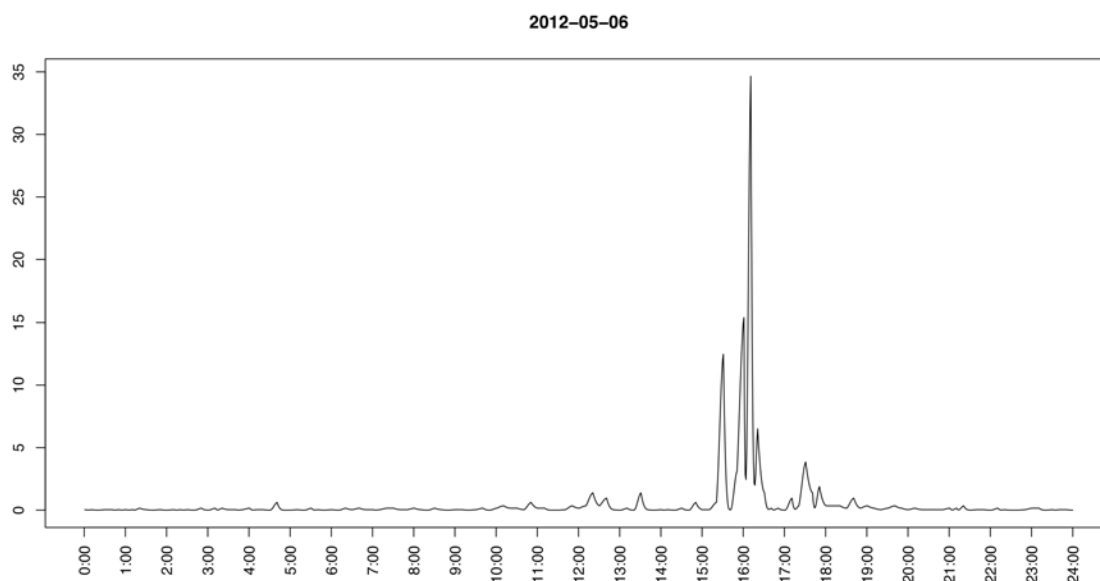


図 5.11: 茨城県における竜巻発生時のスコアリング結果

5.4.4 グリッド配置されたノードと竜巻の検知

本項では評価実験に使用した実験設定について述べる。本実験では、竜巻が発生した際の最近傍ノードの気圧変化に加え、隣接するノードの気圧変化についてもスコアリングを行った。竜巻の最近傍に観測ノード A、隣接する 2 つのセンサを観測ノード B 及び観測ノード C と設定した。

各ノードには竜巻発生時の気象データを参考にし、ダミーの気圧データを生成している。各データの特徴を以下に示す。

- ノード A：竜巻直下の気圧データを想定（実際の竜巻データを基に生成）
- ノード B：竜巻近傍の気圧データを想定（ノード A の変化量の半分を 30 分遅れで生成）
- ノード C：竜巻よりやや離れた位置での気圧データを想定

以上のダミーデータを生成し、スコアリングを行うことで、竜巻の初期発生時の検知及び、隣接する観測ノードとの関係を把握できるかを検証する。

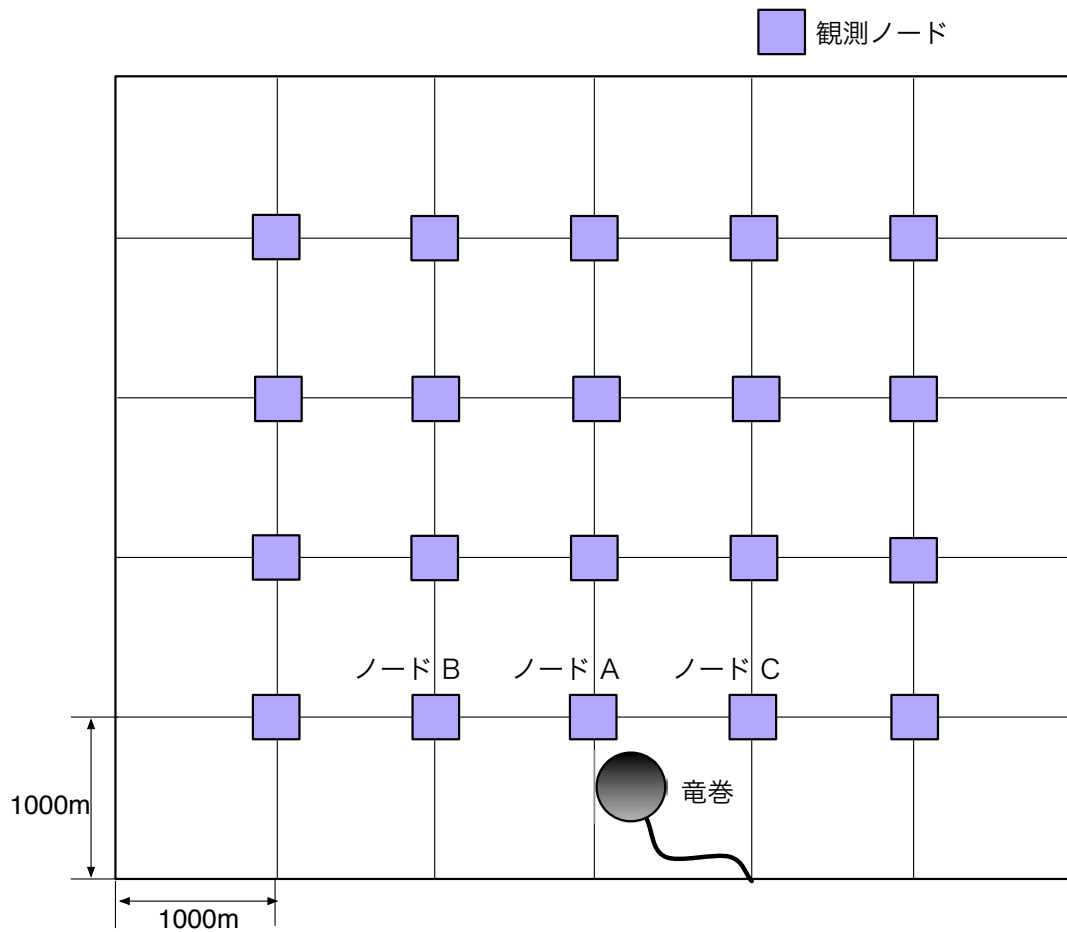


図 5.12: グリッド配置された観測ノードと竜巻の位置関係

5.4.5 グリッド配置されたノードと竜巻の関係

5.5.1 項で設定した実験環境を用いて、各観測ノードのスコアを算出した。図 5.13 に使用した気圧値を示し、図 5.14 にスコア出力結果を示す。

スコア算出結果を見ると 5.4.3 項での検証結果と同様に、竜巻の発生初期段階で異常なスコアが検出されていることから、竜巻の初期段階での異常が検出でき、竜巻が遠い場合に安全な場所に避難すべきか、竜巻の近くにいるため屋内に留まるべきかを判断可能なシステムを目指している。また、特定の観測ノードが異常値

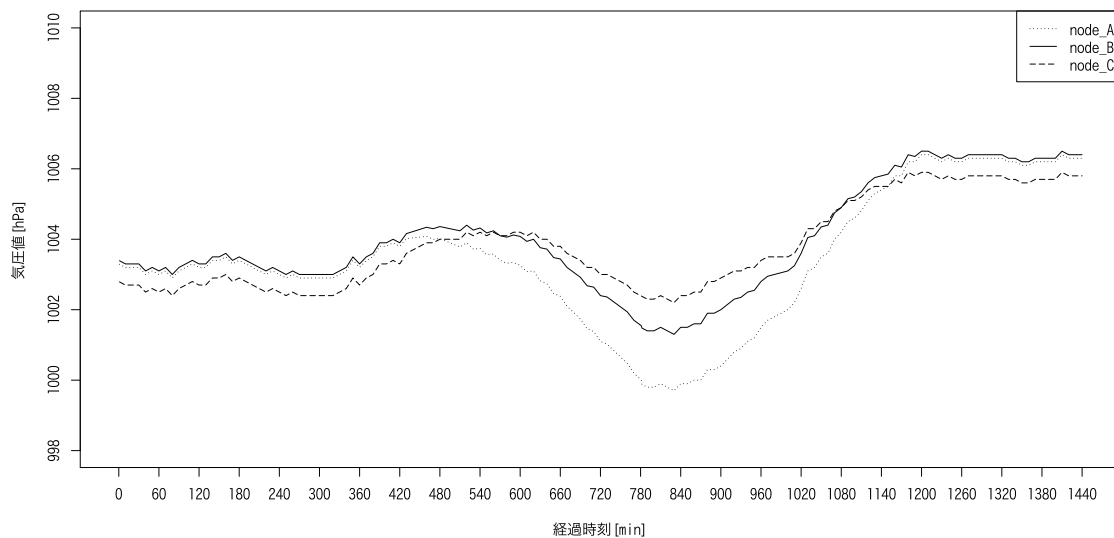


図 5.13: 生成した気圧値の出力結果

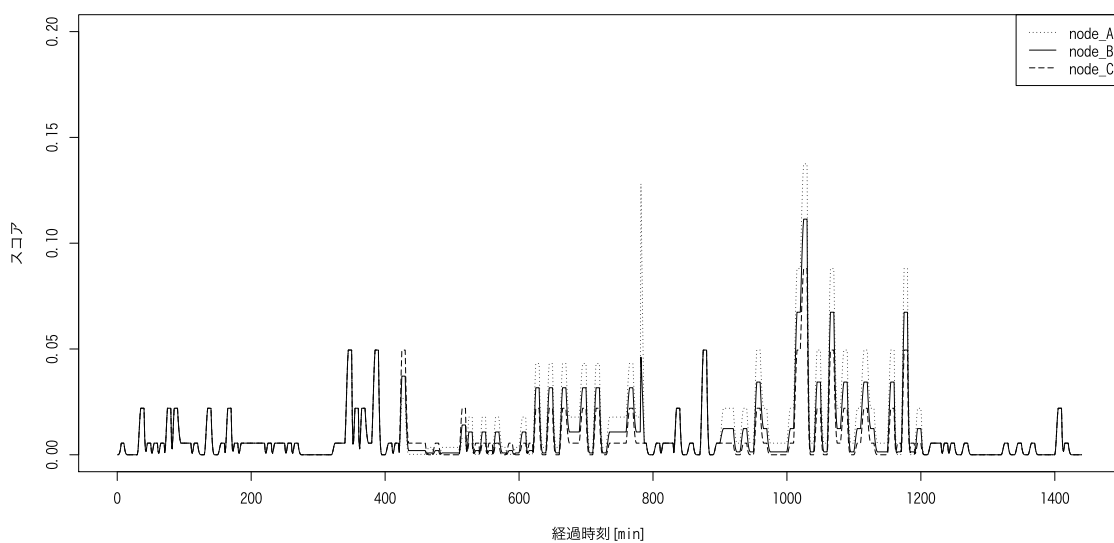


図 5.14: スコア値の出力結果

を検出した場合、気圧センサの異常であることも考えられるが、今回のノード群のように、隣接した観測ノードに同一傾向が見られる場合は観測データは正しく、気圧の異常値が観測されていることがわかる。以上のように、本研究の提案するアルゴリズムを用いて、局地的な異常気象の検知が可能であることを示した。

5.5 評価実験

5.5.1 実験設定

本項では評価実験に使用した実験設定について述べる。5.4節では、竜巻が発生した際のスコアリングにおいて、過去10分間データを用いて竜巻の早期検知が可能なことを示した。本項では、使用する過去データを変更することで、局地的な異常気象発生時の前兆をより早期に発見できないかについて考察する。各ノードには竜巻発生時の気象データを使用し、4.3項にて提案したアルゴリズムを用いてスコアを算出する。また、過去データを用いる際、10分、30分及び、60分前のデータを使用することで比較を行った。

- 気象データ観測地：高層気象台, 茨城県つくば市長峰
茨城県常総市における 2012年5月6日 17時00分頃発生 of 竜巻データ
- 過去10分間のデータを使用：気象庁提供データにおける10分前のデータを使用
- 過去30分間のデータを使用：気象庁提供データにおける30分前のデータを使用
- 過去60分間のデータを使用：気象庁提供データにおける60分前のデータを使用

以上のダミーデータを生成し、スコアリングを行うことで、竜巻の初期発生時の検知及び、隣接する観測ノードとの関係を把握できるかを確認する。

5.5.2 実験結果

5.5.1項で設定した実験環境を用いて、各観測ノードのスコアを算出した。図5.15にスコア出力結果を示す。スコア算出結果は、比較がしやすいよう、正規化を行っている。

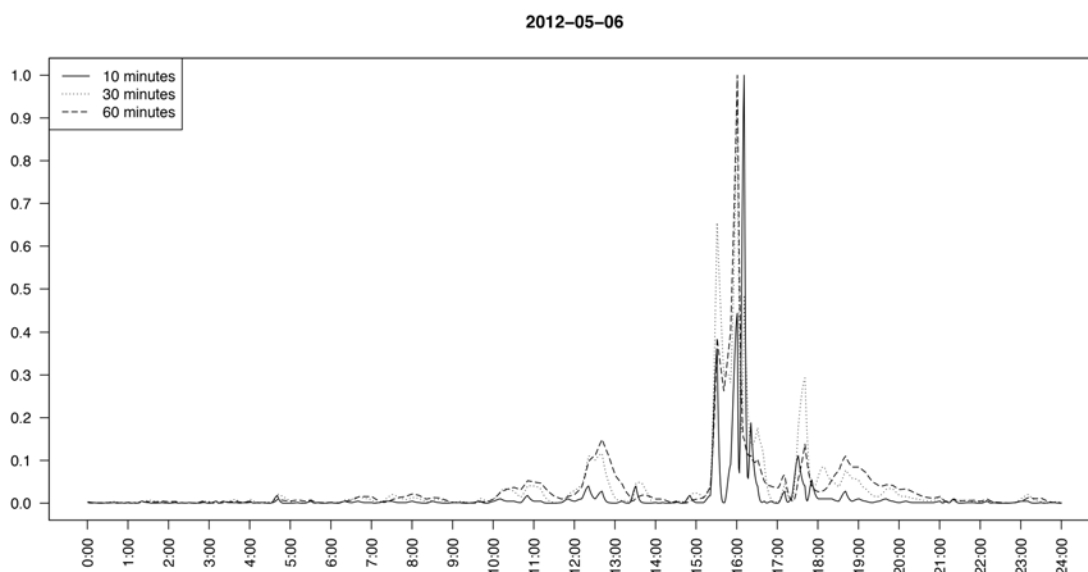


図 5.15: スコア値の出力結果

スコア算出結果を見ると 5.4.3 項での検証結果と同様に，竜巻の発生初期段階で異常なスコアが検出されていることから，竜巻の初期段階での異常が検出でき，竜巻が遠い場合に安全な場所に避難すべきか，竜巻の近くにいるため屋内に留まるべきかを判断可能なシステムを目指している．特に，過去 60 分間のデータを用いた際には，竜巻の初期段階である 12 時付近のスコア変動量が大きくなっていることが見てとれる．以上のように，本研究の提案するアルゴリズムを用いて，局地的な異常気象の検知が可能である．また，複数の観測ノードの値を比較することにより，センサそのものの異常なのか，観測値が異常なのかを判断することも示した．今後は，気象庁の提供する過去データを蓄積し，実測値と比較することで精度の向上を目指す．また，環境情報観測装置についても小型化を進めるとともに，ノードの低価格化についても実装する．

5.6 結言

本研究では、大量に設置が可能な安価で設置の手間が少ない環境情報取得装置を試作し、グリッド上に設置した際に局地的な異常気象を検知するアルゴリズムについて提案した。研究の背景として、局地的な豪雨や竜巻といった、従来の気象システムでは予測が困難な異常気象が多く発生していることが挙げられる。これらの異常気象は幅 100m から 200m の狭い範囲で発生することが多く、事前に予測するためには現在の広域気象観測システムに加え、局所的な気象情報を基にした気象予測システムが必要である。しかし、従来の気象観測システムは一般的に高価であり、設置箇所の増加にも限界がある。そのため、我々は局所的な温度と気圧を安価に取得するためのシステムを試作し、実フィールドに設置することで、実データを収集した。また、気象庁の提供する実際の竜巻発生時の気圧変化を用いて観測地点の急激な気圧変化を判断できることを示した。更に、竜巻被害の軽減のために重要な要素である、竜巻の初期発生時に異常を検知できることを示した。よって、竜巻が遠い場合に安全な場所に避難すべきか、竜巻の近くにいるため屋内に留まるべきかを判断可能であり、人的被害の軽減にも役立つと考える。

今後は、温湿度や風速センサ、及び気象庁の過去データの蓄積などのデータを総合し判断することで精度の良い異常検知及び予測システムを実装していく。さらに、観測地点を増やすとともに長期実験を行うことで異常検知の手法を研究していく。

また、近年ではスマートフォン等に気圧センサが内蔵されているため、個々人の持つスマートフォンをセンサノードとしてデータ収集することで、より大規模な異常検知が可能となる。本アルゴリズムは比較的単純なため、計算コストも少なくスマートフォン上での動作も可能である。そのため、本章で提案したグリッド配置されたセンサノードに加え、スマートフォン等の移動するセンサノードを加える事でより高速かつ正確に異常気象を判断する手法を継続して研究していく。

第6章 屋外 WSN における 通信信頼性確保

6.1 序言

屋外において使用される WSN の多くは地上に設置され、通信距離の延長が大きな課題となっている。

地上におけるセンサノード間の通信品質は環境要因により変化するため、任意の計測箇所に設置する移動式 WSN においては、通信品質を考慮した設置場所選定が困難である。本研究では、地上障害物の影響を避け、設置場所の制約を削減するため、高所に設置された指向性アンテナによる通信距離延長を提案する。

ワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) は、近年、IoT (Internet of Things), M2M (Machine to Machine) の中核を成す技術として、広く研究が行われている [88]。しかし、後述する多くの研究では、閉じた環境下における通信品質の最適化を主眼としており、環境要因によって電波状況が変化する移動式の WSN の電波品質を確保する研究は行われていない。ワイヤレスセンサネットワークは、多数の子機 (センシングノード) からの情報を集約するシンクノード (Sink mode) と、マルチホップでの情報の中継が可能なルータノード (Router node) から構成され、環境情報の観測や、スマートホーム等の分野で広く利用されはじめている。研究分野では、1998 年に UC バークレー校で開発された MOTE [81] が有名ではあるが、近年 IEEE 802.15.4 として規格化されている、Zigbee ネットワークを用いた WSN の研究が盛んである。しかし、日本国内において販売されている免許、工事認証ともに不要な通信モジュールは、諸外国と比較して出力が大幅に制限されており、通信距離の制約が大きい。

特に、移動式 WSN では、移動による周囲の環境要因によって通信距離が大きく左右される。そのため、固定式 WSN とは異なり、移動により変化する周辺の電波状況や建築物、樹木などの影響を定量化し、計測ノード移動による電波品質を考慮したな設置パターンを決定する必要がある。我々は、先行研究として無線通信の信頼性に焦点を当て、実フィールドにて、種々の環境要因ごとに、通信モジュール同士の電波品質を測定するパケットエラー率を測定することで、移動式のセンサネットワークに最適な設置パターンの提案を行い、設置場所の選定時間の短縮手法について提案している [80]。

しかし、地上に設置されたセンサノード間の通信品質は、自動車の通行をはじめとする周辺状況によって大きく変化することが先行研究により判明している [80]。そのため、センシング対象が地上にあり、周辺状況によって通信品質が確保できない場合は、中継局を用いて、通信品質を保つ必要がある。特に、データを集約してサーバーへ送信するシンクノードについては通信切断がなきよう、確実に通信可能とする必要が有る。しかし、地上に設置されたセンサノード間では、通信経路における重機の進入による通信切断などの障害が発生することが想定される、本研究の目的は、高所に設置されたアンテナを利用することにより、浸水地域から離れた場所からでも、障害物の影響を回避することができる。そのため、地上に設置された計測ノードとシンクノードの間の信頼性が担保され、災害時に信頼性の高いデータ収集が可能になると考える。さらに、地上局との広域遠距離通信を可能とすることにより、地上における計測・中継ノードの設置位置の制約が減少し、現地作業者の負担を軽減することができる。

高所に設置されたアンテナを利用した移動式 WSN の利点について、実フィールドを想定した設置例を図 6.1 に示す。

本研究では、実フィールドにおいて測定した電波品質試験結果を基に、高所指向性アンテナを用いることで、地上における障害物の影響を避けることができ、設置場所の条件も緩和される。そのため、移動式 WSN の課題である、動的に変化する周辺環境への対応が可能であると考えられる。

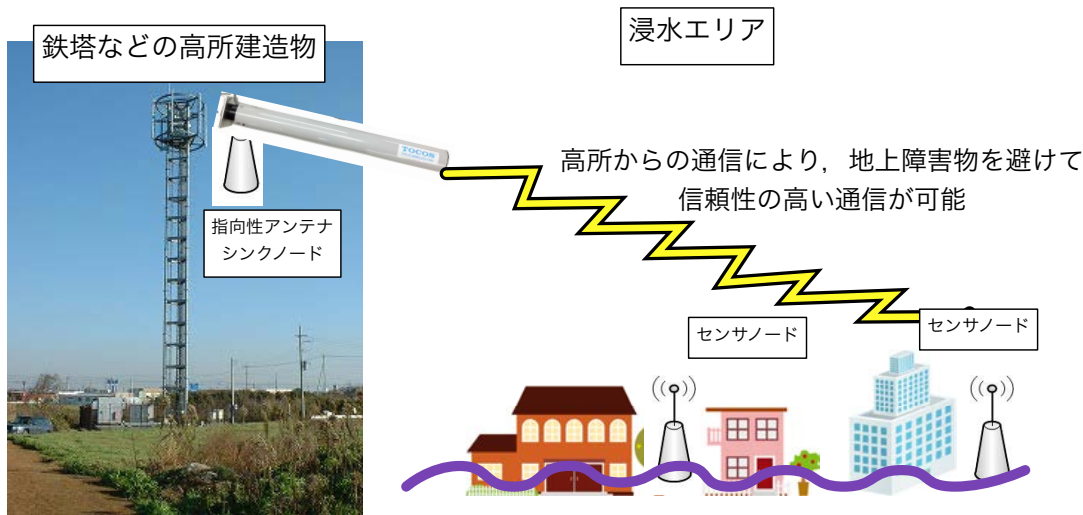


図 6.1: 高所アンテナを利用した通信距離延長例

先行研究では、実験フィールドの規模が小さく、かつビルが乱立する地域で行ったため、通信モジュールの長距離通信性能を検証することが不可能であった。そのため、本研究では、災害時に運用される移動式 WSN において重視される長距離無線通信性能を検証するため、実フィールドにおいて、環境要因ごとに、通信モジュール同士の電波品質を測定するパケットエラー率と、通信強度の測定値である RSSI 値を測定した。

実験により、地上における指向性アンテナ同士の最大通信距離が 6km に対し、高所指向性アンテナにおける最大通信距離が 9.3km と、通信可能距離の大幅な延長を確認した。

よって、本論文の提案する、移動式 WSN における高所指向性アンテナを活用した通信距離延長方法の有効性を示した。

本章の構成を示す、まず、6.2 節で移動式センサネットワークの構成と課題について述べる。そして、6.3 節で本研究と関連する先行研究を紹介し、本研究の位置づけを示す。その後、6.4 節において実評価実験について示し、6.5 節において実験結果をまとめる。そして最後に、6.6 節で本章のまとめと今後の課題を示す。

6.2 移動式 WSN の開発と課題

近年、豪雨による河川の氾濫による土砂崩れや、家屋の浸水などの件数が増加している。広域浸水に関しては、河川の構造や、海拔、及び埋立地など、浸水を完全に防ぐ方法は困難である。

現状では、浸水箇所に対しポンプ車を代表とする排水機器を稼働させるという対処のみ可能である。しかし、可能な限り迅速に排水作業を行うためには、浸水箇所全域の水位データによる浸水全水量の把握が必要である。そのため我々は、日本工営株式会社と共同で現場での設置を目的とした移動式アドホック簡易水位計の試作を行っている。

移動式アドホック水位計とは、任意の箇所に設置された計測ノードからの水位情報を集約することで浸水地域の水位状況を可視化するシステムである。本システムには、排水に要する概算時間の算出や、最も水位の高い箇所へポンプ車が移動し、排水に要する時間を短縮することを目的として開発を行っている。本システムの概要を図 6.2 に示す。

移動式 WSN は固定式の WSN と比較し、以下の課題がある。

- シンクノード、計測ノードが任意の場所に設置されるため、事前に配置位置を検討することが困難である
- シンクノードを搭載した排水ポンプ車が移動するため、中継ノードの位置をシンクノードの移動を前提とした配置とする必要がある
- 浸水災害箇所への設置のため、消防車や各種重機が道路上に存在する可能性があるため、動的に変化する電波障害物を考慮する必要がある
- 地上に設置された計測ノード、及び中継ノードとシンクノード間の通信距離を最大限延長する必要がある

以上のように、移動式 WSN は、電波品質に影響する外的要因が動的に変化するため、固定式 WSN のように、事前に電波状況を測定し、配置を最適化することは困



図 6.2: システム概要

難である。また、計測ノード、ルータノードを設置する作業が、災害現場に位置するため、オペレータの手間を軽減する必要がある。

本研究では、災害時に運用される移動式 WSN において重視される長距離無線通信性能を検証するため、実フィールドにおいて、アンテナと設置高さを代表とする種々の環境要因ごとに、通信モジュール同士の電波品質を測定するパケットエラー率と、通信強度の測定値である RSSI 値を測定することで、高所に設置された指向性アンテナを利用した、移動式 WSN の設置場所の制約緩和を目的とした通信距離延長手法について提案する。

6.3 関連研究

近年，個人で運用可能な環境情報取得装置は研究用途や家庭用として広く販売されている。

しかし，どの研究も”閉じた環境”での最適化を目的とした研究であり，周囲環境が動的に変化する移動式の WSN の通信品質を維持するアプローチはとられていない。一般向けとして販売されている製品として，農業用のワイヤレスセンサシステムである MEMSIC 社の Eko システム [102] を用いた研究 [58] も行われている。また，民生用の製品として，米デイビス社の Vantage シリーズ [72] があるが専用端末でのみデータ閲覧が可能のため，大規模なデータ収集には向いていない。さらに，実験的な WSN による環境情報収集の例として，活火山に観測ノードを多数設置することで，噴火の予測などを目的としたデータ収集に関する研究 [90] も行われている。

我々は，大規模に高密度の情報を収集可能なセンサノードとサーバーアプリケーションを開発し，環境データの収集を行っている [84]。また，WSN 分野においては，消費電力の低減を目的としたセンサ配置の最適化に関する研究 [89] や，センサノードアプリケーションの構築にエージェント技術を適用した研究 [83] も存在する。さらに，運用面での管理容易化を狙い，ノードのプログラムを目的に応じて用意しておくことで，用途に応じたセンサネットワークの構築の容易化についての研究 [85] や，状況に応じたネットワークトポロジを自律的に構成する研究 [86] も存在している。

しかし，屋外で使用される WSN の大きな課題は，通信距離と安定した通信品質である。多くの研究では，継続的なデータ収集を目的とし，固定式センサネットワークの配置を最適化することで，通信品質を保つ研究が広く行われている。例えば，ノードの形成するトポロジの電波レベル（RSSI 値）を用いて，あらかじめ定義された空間においてノード配置を最適化する研究 [99] や，ノード群をクラスタとして捉えることで，通信ルートを最適化する研究 [100] さらに，ノード間のマルチホップを行う中継ノードの位置を最適化することで，通信エラーを低減させる

研究 [101] などがある。また、複数のシンクノードを配置し、シンクノードの位置を最適化する研究 [103] も行われている。

しかし、どの研究も”閉じた環境”での最適化を目的とした研究であり、周囲環境が動的に変化する移動式の WSN の通信品質を維持するアプローチはとられていない。特に、移動式 WSN では、固定式 WSN とは異なり、移動により変化する周辺の電波状況や建築物などの影響を定量化し、計測ノードの移動による電波品質を考慮した設置パターンを決定する必要がある。我々は、関連研究として無線通信の信頼性に焦点を当て、実フィールドにおいて、種々の環境要因ごとに、通信モジュール同士の電波品質を測定するパケットエラー率を測定することで、移動式 WSN に最適な設置パターンの提案を行い、設置場所の選定時間の短縮手法について提案している [80]。しかし、関連研究では、実験フィールドの規模が小さく、かつビルが乱立する地域で行ったため、通信モジュールの長距離通信性能を検証することが不可能であった。

本研究では、災害時に運用される移動式 WSN において重視される長距離無線通信性能を検証するため、実フィールドにおいて、アンテナと設置高さを代表とする種々の環境要因ごとに、通信モジュール同士の電波品質を測定するパケットエラー率と、通信強度の測定値である RSSI 値を測定することで、高所に設置された指向性アンテナを利用することで、通信距離を最大化し、移動式 WSN に最適な設置パターンについて提案する。

6.4 電波測定試験

6.4.1 実験環境と実験期間

本項では、国営木曽三川公園において実験した、周辺環境が与える、電波品質への影響試験について述べる。

実験では、実フィールドにおいて通信距離限界を測定することを目的として、地上、及び高所において、通信モジュール同士の電波品質を測定するパケットエラー

率と、通信強度の測定値である RSSI 値を測定した。実験期間と実験場所について以下に示す。

- 実験期間：2014年11月27日～28日
- 実験場所：岐阜県海津市海津町 国営木曾三川公園センター周辺
- シンクノード設置位置：地上試験 - 14K ポスト
- シンクノード設置位置：高所試験 - 木曾三川公園センター 水と緑の館展望タワー屋上（地上68m）

本実験フィールドは、国土交通省 中部地方整備局様のご協力を得て、国営木曾三川公園の管理用堤防道路を利用して行った。図6.3に、実験フィールドの俯瞰図を示す。

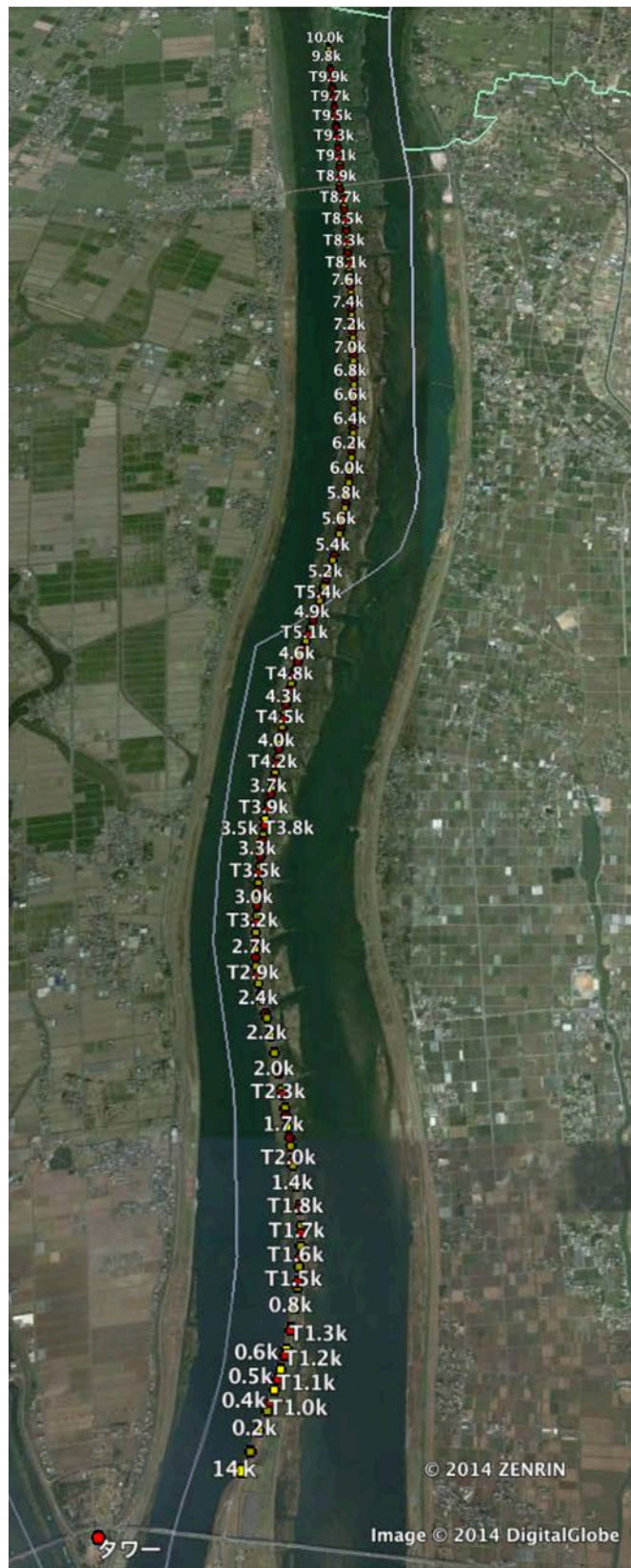


図 6.3: 実験サイトとシンクノードからの距離一覧

地上電波試験においてはシンクノードを地図下方の 14k ポストに設置し、高所に設置された指向性アンテナ（地上高 65m のタワー屋上に設置）を接続したシンクノードについては地図下方左側のタワー表記箇所に設置した。また、地図上の数値については Tx.xK とあるものはタワーとの距離を表しており、T 表記のないものについては地上試験における河川の基準点である、14k ポストからの直線距離を表している。

6.4.2 測定機材

本実験では、2種類の通信モジュールを用いて、通信品質の評価を行った。

- 東京コスモス社 TWE-Strong
- デイジ・インターナショナル Xbee Pro S2B

双方ともに 2.4GHz 帯 Zigbee 通信規格を用いており、省電力でマルチホップ・アドホック通信が可能であることが挙げられる。TWE-Strong[107]については、日本国内で認可されている最大出力である 10mA 出力モジュールでありながらも、アンテナ回路を内蔵することにより、見通しで最大 3km の通信が可能なモジュールである。一方の Xbee モジュール [110]については、Zigbee 通信モジュールでは研究用途で最も多く使用されており、出力も 10mA と同一なことから、比較のため、実験に使用した。電波品質の測定方法は、シンクノード（親機）、ルータノード（子機）間のループバックテストによって行い、32byte のパケットを 100ms 間隔で 1000 回シンクノードからルータノードへ送信し、ルータノードから返送されてきたパケットのエラー率を測定するループバックテストを行った。TWE-Strong のループバックアプリケーションには、東京コスモス社製の開発キットを用い、Xbee のループバックテストについては、デイジインターナショナルが提供する評価環境である X-CTU[94]を用いて、PC に USB 接続されたシンクノードよりパケットを送信し、実験を行った。

パケットエラー率 (PER: Packet Error Rate) は、測定端から他の測定端へパケットを送信する際に、どれくらいの割合で送信が成功するかで定義され、15% - 30%程度であれば通常、通信品質としては問題無いが、パケットエラー率が50%を超えると、送受信時の通信エラーが頻発していることになり、通信品質が悪化しているとみなすことができる。また、通信品質の基準である RSSI 値についても通信限界時の参考値として取得を行った。

RSSI とは、Received Signal Strength Indication, Received Signal Strength Indicator の略語であり、受信信号の強度を示す。RSSI は-0dBm から-100dBm の数値 (単位: dBm) で表され、- 50dBm 以下であれば”Excellent”，- 80dBm 以下であれば”good”，-80dBm 以上は”Bad” となり、電波強度を数値として表すことができる。本実験では、電波品質の測定には PER を用い、電波強度の測定については RSSI 値を用いた。

6.4.3 実験設定

本実験では、地上に設置したセンサノード群を想定した地上試験、及び、高所に設置された親機と地上に設置された計測、及び中継ノード群との通信を想定し、高所試験を行った。以下に実験項目を示す。

- [1] 地上試験1【親機：無指向アンテナ，子機：無指向アンテナ】
- [2] 地上試験2【親機：指向性アンテナ，子機：無指向アンテナ】
- [3] 高所試験1【親機：指向性アンテナ，子機：無指向アンテナ】
- [4] 高所試験2【親機：指向性アンテナ，子機：指向性アンテナ】

上記4項目の試験を行うことで、周辺条件の変化及び、アンテナ種類が与える影響について実験を行った。地上試験におけるアンテナ設置図を図6.4に示し、高所試験におけるアンテナ設置図を図6.5に示す。

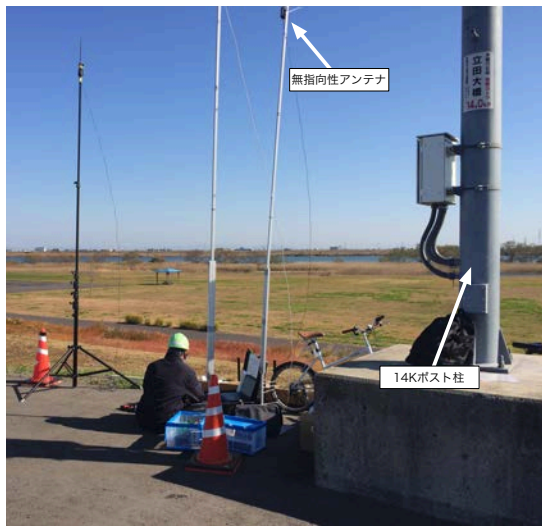


図 6.4: 地上試験におけるアンテナ設置図



図 6.5: 高所試験におけるアンテナ設置図

6.4.4 実験結果

地上試験 1 【親機：無指向アンテナ，子機：無指向アンテナ】

本項では、WSN で最も一般的な利用形態を想定し、親機・子機ともに地上高さ 4m に設置された無指向性アンテナでの試験を行った。TWE モジュールにおける実験結果を表 6.1 に示し、Xbee モジュールにおける実験結果を表 6.2 に示す。実験結果において、子機位置は親機からの直線距離を示している。また、備考欄には通信不可能な場合の周辺状況を記載した。通信試験においては、子機の移動が完了した時点で親機を一度リセットし、ネットワークへの接続可否についても記載した。一般的に、通信確立状態を保ったままノードを移動させた場合は通信距離が延びる。しかし、移動式 WSN の場合はセンシング対象付近へ移動した際に電源を入れ、通信確立を想定していることからネットワーク接続可否が可能な通信距離を測定する必要がある。本実験における通信確立可否については、通信確立欄にて可否を記載した。

実験結果から、Xbee モジュールは 1.4km 地点で PER は 5.2% であるが RSSI - 92dBm と、電波強度的に限界である。TWE モジュールについては 2.9km 地点で

表 6.1: 地上試験 1 TWE 使用ケース

モジュール	子機位置	親機高さ	子機高さ	通信確立	RSSI	PER	備考
TWE	0K	4m	4m	可	-43.9	0.0%	
TWE	0.5K	4m	4m	可	-76.45	0.0%	
TWE	1K	4m	4m	可	-84.85	0.0%	
TWE	1.3K	4m	4m	可	-81.7	0.0%	
TWE	1.4K	4m	4m	可	-84.85	3.4%	
TWE	1.7K	4m	4m	否	-	-	樹木遮蔽
TWE	2.4K	4m	4m	否	-	-	樹木遮蔽
TWE	2.5K	4m	4m	可	-93.25	98.0%	
TWE	2.6K	4m	4m	否	-	-	樹木遮蔽
TWE	2.7K	4m	4m	否	-	-	樹木遮蔽
TWE	2.8K	4m	4m	可	-84.85	32.0%	
TWE	2.9K	4m	4m	可	-84.85	25.0%	通信限界
TWE	3.0K	4m	4m	否	-	-	

表 6.2: 地上試験 1 Xbee 使用ケース

モジュール	子機位置	親機高さ	子機高さ	通信確立	RSSI	PER	備考
Xbee	0K	4m	4m	可	-50	0.0%	
Xbee	0.5K	4m	4m	可	-79	0.0%	
Xbee	1K	4m	4m	可	-85	0.0%	
Xbee	1.3K	4m	4m	可	-91	3.0%	
Xbee	1.4K	4m	4m	可	-92	5.4%	
Xbee	1.7K	4m	4m	否	-	-	樹木遮蔽
Xbee	1.9K	4m	4m	否	-	-	以降通信不可

PER25%, RSSI -84.85dBm となっており、電波品質及び、電波強度についても限界と言える。また、1.7km 地点より 2.7km 地点については、親機からの直線距離上に樹林帯が存在しており、通信が不可能であった。本結果より、Xbee モジュールの通信限界は 1.4km 程度、TWE モジュールの通信限界は 2.9km 程度であることがわかった。

地上試験2【親機：指向アンテナ，子機：無指向アンテナ】

次に，地上における指向性アンテナ性能検証のため，親機は指向性アンテナを地上高4mに設置し，子機は地上高さ4mに設置された無指向性アンテナでの試験を行った．Xbee モジュールにおいては，電波法で認可された指向性アンテナが存在しないため，TWE モジュールのみで試験を行った．指向性アンテナを接続した TWE モジュールにおける実験結果を表6.3に示す．電波状況が極度に悪く，通信が不可能な場合は”否”と示す．親機角度については，方位角，迎角を記載した．また，子機位置は親機からの直線距離を示している．また，備考欄には通信不可能な場合の周辺状況を記載した．

表 6.3: 地上試験2 TWE 指向性アンテナケース

モジュール	子機位置	高さ	親機方位角	親機迎角	通信確立	RSSI	PER	備考
TWE	4.6K	4	10	0°	可	-43.9	8.5%	
TWE	4.7K	4	10	0°	可	-76.45	77.4%	
TWE	4.8K	4	10	0°	否	-	-	樹木遮蔽
TWE	4.9K	4	10	0°	可	-81.7	81.8%	
TWE	5.0K	4	10	0°	否		-	通信不可

実験結果によると，4.7km地点でRSSI -76.45dBmではあるが，PERが77.4%となっており，電波品質はそこまで悪化していないが，電波強度については限界と言える．また，4.7km地点以降については，親機からの直線距離上に樹林帯が存在しており，周辺環境としては良くない状況である．本結果より，地上における指向性アンテナを用いた TWE モジュールの通信限界は実用上4.6km程度であることがわかった．

高所試験1【親機：指向性アンテナ，子機：無指向アンテナ】

本項では，高所における指向性アンテナの性能検証のために，親機は指向性アンテナを地上高68mの展望タワー屋上に設置し，子機は地上高さ4mに設置された無指向性アンテナでの試験を行った．本実験においてもXbeeモジュールでは，

電波法で認可された指向性アンテナが存在しないため、TWE モジュールのみで試験を行っている。指向性アンテナを接続した TWE モジュールにおける実験結果を表 6.4 に示す。通信状況が悪く、通信が不可能な場合は”否”と示す。親機角度については、方位角、迎角を記載した。また、子機位置は親機からの直線距離を示している。また、備考欄には通信不可能な場合の周辺状況を記載した。

表 6.4: 高所試験 1 子機無指向性アンテナケース

モジュール	子機位置	高さ	親機方位角	親機迎角	通信確立	RSSI	PER	備考
TWE	T1.0K	4	52	0°	可	-59.65	0.0%	
TWE	T2.0K	4	22	0°	可	-73.3	1.6%	
TWE	T3.0K	4	2	0°	可	-74.35	0.6%	子機高さ 3m
TWE	T4.0K	4	6	0°	否	-	-	樹木遮蔽
TWE	T5.0K	4	8	0°	否	-	-	樹木遮蔽
TWE	T6.0K	4	8	0°	可	-78.9	26.0%	子機高さ 3m
TWE	T7.0K	4	8	0°	否	-	-	樹木遮蔽
TWE	T8.0K	4	7	0°	否	-	-	樹木遮蔽
TWE	T9K	4	6	0°	否	-	-	
TWE	T10K	4	-	-	否	-	-	樹木遮蔽

本実験結果では、子機 T6km 地点で RSSI -78.9.dBM, PER が 26.0% となっており、電波品質及び電波強度についても余裕がある。しかし、子機高さ 4m では通信ができず、高さを 3m にした際は通信が可能となった。子機高さ変更により通信品質が変化する要因として、地面からの反射波が要因として考えられるが、現状のデータからははっきりとした原因究明には至っていない。さらに、後日行った再試験結果においても、同様の結果となっているため、高所に設置されたアンテナからの通信状態によっては、子機の高さを変更することで通信状況の改善が可能であることがわかった。また、本実験フィールドにおける通信限界は T6.0km 地点であるが、PER 及び RSSI についてはまだ余裕があることから、樹木遮蔽のない箇所において再実験を行うことで、真の通信限界を把握する必要があると考える。

高所試験2【親機：指向性アンテナ，子機：指向性アンテナ】

本項では，高所における指向性アンテナと，地上に設置された指向性アンテナの性能検証のために，親機は指向性アンテナを地上高68mの展望タワー屋上に設置し，子機は地上高さ4mに設置された指向性アンテナでの試験を行った．本実験においても Xbee モジュールでは，法律で認可された指向性アンテナが存在しないため，TWE モジュールのみで試験を行っている．指向性アンテナを接続した TWE モジュールにおける実験結果を表6.5に示す．電波状況が極度に悪く，通信が不可能な場合は NG と示す．親機及び子機角度については，カンマ以前が方位角度，カンマ以後を迎角として記載した．また，子機位置は親機からの直線距離を示している．また，備考欄には通信不可能な場合の周辺状況を記載した．

表6.5: 高所試験1 子機指向性アンテナケース

モジュール	子機位置	親機角度	子機角度	通信確立	RSSI	PER	備考
TWE	T1.0K	52,0	220,11.1	可	-65.95	0.0%	
TWE	T2.0K	22,0	234,10	可	-62.8	0.0%	
TWE	T3.0K	10,0	224,8.2	可	-67	0.0%	
TWE	T4.0K	6,0	232,8.9	否	-	-	樹木遮蔽
TWE	T5.0K	8,0	197,9.0	可	-78.55	44.6%	樹木遮蔽
TWE	T6.0K	8,0	207,0.05	可	-67	0.0%	
TWE	T7.0K	8,0	-	否	-	-	樹木遮蔽
TWE	T8.0K	7,0	208,3.1	否	-	-	樹木遮蔽
TWE	T9K	6,0	207,3	可	-73.3	0.5%	
TWE	T10K	16,0	207,3	否	-	-	樹木遮蔽

本実験結果では，子機96km地点でRSSI -73.3.dBM, PERが0.5%となっており，電波品質及び電波強度についても十分に余裕がある．そのため，T9.0km地点以降の樹木遮蔽がなければ，より長距離の通信が可能になると考える．また，本実験フィールドにおける通信限界はT9.0km地点であるが，PER及びRSSIについてはまだ余裕があることから，樹木遮蔽のない箇所において再実験を行うことで，真の通信限界を把握する必要があると考える．

6.5 実験結果まとめ

本実験により、移動式 WSN における通信距離の延伸においては高所に設置されたアンテナを活用することで、最大通信距離 9.3km と大幅な通信距離の延長が確認できた。また、地上に設置されたセンサノード間の通信距離は無指向性アンテナ同士の通信の場合で最大 2.9km 程度、無指向性アンテナと指向性アンテナの組合せの場合、最大 4.6km 程度であることがわかった。しかし、地上に設置されたセンサノード間の通信品質は、自動車の通行をはじめとする周辺状況によって大きく変化することが先行研究により判明している [80]。そのため、センシング対象が地上にあり、周辺状況によって通信品質が確保できない場合は、中継局を用いて、通信品質を保つ必要がある。また、高所に設置された指向性アンテナを使用した場合、子機アンテナが無指向性の場合には最大 6.0km 程度、子機アンテナが指向性の場合には 9km 以上の通信距離が確保可能であることがわかった。特に、高所に設置されたアンテナと地上間の通信試験については実施された例がなく、本実験により、移動式 WSN における通信距離の延伸においては高所に設置されたアンテナを活用することで、通信距離、及び通信品質の改善が可能であることがわかった。

6.6 結言

本論文では、移動型 WSN のために、高所指向性アンテナを活用することで、災害時に地上局の迅速な設置が可能であることを示した。本実験により、地上における指向性アンテナ同士の最大通信距離が 6km に対し、高所指向性アンテナにおける最大通信距離が 9.3km と、通信可能距離の大幅な延長を確認した。我々は、関連研究として無線通信の信頼性に焦点を当て、実フィールドにおいて、種々の環境要因ごとに、通信モジュール同士の電波品質を測定するパケットエラー率を測定することで、移動式のセンサネットワークに最適な設置パターンの提案を行い、設置場所の選定時間の短縮手法について提案している [80]。しかし、先行研究では、実験フィールドの規模が小さく、かつビルが乱立する地域で行ったため、通信モ

ジュールの長距離通信性能を検証することが不可能であった。本研究では、災害時に運用される移動式 WSN において重視される長距離無線通信性能を検証するため、実フィールドにおいて、環境要因ごとに、通信モジュール同士の電波品質を測定するパケットエラー率と、通信強度の測定値である RSSI 値を測定した。よって、本論文の提案する、移動式 WSN における高所指向性アンテナを活用した通信距離延長方法は有効である。そのため、高所指向性アンテナを用いることで地上局の設置位置の制約が緩和され、設置における中継局の削減、及び設置検討時間の短縮が実現できる。

特に、災害発生時には倒壊した建築物や樹木、工事車両といった電波障害要因が多く存在することが想定される。その意味でも、地上対地上の通信手段だけではなく、高所に設置された中継ポイントをいくつか介在させることで、通信距離と通信信頼性を両立させることが重要である。

今後は、通信限界域での通信障害の環境要因の分析を行うとともに、実際の運用フィールドにおける問題の抽出や、ノードトポロジの自動切り替えに要する時間の取得など、実運用に向けた課題を整理するとともに、移動式 WSN の設置アルゴリズムを構築する。さらに、近年 920Mhz 帯を代表とするサブ GHz 帯のモジュールが日本国内において認可されているため、2.4Ghz 帯と比較して回りこみ特性の優れたモジュールを用いた通信距離の延長を目指して研究を進めていく。

第7章 大規模屋外WSNの 課題と実装

7.1 序言

近年、豪雨による河川の氾濫による土砂崩れや、家屋の浸水などの件数が増加している。内水被害に関しては、河川の構造や、海拔及び、埋立地である箇所など、内水による浸水被害を完全に防ぐ方法は困難である。現状では、浸水箇所に対しポンプ車を代表とする排水機器を稼働させるという対処のみ可能である。しかし、可能な限り迅速に排水作業を行うためには、浸水箇所全域の水位データによる浸水全水量の把握が必要である。そのため我々は、日本工営株式会社と共同で現場での設置を目的とした可搬式アドホック簡易水位計の試作を行っている。

特に、可搬式のワイヤレスセンサネットワークでは、通信ノード移動による周囲の環境要因によって通信信頼性が大きく左右される。そのため、固定式のワイヤレスセンサネットワークとは異なり、移動により変化する周辺の電波状況や建築物、植物などの影響をはじめとした多くの相違点が存在する。さらに、実際の災害現場にて運用される可搬式アドホック簡易水位計システムに必要な機能と課題は、実運用を行う作業者の目線に立って決定する必要がある。本論文では、移動を前提としたアドホック簡易水位計システムの課題を整理するとともに、可搬式ワイヤレスセンサネットワークの実装と試験運用を行った。

本章の構成を示す、まず、7.2節で本研究と関連する先行研究を紹介し、本研究の位置づけを示す。そして、7.3節で可搬式センサネットワークの構成と課題について述べる。その後、7.4節において課題を克服するための設計指針とその実装について示し、7.5節において試作したシステムの運用結果について述べる。そして

最後に、7.6 節で本章のまとめと今後の課題を示す。

7.2 関連研究

7.2.1 WSN における研究動向

ワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) は、近年、IoT (Internet of Things), M2M (Machine to Machine) の中核を成す技術であり、広く研究が行われている [88]。WSN を構成するノードは、温度、照度、加速度等のセンサデータを取得し、取得したデータを無線波を利用してバケツリレー方式で転送する“マルチホップ・アドホックネットワーク”を構成することができる [82][87]。WSN は、ノードを配置するだけで自律的なネットワークを構成できるため、利用現場での敷設作業を軽減できる。また、センサデータを取得することで、現実世界の動態を捉えることができるため、対象物のトラッキングや自然環境のモニタリングが WSN における有望なアプリケーションとして広く研究されている。

ワイヤレスセンサネットワークは、多数の子機 (センシングノード) からの情報を集約するシンクノード (Sink mode) と、マルチホップでの情報の中継が可能なルータノード (Router node) から構成され、環境情報の観測や、スマートホーム等の分野で広く利用されてきている。研究用途では、1998 年に UC バークレー校で開発された MOTE [81] が有名であるが、近年、IEEE802.15.4 として規格化された、ZigBee ネットワークを用いたセンサネットワークの研究が盛んである。しかし、日本国内において販売されている免許、工事認証ともに不要な通信モジュールは、諸外国と比較して出力が大幅に制限されており、通信距離の制約が大きい。

また、近年、個人で運用可能な WSN 環境情報取得装置は研究用途や家庭用として広く販売されている。農業用のワイヤレスセンサシステムである MEMSIC 社の Eko システム [102] を用いた研究 [58] も行われているが、ユニット単価が 10 万円程度と高く、大量に設置するには敷居が高い。更に、民生用の製品として、米デイビス社の Vantage シリーズ [72] などがあり、通信装置別途で 6 万円と、比較的

低価格であるが、専用のアプリケーションでのみ動作可能なため、大規模なデータ収集には向いていない。また、実験的な WSN による環境情報収集の例として、活火山に観測ノードを多数設置することで、噴火の予測などを目的としたデータ収集に関する研究 [90] も行われている。

我々は、大規模に高密度の情報を収集可能なセンサネットワークデバイスとサーバーアプリケーションを開発し、環境データの収集を行っている [84]。また、ワイヤレスセンサネットワーク分野においては、消費電力の低減を目的としたセンサ配置の最適化に関する研究 [89] や、センサノードアプリケーションの構築にエージェント技術を適用した研究 [83] も存在する。さらに、運用面での管理容易化を狙い、目的に応じたノードのプログラムを用意しておくことで、用途に応じたセンサネットワークの構築の容易化についての研究 [85]、状況に応じたネットワークトポロジを自律的に構成する研究 [86] もあり、柔軟な計測を行うフレームワークとしての WSN の研究が盛んである。

7.2.2 WSN の電波品質安定化に関する研究

WSN において、最も重要な要求は、ネットワークの安定性である。すなわち、継続的なデータ収集を目的とし、固定式センサネットワークの配置を最適化することで、ネットワークの品質を一定に保つ研究が広く行われている。多くの WSN 通信モジュールは、アドホックネットワークを構築することで、通信の冗長性を確保しているが、ノード間の通信距離や通信品質を担保することが重要である。例えば、ノードの形成するトポロジの電波レベル (RSSI 値) を用いて、あらかじめ定義された空間においてノード配置を最適化する研究 [99]、ノードをクラスタとして捉えることで、通信ルートを最適化する研究 [100]、ノード間のマルチホップを行う中継局の位置を最適化することで、通信エラーを低減させる研究 [101] などがある。また、複数のシンクノードを配置し、シンクノードの位置を最適化する研究 [103] も行われている。

しかし、どの研究も”閉じた環境”での最適化を目的とした研究であり、周囲環

境が動的に変化する移動式の WSN の通信品質や、実フィールドにおいて運用される可搬式のセンサネットワークへ直接応用することは難しい。特に、広範囲に環境情報を取得する目的で構築されるセンサネットワークでは、通信距離を必要とするため、農業分野や、河川管理業務においては、設置場所付近の電波状況をあらかじめ測定しておき、事前調査の上、計測ノードの配置を考慮した上で設置を行う手法が一般的である。しかし、現場での運用を目的とした可搬式センサネットワークについては事前に電波状況を測定した上での設置は現実的ではない。近年、豪雨による河川の氾濫による土砂崩れや、家屋の浸水などの件数が増加しているが、内水被害に関しては、河川の構造や、海拔及び、埋立地である箇所など、内水による浸水被害を完全に防ぐ方法は困難である。そのために我々は、日本工営株式会社と共同で現場での設置を目的とした可搬式アドホック簡易水位計の試作を行っている。しかし、可搬式のワイヤレスセンサネットワークでは、通信ノード移動による周囲の環境要因によって通信信頼性が大きく左右される。そのため、固定式のワイヤレスセンサネットワークとは異なり、移動により変化する周辺の電波状況や建築物、植物などの影響をはじめとした多くの相違点が存在する。さらに、実際の災害現場にて運用される可搬式アドホック簡易水位計システムに必要な機能と課題は実運用を行う作業者の目線に立って決定する必要がある。

我々はまず、災害現場にて運用される可搬式アドホック簡易水位計システムに必要な機能と課題について整理することで、可搬式アドホック簡易水位計システムの開発及び実装を行った。

7.3 可搬式 WSN の開発と技術的課題

7.3.1 可搬式アドホック水位計に必要な性能

近年、豪雨による河川の氾濫による土砂崩れや、家屋の浸水などの件数が増加している。広域浸水に関しては、河川の構造や、海拔及び、埋立地である箇所など、浸水を完全に防ぐ方法は困難である。現状では、浸水箇所に対しポンプ車を代

表とする排水機器を稼働させるという対処のみ可能である。しかし、可能な限り迅速に排水作業を行うためには、浸水箇所全域の水位データによる浸水全水量の把握が必要である。そのために我々は、日本工営株式会社と共同で災害現場での設置を目的とした可搬式アドホック簡易水位計の試作を行っている。移動式アドホック水位計とは、浸水地域の排水を行うポンプ車にシンクノードを搭載し、任意の箇所に設置された計測ノードからの水位情報を集約することで、浸水地域の水位状況を可視化することで、排水に要する所要時間の算出や、最も水位の高い箇所へポンプ車が移動することで排水に要する時間を短縮することを目的として開発を行っている。また、将来的にはポンプ車統合管理システムとの協調により、少ないオペレータ数でポンプ車を用いた排水作業の効率化を図ることを目的としている。本システムの概要を図 7.1 に示す。本システムは、現実に運用されるシステムのため、研究用途のセンサノードと異なり高い信頼性が求められる。また、

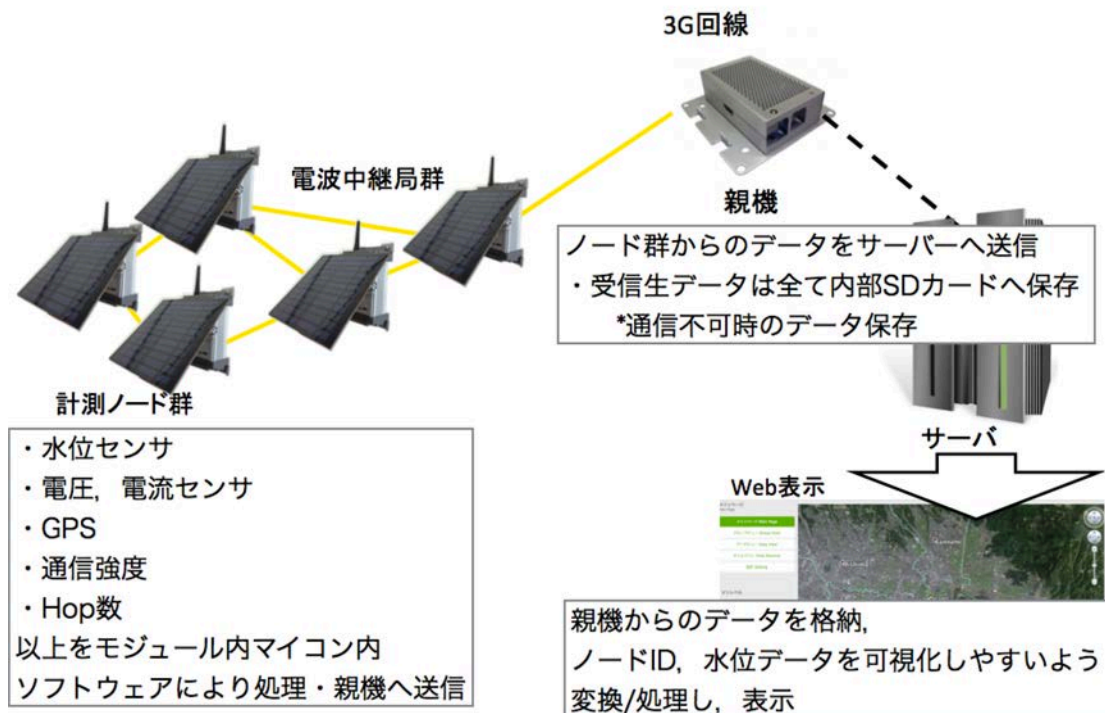


図 7.1: システム概要

固定式の WSN や屋外運用される農業用 WSN と異なるため、以下3つの課題が存在する。

通信信頼性の課題 シンクノード、計測ノードが任意の場所に設置されるため、事前に配置位置を検討することが困難である。そのため、通信距離だけでなく、アドホックネットワークの冗長性を確認する必要がある。

システム面での課題 計測ノード自身が移動するため、リアルタイムに現在位置及び、水位変化をわかりやすく表示する必要がある。

運用面での課題 災害現場にて運用されるため、現場での設置の容易化、及び故障時の保守容易化が必須である。

また、固定式 WSN とは異なり、電波品質に影響する外的要因が動的に変化する可能性が高く、固定式 WSN のように、事前に電波状況を測定し配置を最適化することは困難である。そのため、全ての通信ノードがアドホックネットワークによる中継局として振舞うことが求められる。よって、ハードウェア側ではなく、サーバソフトウェア上で水位計の接続有無を設定することで計測ノードと中継ノードを識別している。また、計測ノード、ルータノードを設置する作業が災害現場に位置するため、オペレータの手間を軽減する必要がある。そのため、設置の容易さはもちろんのこと、通信ノード設置場所の可視化及び、水位情報可視化を行うことで、現場作業者にとって使いやすいシステムであることが求められる。

7.4 技術的課題解決の提案とその実装

7.4.1 可搬型 WSN における通信信頼性

本項では、7.3節で挙げた技術的課題とその解決方法、及び実装について述べる。まずはじめに、通信信頼性の課題について述べる。通信信頼性とは、災害現場における建物や樹林帯の影響による通信障害をいかに克服するかという問題である。室内環境に設置される多くのセンサネットワークと比較した場合、建物が密集す

る地域に設置される屋外型センサネットワークの場合、設置する位置によって電波遮蔽物の影響が大きく、通信が不可能である場合も想定される。

特に、我々の開発している可搬式のワイヤレスセンサネットワークでは、通信ノード移動による周囲の環境要因によって通信信頼性が大きく左右される。そのため、固定式のワイヤレスセンサネットワークとは異なり、移動により変化する周辺の電波状況や建築物、植物などの影響をはじめとした多くの相違点が存在する。我々は、多くのフィールドで電波試験を行うことで [104]、可搬式センサネットワークにおいて重要である電波品質の問題を解決すべく、設置位置の推薦アルゴリズムについても提案している [105][106]。また、アドホックネットワークを用いた国内における WSN の研究分野では、Digi 社の Xbee シリーズが用いられることが多いが、我々が行った関連研究においても、消費電力や通信距離に特筆すべき優位点は見られない [104]。

我々はその知見を生かし、通信モジュールとして、東京コスモス社の TWE-Strong[107] を採用するとともに、全てのノードを中継局及び計測局として運用できるよう、ソフトウェアで計測局と中継局を切り替え可能なアーキテクチャを採用した。中継局もしくは測定局は webUI より切り替え可能とし、水深データから水位への変換に関しては、基準値からのオフセット量を用いることで水位データとして表示している。そのため、電波状況が悪い箇所に対しても、中継局によりデータの中継を行うことで通信の信頼性を担保することが可能である。また、システム面の課題である、ノードの位置把握に関しては GPS モジュールを搭載することで現在位置を送信することを可能とした。

7.4.2 フルメッシュネットワークの特徴と課題

本項では、ネットワーク障害発生時の再接続が高速なフルメッシュネットワークの実現に向けて、フルメッシュネットワークの特徴と課題について示す。フルメッシュネットワークは、通信距離の延長と通信信頼性向上に有用なネットワーク構成である。しかし、フルメッシュネットワークにはいくつかの問題点が存在する。

特に、屋外ワイヤレスセンサネットワークにフルメッシュネットワークを適用するためには、大きく分けて以下2点の問題がある。

ハードウェアの問題 全てのノードが中継ノードとして振舞うため、消費電力が大きい。

ソフトウェアの問題 データサンプリング間隔によっては、データ欠損を防ぐために通信障害時の再接続速度を向上させる必要がある。

以上2点の問題点を克服する手法について、ハードウェアによる低消費電力の実現方法を7.3.2項において述べ、7.3.3項においてソフトウェアによる通信障害時の再接続速度向上手法について述べる。

フルメッシュネットワークを構成する重要な技術として、アドホックネットワークが挙げられる。アドホックネットワークとは、ルーティングノードとして振る舞うノードがデータを中継することで、長距離のデータ伝送が可能になるネットワーク形式である。近年では、屋外型センシングに利用される多くのセンサネットワークシステムにおいて、“フルメッシュネットワーク”[96][97][98]が採用されている。フルメッシュネットワークとは、全てのノードを中継局として運用することで、通信信頼性と通信距離の延長を目的としたネットワーク構成である。

また、アドホックネットワークを用いた国内における WSN の研究分野では、IEEE802.15.4規格であるDigi社のXbeeシリーズ[110]が広く用いられている。また、IEEE802.15.4の技術的仕様として、データ中継機能を持つアドホックネットワークが構築可能なことがある。しかし、屋外で使用するには、消費電力や通信距離が他の通信モジュールに劣ることが実験により判明した[104]。我々はその知見を生かし、通信モジュールとして、東京コスモス社のTWE-Strong[107]を採用し、フルメッシュネットワークを構築した。

しかし、フルメッシュネットワークを構築するため、全てのノードを中継局として運用した場合、電力消費量が多くなる。さらに、屋外においては、外的要因などによる通信切断が発生することが多く、通信回線切断時のネットワークへの復帰速度も重要である。しかし、一般的に使用されている WSN のプロトコルスタッ

クである ZigBee では、自身の接続可能ノードかどうかを判断するために、シンクノードへの問い合わせを行ったのち、シンクノードのみがネットワークへの参加を許可する権限を要するため、再接続に時間がかかる。そのため、我々は、東京コスモス電機の提供する ToCoNet[107] を改良することで、ネットワーク再接続の高速化を実現した。我々はハードウェア、ソフトウェア双方の問題点を解決することで、ネットワーク障害発生時の再接続が高速なフルメッシュネットワークを実装した。

7.4.3 再接続が高速なフルメッシュネットワークの実装

本項では、ネットワーク障害発生時の再接続が高速なフルメッシュネットワークのためのソフトウェア側の解決策について提案する。フルメッシュネットワークでは、通信断絶時には自動で近隣の中継ノードを探索し、再接続を試みるシステムが一般的である。しかし、一般的に使用されている WSN のプロトコルスタックである ZigBee では、自身の接続可能ノードかどうかを判断するために、シンクノードへの問い合わせを行ったのち、シンクノードのみがネットワークへの参加を許可する権限を要するため、再接続に時間がかかる。ZigBee プロトコルスタックによる、再接続時の親機へのノード参加プロセスについて 図 7.2 に示す。

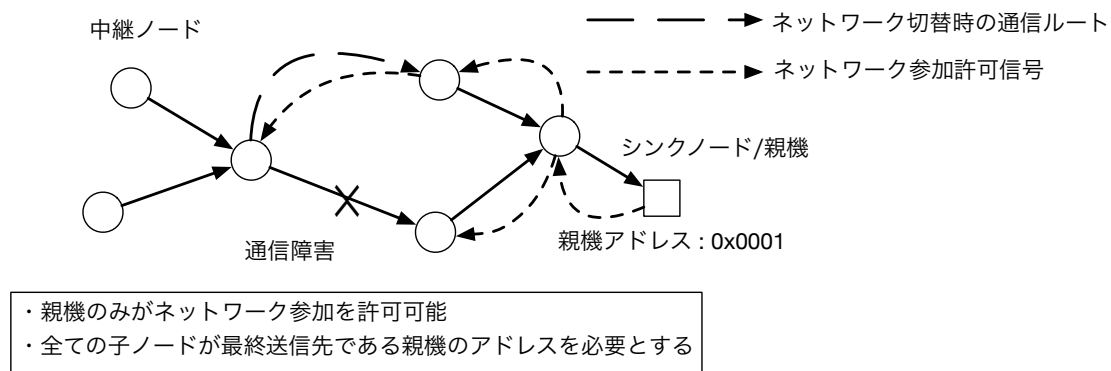


図 7.2: ZigBee による再接続フロー

図??に示すように、一般的な ZigBee [110] プロトコルスタックを用いたフルメッ

シユネットワークでは、ノードのネットワーク参加時には親機へ参加可否を問い合わせる必要がある。そのため、トポロジの大きなネットワークでは、ネットワーク参加への許可信号をバケツリレー方式で転送するため、通信回線切断時の再接続に時間を要する。また、通信品質が良好でない場合、通信リトライが発生することにより、さらに時間を要することも多い。

我々は、高速なフルメッシュネットワークの回線切替を実現するために、アプリケーション ID のみを識別子として採用している。我々の提案するプロトコルスタックの特徴を以下に示す。

- 全てのノードはアプリケーション ID を持ち、各ノードがネットワークへの参加を許可できる
- アプリケーション ID により参加を許可されたノードは、上位ノードである親機ノードへデータを伝送する
- ルータノードは親機ノードの固有 ID を持つ必要がない

図 7.3 に我々の提案するプロトコルスタックによるネットワークへの再接続フローを示す。

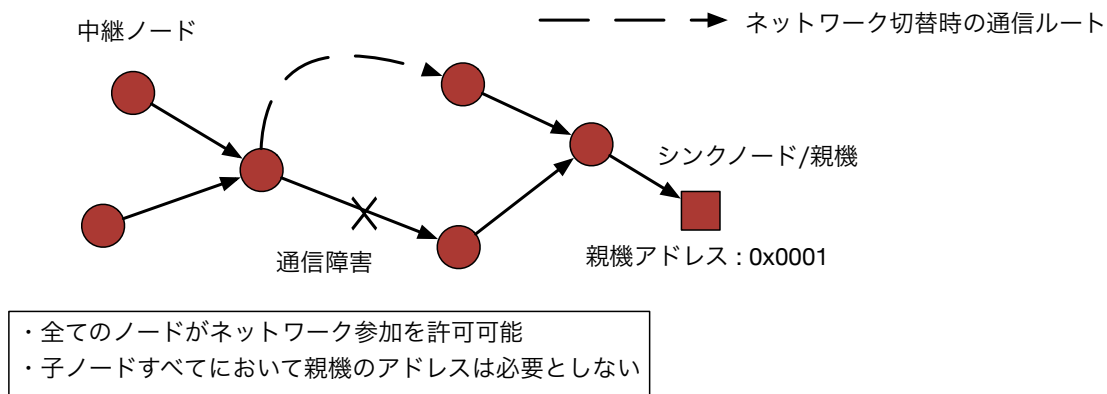


図 7.3: 提案するプロトコルスタックの再接続フロー

我々は、東京コスモス電機の提供する ToCoNet[107] を改良することで、ネットワーク再接続の高速化を実現した。

次に、一般的な ZigBee プロトコルスタックと、我々の提案するプロトコルスタックについて比較実験を行った。比較実験の設定を以下に示す。

- 実験設定: 2015 年 3 月 16 日
- ZigBee プロトコルスタック使用機器: Digi corp. Xbee Pro S2B (IEEE802.15.4 2.4 Ghz)
- 提案プロトコルスタック使用機器: TOCOS TWE-Strong (IEEE802.15.4 2.4 Ghz)
- ルータノード数: 4

試験時のネットワーク構成を図 7.4 に示す。実験では、ノード C の電源を意図的に切断し、ノード D からのデータがシンクノードを受信するまでの時間を測定した。1 回の実験ごとに、5 分間のインターバルを設けたのち、20 回繰り返すことで比較実験を行った。

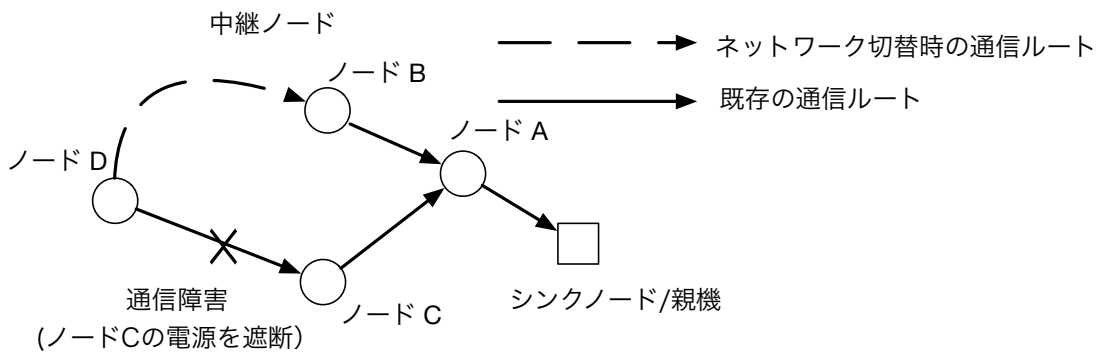


図 7.4: 実験時のネットワーク構成

表 7.1 に ZigBee プロトコルスタックと、提案するプロトコルスタックのネットワーク再接続速度比較実験結果を示す。

我々は、東京コスモス社の TocoNet を改良したプロトコルスタックを用いることで、ZigBee プロトコルスタックに存在する親機によるネットワーク参加プロセ

表 7.1: 比較実験結果

実験結果	ZigBee	提案システム
20回実施時の平均速度	63.5 秒	7.2 秒
最低速度	92 秒	10 秒
最高速度	45 秒	4 秒

スを省略するとともに、アプリケーション ID と呼ばれる識別子のみを使用するプロトコルスタックを提案した、アプリケーション ID を用いることで、各中継ノードが参加可否を判断できるため、親機へ参加可否を求める必要がなく、迅速な回線切替が可能である。以上により、ソフトウェア側での回線切替を高速化することで、障害発生時の回線切替によるデータ欠損が起こりづらいシステムを実装した。

本結果により、フルメッシュネットワークの消費電力の削減についてはハードウェア側で対処し、ネットワーク再接続時の速度についてはソフトウェア側で対処することにより、ネットワーク障害発生時の再接続が高速なフルメッシュネットワークを実現した。

7.4.4 低消費電力を実現するハードウェア設計

一般的なメッシュネットワークでは、通信の中継が可能なルータノードと通信の中継が不可能なエンドデバイスが存在する。フルメッシュネットワークのネットワーク構成として、全てのノードが中継局として振る舞うことが挙げられる。そのため、スリープ等が可能なエンドデバイスと比較し、通信ノード単体の消費電力量が増加する。

屋外で運用される可搬型センサネットワークシステムでは、外部電源の確保ができない場合がほとんどであり、太陽電池で充電を行いながら運用するケースが多い。我々は、MPPT 式の充電装置と小型で発電量の多い太陽電池を採用することで消費電力の増加に対応している。回路の妥当性についてはリニアテクノロジー

社の提供する回路シミュレータである、LTSpice[95]を用いてシミュレーションを行い、回路の妥当性について確認した。LTSpiceによるシミュレーション結果を図7.5に示し、実際の回路図を図7.6に示す。

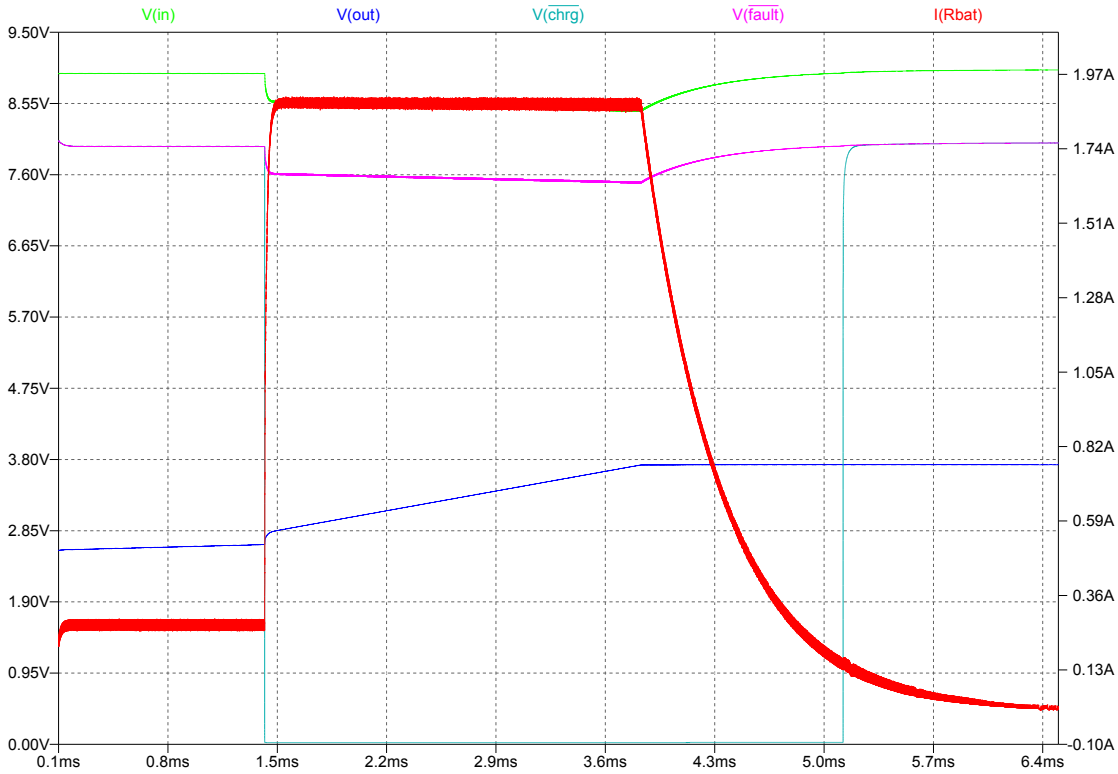


図 7.5: 充電回路のシミュレーション結果

また、外部センサに必要な電源供給回路についても、電力変化に対する追従性は低いものの、低消費電力の変圧回路を採用することで、回路全体の消費電力量を削減した。各モジュール及び、全体の消費電力量を表 7.2 に示す。

WSNにおいて一般的に使用されている ZigBee Pro シリーズ [110] の平均消費電力量が 50mA であり、中継ノードとして連続稼働時の最大消費電力 [111] が 250mA であるため、ノード全体として Xbee 単体での最大消費電力量の約半分である 136mA の低消費電力を実現した。

さらに、太陽電池の発電量、蓄電池への充電量を把握する電流・電圧センサを

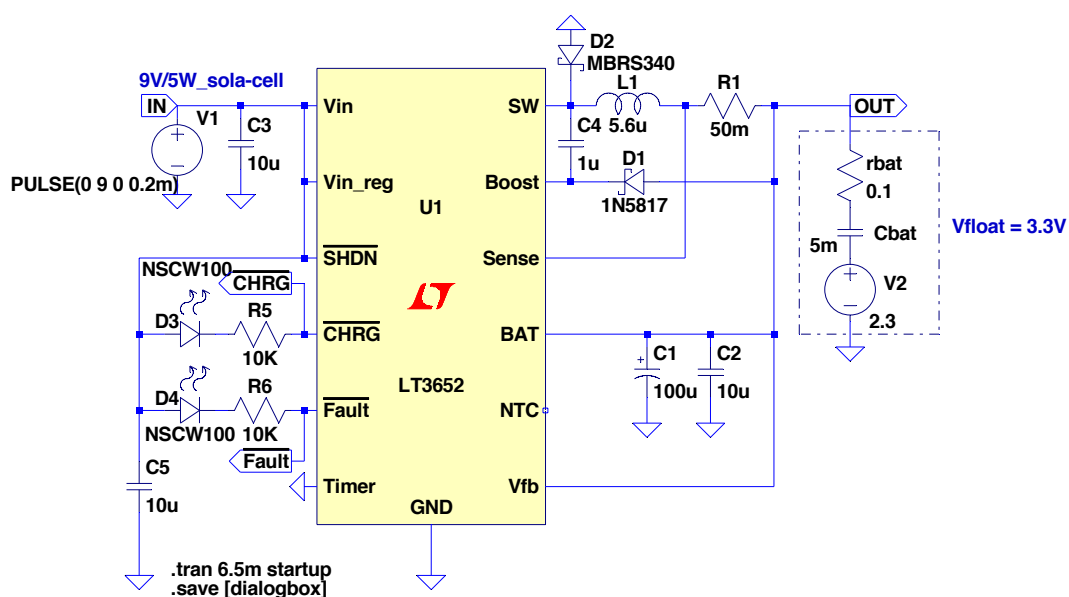


図 7.6: 実装した回路基板の回路

表 7.2: 消費電力量のまとめ

モジュール	消費電力
通信モジュール	30mA
電源供給回路	16mA
GPS モジュール	50mA
電流・電圧センサ	20mA
水位センサ	20mA
合計	136mA

搭載することで、発電の異常や、蓄電池の状態を監視することで、バッテリー寿命や太陽電池汚損による充電不可状態といった、異常状態を監視することでメンテナンスが可能なアーキテクチャを採用している。

センサ管理画面を図??に示し、ハードウェアアーキテクチャを図 7.8 に示す。

また、運用面の課題においては農業用に運用されているシステムの知見 [102][108]

新規センサ追加 / 管理

ノードID
 ノード種別 水位計測+データ中継 データ中継のみ
 親測所名
 設置高(m)
 地盤沈降量
 しきい値
 河川名
 備考
 TPオフセット(m)
 ノード経度
 ノード緯度
 センサー経度
 センサー緯度
 排水ブロックID

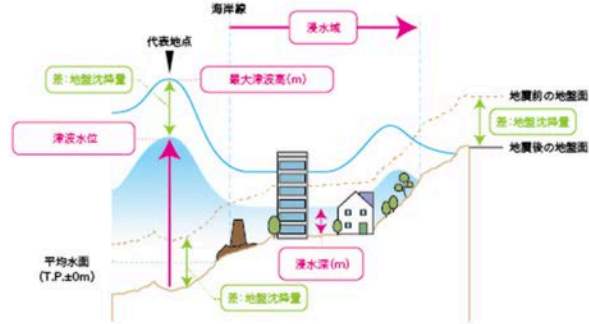


図 7.7: webUI による計測・中継ノード切替

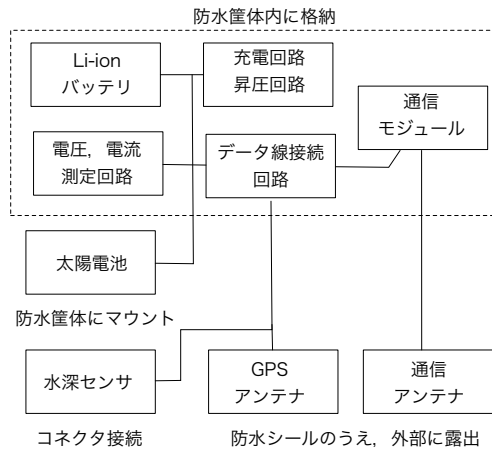


図 7.8: ハードウェア・アーキテクチャ

を活用し、回路についてはモジュラー構造とすることで万一のセンサ故障時にも、モジュール交換のみで容易に復旧可能な構造としている。実際に実装した回路基板の構成を図7.9に示す。通信ノードの取付に関しては運用者との調整により、単

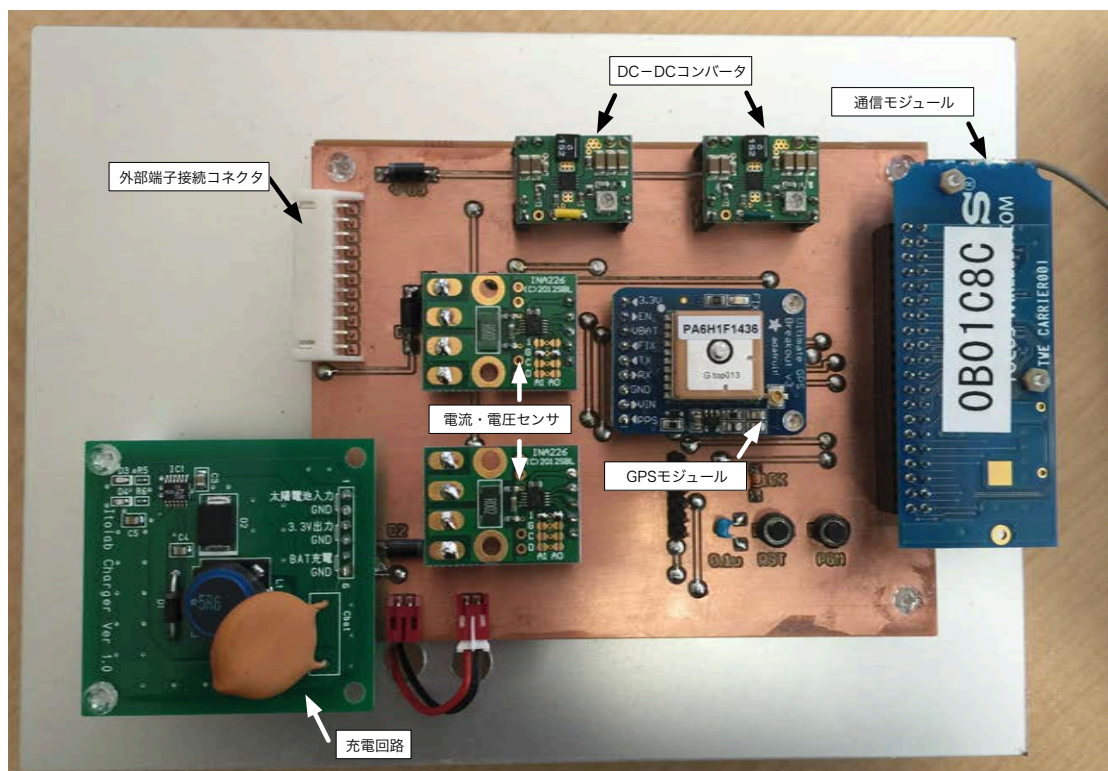


図7.9: 実装した回路基板

管用クランプを用いて地上に設置された三脚等に固定することで容易に着脱容易な構造としている。また、長期運用の場合に必要な太陽電池に関しても、運搬容易化のためヒンジ構造とすることで、必要に応じた運用の効率化を図っている。通信ノード外観を図7.10に示す。以上のように、実際の運用面の視点に立って設計及び実装を行うことにより、運用者にとって使用しやすいシステムをハードウェアとソフトウェア両面において、実装した。



図 7.10: 通信ノード外観と特徴

7.5 実フィールドによる運用実験結果

本節では、2015年2月12日に静岡県三島市にて行った運用実験の結果について示す。本実験フィールドは、狩野川の支線と本線が合流する位置に存在しており、過去10年間のあいだに3回の浸水を経験しており、三島市の提供するハザードマップ[109]でも浸水多発地点として指定されている地域である。本実験は、主発注者である国土交通省 中部地方整備局の立会いのもと行われた。実験フィールドにおける機器配置およびテスト項目について図7.11に示す。

実験は、内水被害発生を想定し、実際の河川を用いて可搬式アドホック水位計の設置と投げ込み式水深センサによる実水位の観測を行った。本実験において以下の性能を満たしているかを確認した。

- 現地到着後、即座に運用が可能であるかの確認。
- 一部の通信経路が不通となった場合のアドホックネットワークによる冗長性の確認。

<検証時の回線構成>

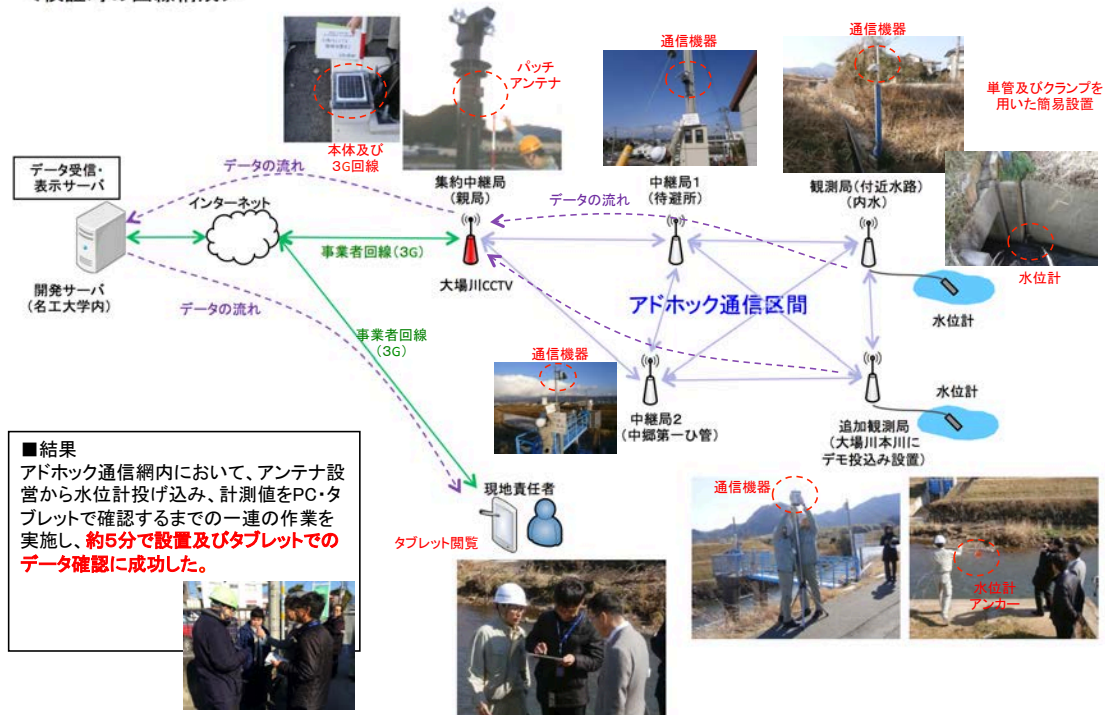


図 7.11: 実フィールドによる評価実験概要

- webUI によるタブレット閲覧の容易さ。

以上の項目を確認するとともに、実際の河川流域にて実験を行った。可搬式アドホック水位計は以下の手順にて取り付けられる。

Step1 通信ノードを単管クランプにより、三脚等に固定する

Step2 河川及び、用水路等の内水被害箇所へアンカー（錨）を投げ込む

Step3 アンカーに装着されたパイロットワイヤにより水深センサを水中へ投入する

Step4 水深センサを通信ノードに接続する

上記手順により、任意の場所の水位計測が可能である。実際の設置風景及び手順を図 7.12 に示す。現地にはポンプ車搭載を前提とした 3G 通信回線網に接続された

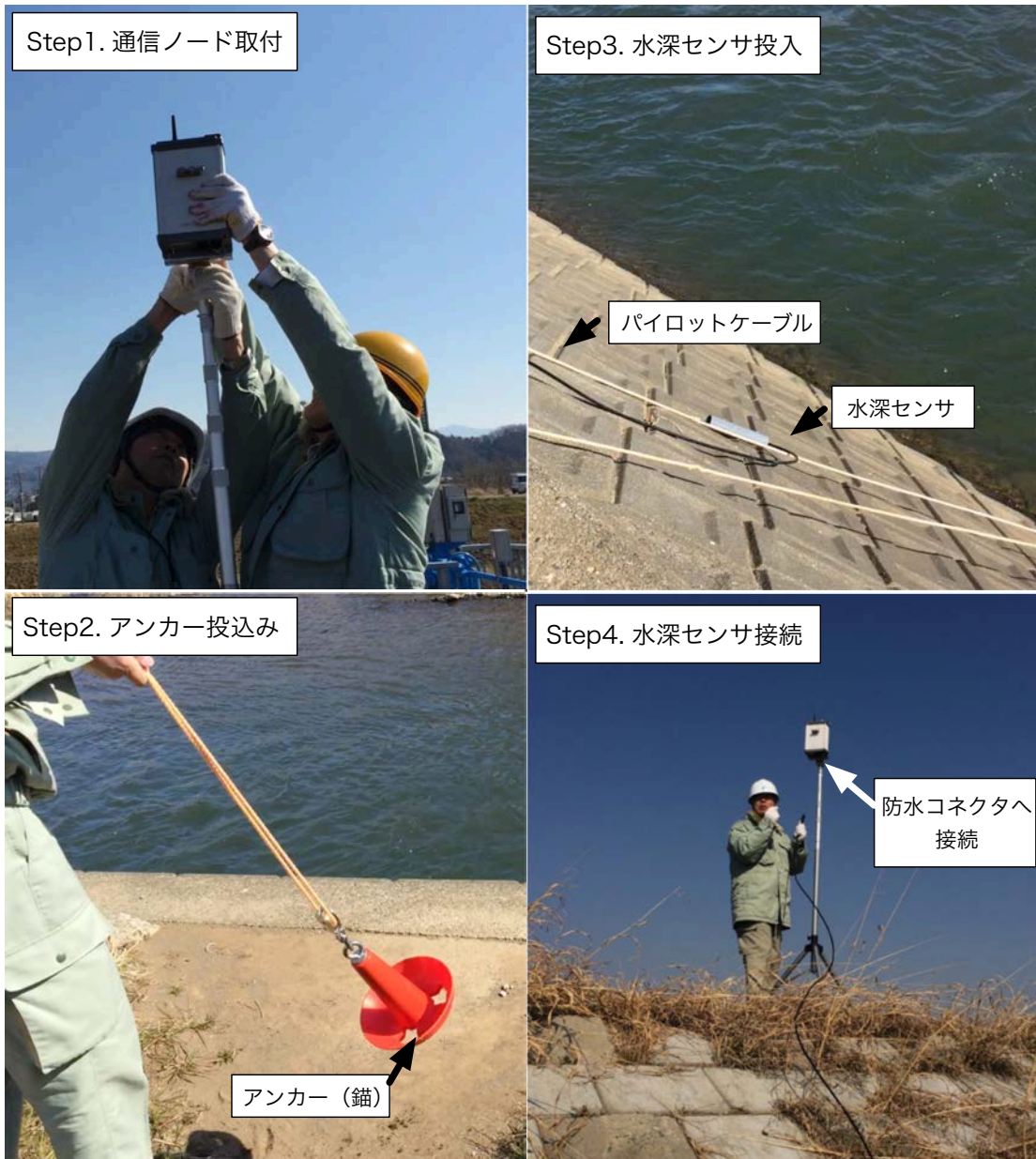


図 7.12: 実際の設置手順

親機を設置し、webサーバにデータを送信している。送信されたデータはサーバー上で処理され、可視化を行うことで計測ノードの位置及び、水位情報を可視化している。サーバソフトウェアによって可視化されたデータはタブレット端末などを

用いて閲覧することができ、リアルタイムに内水被害の状況を確認することができ、ポンプ車の効率的な運用が可能となる。実際の運用実験で得られたデータ表示例を図7.13に示す。計測のサンプリングは30秒ごとに1回としている。本実験

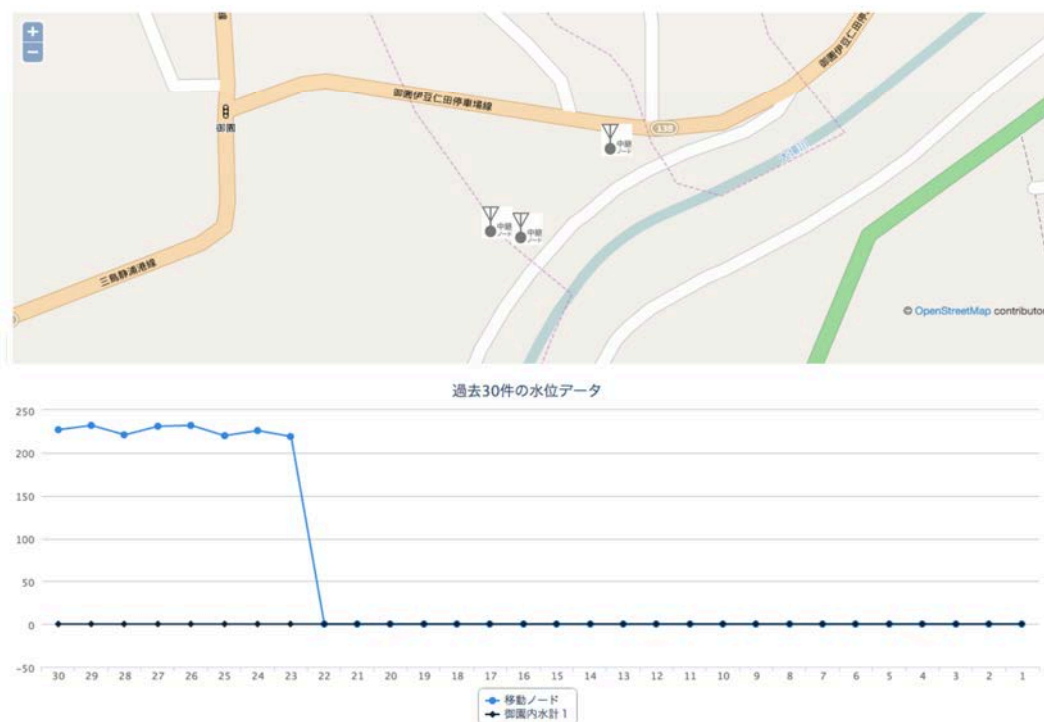


図7.13: webUIによるデータ表示の例

結果により以下の性能を確認した。

- [1] 機材積み下ろし後、5分で水位の測定が可能。
- [2] 一部通信経路を意図的に遮断した場合も、30秒（1回のサンプリング周期）以内に他経路へ通信迂回可能。
- [3] webUIについて、多くの参加者が説明不要で実データを閲覧可能であった。

上記に示すように、本システムの運用実験の結果、発注者である国土交通省様より、本研究により開発された、災害現場で運用可能な内水被害把握のための可搬式アドホック水位計は有用であるとの評価を頂いた。さらに、現場での作業を通

じて、三脚へのねじ止め部を手で締められるよう蝶ネジに変更が必要であったり、理論上通信可能な箇所において通信不能となるなど、実際に現場で運用しなければ出てこなかったであろう課題についても抽出することができた。特に市街地での電波伝搬については、見通しという概念で通信可否を判断することが多いが、建築物の外壁の種類による電波反射の影響など、通信可否を判断するパラメータが多く存在することも分かった。現在、システムの継続的な運用試験を行っており、2015年3月より固定された状態ではあるが、静岡県三島市御園地区にて、本研究で開発したノードを用いて、継続的に水位データを測定し続けている。継続試験の結果により、ハードウェアとソフトウェアの長期動作における信頼性について引き続き検証を行っている。

7.6 結言

本論文では、災害時に運用される可搬式アドホック水位計の課題を抽出するとともに、課題を克服し実装することで実運用可能な可搬式センサネットワークシステムを開発した。特に、可搬式のワイヤレスセンサネットワークでは、通信ノード移動による周囲の環境要因によって通信信頼性が大きく左右される。そのため、固定式のワイヤレスセンサネットワークとは異なり、移動により変化する周辺の電波状況や建築物、植物などの影響をはじめとした多くの相違点が存在した。さらに、実際の災害現場にて運用される可搬式アドホック簡易水位計システムに必要な機能と課題を整理するとともに、可搬式ワイヤレスセンサネットワークの実装を行った。その結果、5分で設置が完了し、災害時に迅速に水位計測が可能なシステムを構築することができた。また、アドホックネットワークの冗長性についても確認し、本システムの有用性を示すことができた。本提案手法により、屋外において移動するWSNシステムの課題の抽出を行うとともに、フルメッシュネットワークの再接続高速化手法の有効性を示した。

今後は、実フィールドにおいて現在継続して水位データを取得していることから、長期運用時の課題の整理や、通信ノードの小型化を予定している。2015年度

以降には、実際のポンプ車とのシステム連携や、多くの実フィールドでの試験を行うことになっており、より使いやすいシステムに仕上げていく。また、無線通信規格は日進月歩であり、より高性能な通信モジュールも登場してきている。そのため、異なる通信モジュールへの変更や、ソフトウェア及びハードウェア制御による消費電力の削減を目指すことで、災害時に運用されるセンサネットワークを容易に実現できるよう、研究開発を継続して行っていく。

第8章 サービス指向 WSN のための ミドルウェアとアーキテク チャ

8.1 序言

近年, Wireless Sensor Networks (WSNs) を活用した技術として, センサストリームだけではなく, 現実空間に存在する”モノ”をネットワーク化する技術である, Internet of Things (IoT) の研究が広く進められている. しかし, 多くの WSN や IoT 製品や研究においてはサービス指向, すなわち, ユーザーの必要とする目的に応じて容易にセンサの追加や削除を行うことが困難である. 特に, 目的に応じてセンサの追加や変更を行う場合, ハードウェアの変更やソフトウェアの書き換えが必要であり, 汎用性が確保されていることが少ない.

サービス指向 WSN においては, 役務としてのサービスを担うソフトウェアだけではなく, 環境に応じてサービスを実現するためのハードウェア技術についても必要となる. しかし, ハードウェアを目的に合わせて設計する場合, 多くの研究と同じく, 専用設計となりがちである. そのため我々は, サービス指向 WSN の実現のために, ミドルウェアによりハードウェアを制御する手法を提案している [13]. つまり, サービス指向 WSN の実現には, ソフトウェアとハードウェアの双方について理解した上で境界領域である分野を統合して研究する必要がある. IoT のアプリケーションとして注目されているスマートホームやスマートシティにおいては, 住人や市民それぞれに最適なサービスを提供することを目的としている. そのため, ユーザに必要な情報や環境を提供するアプリケーション層の研究対象と

して, Things-Oriented(TO)[112][113], Service-Oriented-Things(SoT)[114] といった, IoT 技術をベースとした研究が進められている. しかし, 多くの研究が室内空間などの電源供給可能な場所に設置されることを前提としており, 使用するセンサ類の変更を前提とした設計のものは少ない. 我々は, 屋外向け WSN システムの実装を行っており, 屋外に設置された気圧センサを用いて竜巻を早期に検知する研究 [116], やアドホック簡易水位計の実装を行っている [117][118]. 本章では屋外において目的に応じて再構成可能なサービス指向 WSN を構築するためのシステムについて提案する.

本論文の構成を示す, まず, 8.2 節で SoT を目指した IoT システムの課題について述べる. そして, 8.3 節においてハードウェアにおける課題と実装方法について述べる. つぎに, 8.4 節においてソフトウェアにおける課題と実装方法について述べる. そして, 8.5 節において提案するミドルウェアによるセンサリソースの配分について述べる. そして最後に, 8.6 節で本稿のまとめと今後の課題を示す.

8.2 屋外サービス指向 WSN を実現するための課題

屋外における WSN サービスの例として防災・減災や畜産, 及び農業分野が挙げられる. 特に防災・減災分野では先行研究 [117][118] で課題として挙げられている通り, 災害地域での運用は, 高い信頼性が求められる. 特に屋外で運用される WSN においては外部電源の供給が困難であることから, 太陽電池をはじめとした環境発電を用いて自律的に稼働することが求められる. しかし, 太陽光発電は太陽光パネルの汚れや, 天候の影響により発電量が安定せず, 通信ノード停止が頻発するという問題がある. また, 農業や畜産分野においては, 収穫時期や畜産動物の状況によって, 必要とするセンサが異なる. しかし, 必要とするセンサが高価な場合もあり, 全てのノードに対して必要とするセンサ全てを接続しておくことは現実的ではない. また, センサ毎に異なる電圧供給が必要であり, またアナログやデジタルといった接続方法の違いが存在するため, 異なるセンサを接続するためには電源供給回路の設計変更, センサ毎の通信プログラムの変更が必要と

なる。

そのため我々は、サービス指向 WSN における、以下課題を解決するためのシステムについて提案する。

- ノードの状態によるセンサ電源供給の制御，サンプリング間隔の変更が容易なシステム
- 必要とするセンサに応じた回路変更，プログラム変更を必要としないシステム
- 高価なセンサ資源を共有可能なシステム

以上の課題を解決することにより，目的に応じて再構成が容易なサービス指向 WSN システムについての課題を示すとともに，実装手法について提案する。我々は，ハードウェアとソフトウェア双方に関して研究を行っており，実フィールドにおいても多くの実験を行っている。そのため，従来の WSN 研究とは本質的に異なり，ユーザーの必要とするサービスを提供可能なサービス指向 WSN をハードウェア，ソフトウェア双方について統合した研究として実装している点が最も困難な課題であるとも言える。特に，実装後に発生する用途変更に対しては回路基板そのものの設計変更，及びソフトウェアの変更が必要である。我々はそれらの問題を通信モジュールに接続された外部 MPU にミドルウェアを内蔵することで実現する。図 8.1 に，システムの概要を示す。

次節より，ハードウェア及びソフトウェア双方の観点より，課題と実装について示す。

8.3 ハードウェア実装の課題と実装

一般的に，WSN 機器の多くが計算量，電力量ともに制約が多い。特に，環境発電により自律稼働を要求されることが多い WSN において重要視されているのが，自律稼働を実現するための電源管理と通信信頼性の確保である。電源管理においては WSN の電源消費を削減することが最も重要とされており [6]，ハードウェア

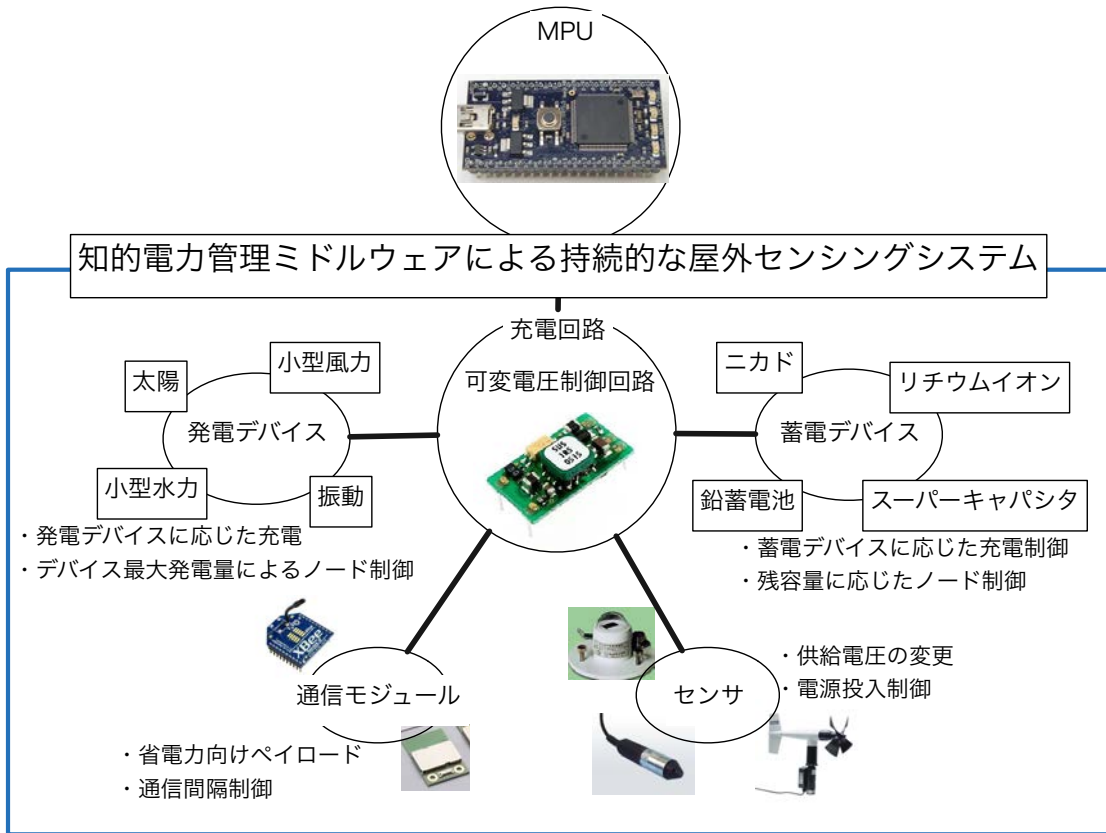


図8.1: システム概要

側で消費電力を削減するアプローチや、ソフトウェア側で消費電力を削減するアプローチが広く研究されている。

しかし、多くの製品や研究において、専用設計のプロセッサや専用の発電デバイスを用いており、汎用的に使用することができない。現実的な問題としては、環境発電デバイスや蓄電デバイスは多く存在するが、それぞれの発電デバイス、蓄電デバイスによって充放電制御を変更する必要があるが、そのようなデバイスの研究は行われていないのが現状である。

サービス指向 WSN の実現のためには、ユーザーが求めるサービスに応じた発電デバイス、蓄電デバイスの使用が前提である。そのため我々はミドルウェアによりハードウェアを制御することで、ユーザーの求める環境に適応可能なサービス

指向 WSN を実装する

そこで我々は、発電デバイスや蓄電デバイスへの供給電圧・電流を最適化するべく、ミドルウェアによりハードウェアを制御することが可能なアーキテクチャについて提案する。図 8.2 に、ハードウェアアーキテクチャを示す。本アーキテク

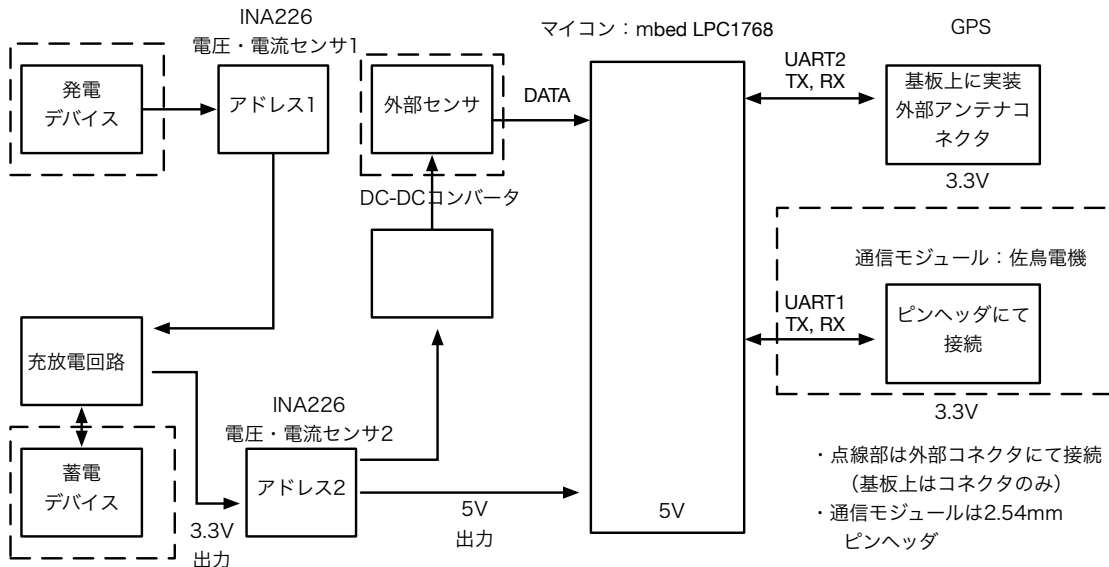


図 8.2: ハードウェアアーキテクチャ

チャは、著者がいままで行ってきた研究の知見を集約した結果である。以下に既存のアーキテクチャに対する優位点を示す。

- センサに応じた供給電圧制御が可能な電源回路
- 蓄電デバイスの残容量に応じてサンプリングレートの変更が可能なシステム
- 通信モジュールを容易に変更可能な回路
- 外部制御可能な充放電回路

以上の特徴により、ユーザの求めるサービスに対応可能なサービス指向 WSN の実現が可能である。

8.4 ソフトウェア実装の課題と実装

ハードウェアによるサービス指向 WSN の実装については 8.4 節にて述べた。本節では、ハードウェアと統合され動作する、サービス指向 WSN におけるソフトウェア実装の課題について述べる。サービス指向 WSN の実現のために、最も必要である機能はセンサの接続容易化である。すなわち、既存の研究や製品ではセンサに対して最適化されたシステムであるのに対し、ハードウェア及びソフトウェアにより、センサに合わせた動作を行うことがもとめられる。つまり、センサに合わせて設計や実装が行われるのではなく、用途に合わせたセンサに合わせてハードウェアとソフトウェアが制御され、種々のセンサの情報を容易に取得できるようにすることが重要である。外部制御が可能なハードウェアのアーキテクチャについては前節で述べた。本節では、特にセンサ毎に異なる電圧や通信をどのようにソフトウェアにより処理するかを述べる。

まずはじめに、ミドルウェアによるセンサの接続フローについて示す。図 8.3 に、センサ接続の概要を示す。

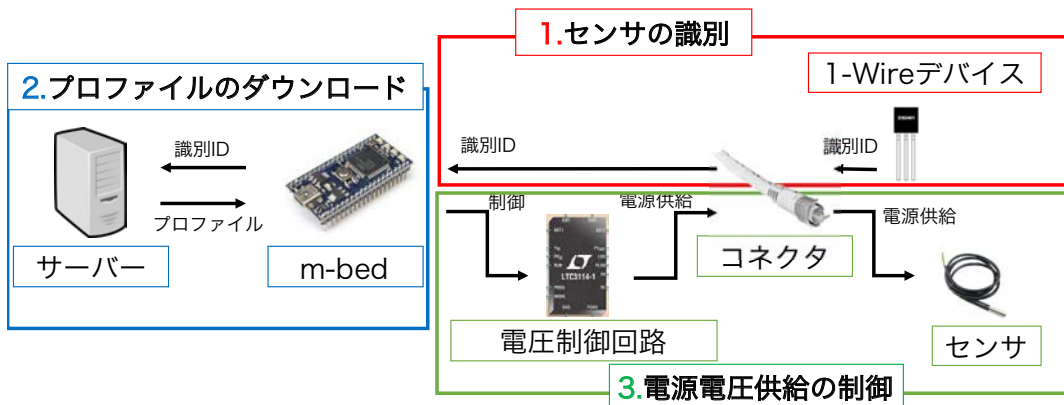


図 8.3: センサ接続時の動作概要

システムに接続されたセンサは、1-wire[119]等の識別チップが搭載されたコネクタによりセンサの種別を識別する。次に、システムはサーバからセンサIDに応じたセンサのプロファイルを取得する。プロファイルに含まれる情報は以下の通

りである。

- センサの名称
- センサの定格電圧
- センサの接続種別（ADC, I2C, SPI など）
- センサデータからの変換方法（データカラム位置, 値への変換式など）
- センサデータの単位（緯度経度, 温度, 湿度など）

サーバから取得したセンサプロファイルにより, ミドルウェアは電源の制御を行い, センサデータの取得を開始する。本手法を用いることにより, センサに応じた電源供給とインターフェースの変更が容易に可能となるため, 汎用製品として販売されているセンサの多くを接続することができる。プロファイルに関しては, オープン化することで多くのユーザが自由に編集可能とすることで, 数多くのセンサが利用可能になると考える。

8.5 ミドルウェアによるセンサリソースの配分

8.5.1 ノードの状態によるセンサリソースの制御

本項では, ノードの状態に応じたセンサリソースの制御を行う方法について示す。環境光発電においては, 充電電圧が安定せず, センサへの電源供給が困難になる事例が存在する。我々の提案するミドルウェアにおいては, ノードの充電電圧・電流及びバッテリー電圧の監視を行うことにより, 電源電圧が不安定になった際に周辺ノードに同一センサが存在する場合は代替が存在するセンサの電源供給を停止することで, 近隣ノードの保有しないセンサ情報のみを送信することで, センサリソースの配分を行う。また, リソース配分だけでは電源供給が不足する場合は, サンプルング間隔を変更することで, 継続的なセンシングを行う方法について提案する。図 8.4 に, センサリソース配分の概要を示す。各ノードは, 隣接す

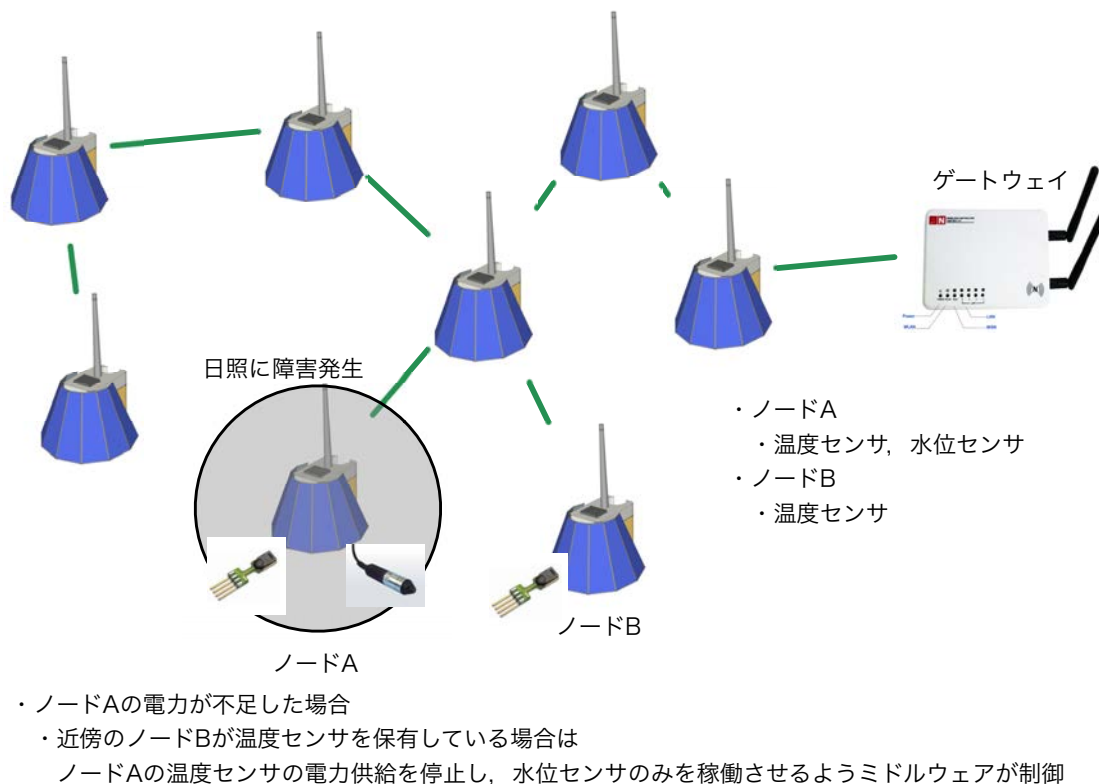


図 8.4: センサリソース配分の例

るノードの接続センサ情報と自身の電力情報を持つ。消費電力や残存電力量については、ノード毎に組み込まれた電流・電圧センサによって常時取得される。そのため、発電量と残存電力量に応じて、センサの動作順位を決定することで、近隣ノードが持たないセンサを優先して動作させることで、センサ資源を配分することが可能である。

8.5.2 分散処理によるセンサ資源の融通

WSN における異常検知は広く行われており、その中でもノード内に実装されたミドルウェア等を用いて、個々のノードが異常を検知可能な、自律分散システムが広く研究されてきている。異常検知には、異常と判断するためのセンサ情報が

必要である。しかし、センサの価格や電力消費といった問題から、全てのノードに異常検知に必要なセンサを接続するのは困難である。そのため、ネットワーク全体で高価なセンサを共有し、異常検知を行う必要がある。集中型のセンサシステムにおいては、各センサからの情報をネットワーク内の計算機に集約し、異常を判断する。マルチホップを用いたセンサシステムは、各ノード間の通信時間を考慮する必要がある。そのため、ノード単体で判断できない異常の場合、集中管理を行う計算機に問合せ、必要な情報を入手するまでの時間が必要となる。具体的な例として、水産養殖場の近隣において赤潮を検知するとする。赤潮の検知には、a. 水温、b. 水中酸素濃度（O₂センサ）が必要であるが、O₂センサは高価であることから、全てのノードに接続されることは考えにくい。そのため、同一ネットワークにおいて、O₂センサが接続されているノードの情報を要求し、異常か正常かを判断することとなる。よって、判断を行うノードが近隣のO₂センサ保有ノードに対して、センサ値の取得を要求する必要がある。集中管理型のWSNの場合、管理を行っている計算機へ問い合わせるとともに、計算機はO₂センサを保有するノードのセンサ値を判断を行うノードに対して送信を行う。そのため、ネットワークが大規模な場合マルチホップによる各ノード間の通信時間が必要である。

赤潮の判断フローを図8.5に示す。

我々は、各ノードに近隣ノードの情報を持たせることにより、必要とするセンサ資源を高速に融通可能な手法について提案する。提案手法は、各ノードに実装されたミドルウェアが以下の情報を基に、必要とするセンサをもつ近隣のノードに対してセンサ情報を要求する。

- 近隣4ホップ以内のノード情報
- 近隣4ホップ以内のノードに接続されたセンサ情報

上記2点の情報を用いることで、異常検知に必要なセンサを持つ最近傍のノードに問合せを行うことでノード単体での異常検知を高速化する。具体的な例を図8.6に示す。図8.6、左側が集中管理、右側が提案手法によるセンサ資源共有の例である。右側に示す提案手法においては、ノードDは自身の持つ近隣ノード情報を基

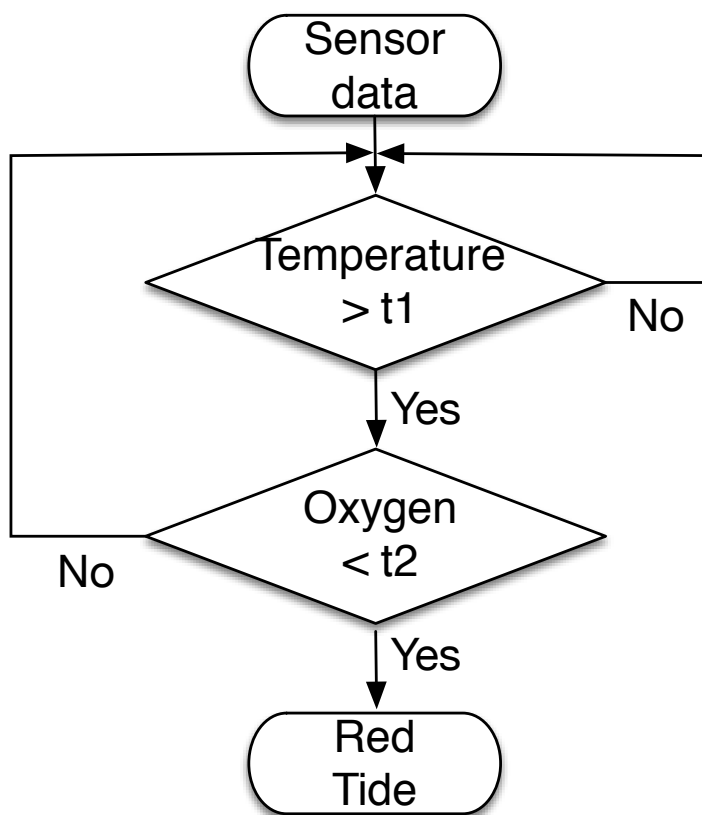


図 8.5: 赤潮の判断フロー

に直接ノード C へセンサ情報を要求することで、必要な情報を取得することが出来る。そのため、送受信に必要な理論値で計算した場合、ノード間の送受信に 5ms 必要な場合、図 8.6 に示すネットワークにおいてノード D がノード C の情報を得る場合、集中管理では 115ms 必要である。提案手法においては 15ms となるため、約 8 倍の高速化が実現できる。

以上に示すように、我々の提案するアプローチを用いることで、異常判断の速度を高速化出来る。

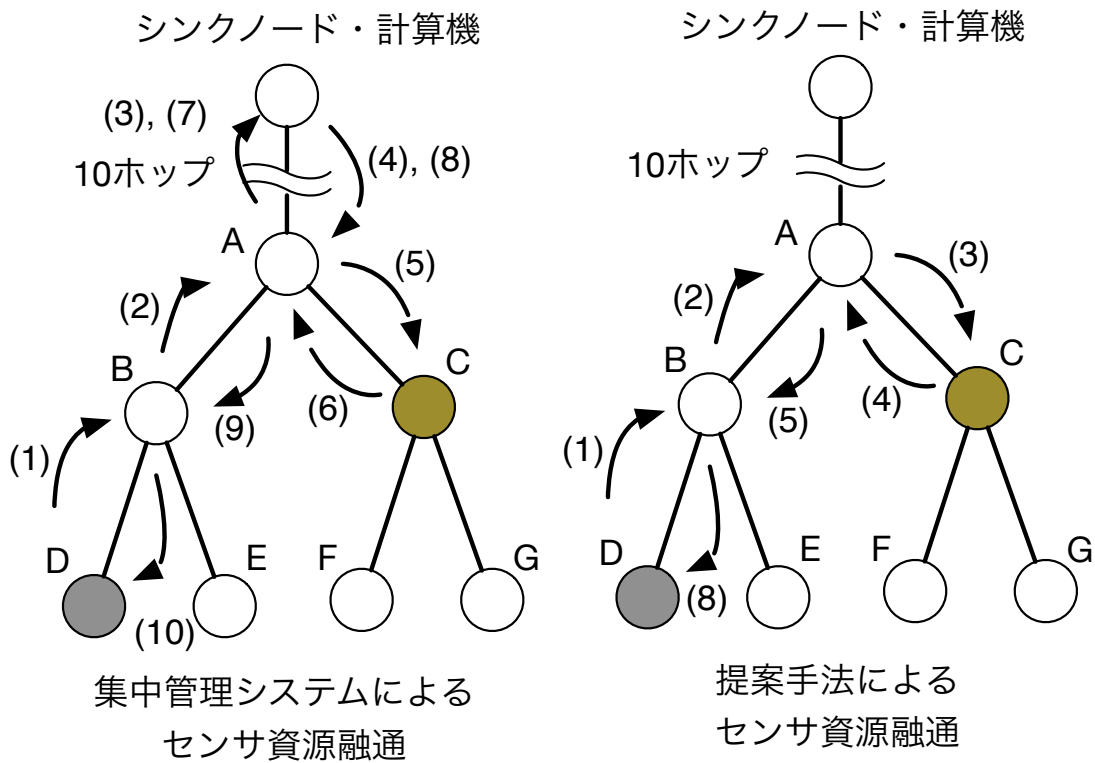


図 8.6: 集中管理と提案手法によるセンサ資源融通

8.5.3 評価実験

本節では、集中型システムによるセンサ資源融通手法と提案する分散システムによるセンサ資源融通手法を比較する。評価実験には我々の開発したシミュレータを用いた。以下に評価実験の設定を示す。

- センサ階層数：6
- シミュレーション回数：1000
- 1Hopに必要な時間：5ms
- 通信リトライ立：0.1%
- 総ノード数：63 nodes

シミュレーションに使用したネットワーク概要を図8.7に示す。図8.7の最下段のノードの赤丸が異常を判断すると想定している。異常判断に必要なセンサは黒丸で示されたノードが保有すると仮定している。

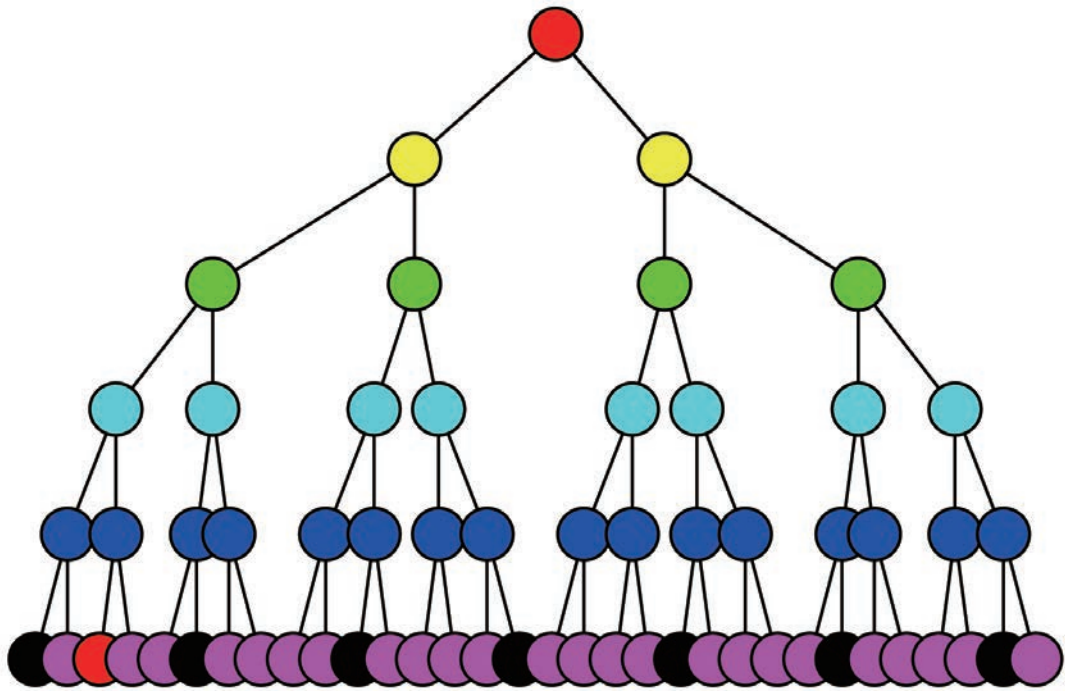


図8.7: テストネットワーク

8.5.4 実験結果

実験結果を表8.1に示す。

表8.1: 実験結果

実験結果	集中管処理	分散処理
シミュレーション 1000 回における平均時間	55.45 ms	22.14 ms

評価実験により、集中型と比較して2倍以上の速度向上を実現した。本実験では、総ノード数63程度のネットワークで実験を行った。しかし、より大きなネットワークを用いた場合にはさらなる速度差があると考えられる。

以上により、屋外WSNシステムの課題であるノードの状態に応じたセンサリソース配分を行うことで、継続的なセンシングを行うことが出来る。

8.6 結言

本論文では、サービス指向WSNを実現するためのシステムアーキテクチャについて、ハードウェアとソフトウェアの双方について示した。サービス指向WSNにおいては、ハードウェアとソフトウェアの融合が重要である。すなわち、ハードウェアだけが優れていてもソフトウェアとして完成していなければ使用に耐えないということである。本章で紹介した基礎技術を組み合わせるだけでなく、利用者の求めるサービスとして統合することが重要である。また、WSNにおいては、無線通信技術や異常検知、及び低消費電力などを代表とした多くの課題が存在するが、自律稼働を目的とするWSNは主に計算量と消費電力といったハードウェア上の制約が大きい。そのため、ソフトウェアだけではなく、ハードウェア自体をソフトウェアにより制御することを示すとともに、ソフトウェア制御に適したハードウェアアーキテクチャについても提案した。さらに、センサ資源の融通についてシミュレーション実験を行い、高価なセンサ資源をネットワーク内で共有することで、高速な異常検知が行えることを示した。本研究は既に屋外でのWSNに関するさまざまな知見 [116][117][118] の収集が完了しており、ミドルウェアについてもカリフォルニア大学アーバイン校の開発している WuKong[115] について共同研究を行っており、実装を進めている。今後は、電力低下時のセンサリソース配分や、1-wire によるセンサ識別の実際のシステムへの実装を行っていくとともに、最新動向を反映し、引き続き実フィールドにおける課題を抽出していく。

第9章 結論

本論文はユーザーの目的に応じて高度なサービスを提供可能な、サービス指向ワイヤレスセンサネットワークの理論と実装に関して、著者が行ってきた研究をまとめたものである。以下にその成果を要約し、最後に今後の課題を述べる。

第1章では、WSN分野におけるサービス指向WSNの必要性と意義を述べ、これまでのWSN分野の研究を概観し、その課題を示した。ついで、本論文の構成について述べた。

第2章では、WSN分野における関連研究について、ハードウェア及びソフトウェア双方の研究概要について示すとともに、サービス指向WSNにおける現在の問題点について述べた。

第3章では、プライバシーに配慮した異常検知を目指して、人感センサにおける異常検知手法を提案している。しかし、人感センサからのデータにおいてはノイズが多く含まれるため、ノイズの除去が大きな課題となる。そのため、ベイジアンネットワークを用いたノイズ除去手法について説明するとともに、SMOTEアルゴリズムによるノイズ除去精度の向上手法について提案した。特に、非接触のセンサについてはノイズデータが大きな問題であり、本手法によりノイズデータの除去が可能となるため、異常検知の精度の向上が可能となる。

第4章では、第3章で述べたノイズ除去に加え、独居高齢者のみまもりを目的とした、より実践的な異常検知手法について述べた。具体的には、住民の行動データを蓄積することで、住民行動のモデルを構築することで、正常・異常の判断が困難な分野における異常検知手法について提案した。我々は、人間の生活の中での異常な行動を検知することを目的とした研究を行っている。しかし、通常の間行動の中での異常を定義することは非常に難しい。

本結果により、生活習慣における時間誤差を利用したモデル化を行うことで、従来は困難であった日常の中での異常が定義可能であることを示した。

第5章では、環境情報における異常検知として、竜巻を代表とする異常気象の検知を高速に行うための手法について議論するとともに、シーケンシャルデータにおける異常検知手法について述べた。さらに、局地的な異常気象の予測を目的とした安価な環境情報収集システムを実装するとともに、実際の竜巻発生時の気圧変化を用いて観測地点の急激な気圧変化を判断できることを示した。更に、竜巻の初期発生時に異常を検知できることを示した。そのため、竜巻が遠い場合に安全な場所に避難すべきか、竜巻の近くにいるため屋内に留まるべきかを判断可能であり、人的被害の軽減にも役立つと考える。今後は、実際に観測ノードを設置しデータ収集を行うとともに、温湿度や風速センサ、及び気象庁の過去データの蓄積などのデータを総合し判断することで精度の良い異常検知及び予測システムを実装していく。

第6章では、屋外におけるWSNの通信特性において、実フィールドでの実験における知見を基にした通信距離の延長と通信品質の向上手法について述べた。屋外において使用されるWSNの多くは地上に設置され、通信距離の延長が大きな課題となっている。本章では、移動型WSNのために、高所指向性アンテナを活用することで、災害時に地上局の迅速な設置が可能であることを示した。本実験により、地上における指向性アンテナ同士の最大通信距離が6kmに対し、高所指向性アンテナにおける最大通信距離が9.3kmと、通信可能距離の大幅な延長を確認した。我々は、関連研究として無線通信の信頼性に焦点を当て、実フィールドにおいて、種々の環境要因ごとに、通信モジュール同士の電波品質を測定するパケットエラー率を測定することで、移動式のセンサネットワークに最適な設置パターンの提案を行い、設置場所の選定時間の短縮手法について提案している [80]。しかし、先行研究では、実験フィールドの規模が小さく、かつビルが乱立する地域で行ったため、通信モジュールの長距離通信性能を検証することが不可能であった。本研究では、災害時に運用される移動式WSNにおいて重視される長距離無線通信性能を検証するため、実フィールドにおいて、環境要因ごとに、通信モジュ-

ル同士の電波品質を測定するパケットエラー率と、通信強度の測定値である RSSI 値を測定した。よって、提案する、移動式 WSN における高所指向性アンテナを活用した通信距離延長方法は有効である。そのため、高所指向性アンテナを用いることで地上局の設置位置の制約が緩和され、設置における中継局の削減、及び設置検討時間の短縮が実現できる。

第7章では、第6章において述べた屋外 WSN の通信信頼性を確保するためのフルメッシュネットワークの実装手法について述べるとともに、実フィールド実験によって得られた知見から、大規模自律 WSN に必要な要件についてまとめた。本章では、災害時に運用される可搬式アドホック水位計の課題を抽出するとともに、課題を克服し実装することで実運用可能な可搬式センサネットワークシステムを開発した。特に、可搬式のワイアレスセンサネットワークでは、通信ノード移動による周囲の環境要因によって通信信頼性が大きく左右される。そのため、固定式のワイアレスセンサネットワークとは異なり、移動により変化する周辺の電波状況や建築物、植物などの影響をはじめとした多くの相違点が存在した。さらに、実際の災害現場にて運用される可搬式アドホック簡易水位計システムに必要な機能と課題を整理するとともに、可搬式ワイアレスセンサネットワークの実装を行った。その結果、5分で設置が完了し、災害時に迅速に水位計測が可能なシステムを構築することができた。また、アドホックネットワークの冗長性についても確認し、本システムの有用性を示すことができた。今後は、実フィールドにおいて現在継続して水位データを取得していることから、長期運用時の課題の整理や、通信ノードの小型化を予定している。

第8章では、第3章から第7章までに述べた知見により、サービス指向 WSN における、あるべき姿を具体的に示した。多くの WSN システムや IoT システムにおいては、開発段階に使用するセンサが決定され、ハードウェア及びソフトウェアの設計及び実装が行われる。そのため、実装後に発生する用途変更に対しては回路基板そのものの設計変更、及びソフトウェアの変更が必要である。我々はそれらの問題を通信モジュールに接続された外部 MPU にミドルウェアを内蔵することで実現することを提案した。

さてここから、今後の課題について述べる。課題の1つは、ハードウェアとソフトウェアの融合である。すなわち、ハードウェアだけが優れていてもソフトウェアとして完成していなければ使用に耐えないということである。特に、WSNにおいては、無線通信技術や異常検知、及び低消費電力などを代表とした多くの課題が存在するが、自律稼働を目的とするWSNは主に計算量と消費電力といったハードウェア上の制約が大きい。そのため、ソフトウェアだけではなく、ハードウェア自体をソフトウェアにより制御することが重要である。特に、第8章で述べたミドルウェアによるハードウェア制御を活用することで、より実用に則したサービス指向WSNが実現可能である。そのためにも、ハードウェアについて深く理解するとともに、最新の動向を常に調査する必要がある。特に、無線モジュールは多くの規格が提唱されつつあり、過渡期にある。そのため、長期的な視野をもち、最新技術を取り入れやすい構造を考慮した設計とすることが今後の課題である。

参考文献

- [1] Sensorpedia, <http://www.sensorpedia.com/>, 2015.12.8 閲覧
- [2] Xively, <http://xively.com/>, 2015.12.8 閲覧
- [3] Takanobu Otsuka, Tatsunosuke Tsuboi, Takayuki Ito, “Prototyping and evaluation of a wireless sensor network that aims easy installation”, THE 26TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL, ENGINEERING & OTHER APPLICATIONS OF APPLIED INTELLIGENT SYSTEMS, 2013
- [4] 松永賢一, et al. ”太陽電池駆動 5mm 角ワイヤレスセンサノードを実現するフィードバック型ソースフォロワを採用した間欠送信回路 (低電圧/低消費電力技術, 新デバイス・回路とその応用).” 電子情報通信学会技術研究報告. ICD, 集積回路 113.173, pp.117-122, 2013
- [5] 並木勁汰, and 福田浩章. ”WSN におけるプログラム位置管理機構の提案と実装.” 情報処理学会研究報告. EMB, 組込みシステム, pp.1-8, 2013
- [6] Seah, Winston KG, Zhi Ang Eu, and Hwee-Pink Tan. ”Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP)-Survey and challenges.” Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, IEEE, 2009
- [7] Hergenrder, Anton, and Jens Horneber. ”Facing challenges in evaluation of WSN energy efficiency with distributed energy measurements.” Wireless

- Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International. IEEE, 2011
- [8] 三宮秀次, et al. "超低消費電力化データ駆動ネットワークングプロセッサ ULP-CUE の試作とその評価." 情報処理学会論文誌. コンピューティングシステム, Vol.6, Issue 1, pp.78-86, 2013
- [9] Zhao, Bo, et al. "Wireless sensor network reliability modelling based on masked data." International Journal of Sensor Networks, Vol.17, Issue 4, pp.217-223, 2015
- [10] Lian-ya, H. U., et al. "Reliability Research for Wireless Sensor Networks: A Survey." Computer Science, Vol.1, 2014
- [11] 山下浩一郎. "環境系センサーネットワークシミュレータの実装と評価." 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌), Vol.135, Issue 10, pp.387-392, 2015
- [12] Takanobu Otsuka, Yoshitaka Torii, Takayuki Ito, "Autonomous Full-Mesh Network for Large-scale Outdoor Sensing" the 8th IEEE International Conference on Service Oriented Computing & Applications (SOCA2015) ,Rome, Italy, 19-21 October 2015
- [13] Takanobu Otsuka, Yoshitaka Torii, Takayuki Ito, "A Innovative Outdoor IoT System Architecture for Service Oriented Things", In the Proceedings of the Tenth International Conference on Knowledge, Information and Creativity Support Systems, Phuket, Thailand, November 12-14, 2015
- [14] 山内雪路, "デジタル移動通信方式". 東京電機大学出版局, 2000
- [15] Barrenetxea, Guillermo, et al. "The hitchhiker's guide to successful wireless sensor network deployments." Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems. ACM, 2008

-
- [16] Betz, Vaughn, and Jonathan Rose. "VPR: A new packing, placement and routing tool for FPGA research." *Field-Programmable Logic and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 1997
- [17] Benini, Luca, and Giovanni De Micheli. "Networks on chips: a new SoC paradigm." *Computer*, Vol.35, Issue 1, pp.70-78, 2002
- [18] Jun-young Kwak, Pradeep Varakantham, Rajiv Maheswaran, Milind Tambe, Farrokh Jazizadeh, Geoffrey Kavulya, Laura Klein, Burcin Becerik-Gerber, Timothy Hayes, Wendy Wood, "SAVES: A Sustainable Multiagent Application to Conserve Building Energy Considering Occupants", 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2012), 2012
- [19] Sunil Mamidi, Yu-Han Chang, Rajiv Maheswaran, "Improving Building Energy Efficiency with a Network of Sensing, Learning and Prediction Agents", 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2012), 2012
- [20] Sebastian Stein, Simon A. Williamson, Nicholas R. Jennings, "Decentralised Channel Allocation and Information Sharing for Teams of Cooperative Agents", 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2012), 2012
- [21] Nithin Mathews, Alessandro Stranieri, Alexander Scheidler, Marco Dorigo, "Supervised Morphogenesis - Morphology Control of Ground-based Self-Assembling Robots by Aerial Robots", 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2012), 2012
- [22] Kian Hsiang Lowy, Jie Cheny, John M. Dolanx, Steve Chienz, and David R. Thompsonz, "Decentralized Active Robotic Exploration and Mapping for Probabilistic Field Classification in Environmental Sensing",

- 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2012), 2012
- [23] Ondrej Vaneky, Zhengyu Yin, Manish Jain, Branislav Bosanskyy, Milind Tambe, Michal Pechoucek "Game-theoretic Resource Allocation for Malicious Packet Detection in Computer Networks", 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2012), 2012
- [24] Viliam Lisy, Roie Zivan, Katia Sycara and Michal Pechoucek, "Deception in Networks of Mobile Sensing Agents", 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2010), 2010
- [25] Ruben Stranders, Alex Rogers and Nicholas R. Jennings, "A Decentralised Coordination Algorithm for Minimising Conflict and Maximising Coverage in Sensor Networks", 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2010), 2010
- [26] Brian Hrolenok, Sean Luke, Keith Sullivan, and Christopher Vo, "Collaborative Foraging using Beacons", 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2010), 2010
- [27] Thao P. Le, Timothy J. Norman, Wamberto Vasconcelos, "Adaptive Negotiation In Managing Wireless Sensor Networks", 13th International Conference, PRIMA 2010, 2010
- [28] Bo An, Victor Lesser, David Westbrook, Michael Zink, "Agent-mediated Multi-step Optimization for Resource Allocation in Distributed Sensor Networks", 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2011), 2011
- [29] Kian Hsiang Low, John M. Dolan and Pradeep Khosla, "Active Markov Information-Theoretic Path Planning for Robotic Environmental Sensing",

-
- 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2011), 2011
- [30] Nisarg Vyas, Jonathan Farrington, David Andre and John (Ivo) Stivoric, "Machine Learning and Sensor Fusion for Estimating Continuous Energy Expenditure", Twenty-Third Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference(AAAI2011), 2011
- [31] Mitja Lustrek, Hristijan Gjoreski, Simon Kozina, Bozidara Cvetkovi, Violeta Mirchevska, Matjaz Gams, "Detecting Falls with Location Sensors and Accelerometers", Twenty-Third Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference(AAAI2011), 2011
- [32] Pooyan Fazli, Alireza Davoodi, Philippe Pasquier and Alan K. Mackworth, "Multi-Robot Area Coverage with Limited Visibility", 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2010), 2010
- [33] Mihail Mihaylov, Yann-Ael Le Borgne, Karl Tuyls, "Distributed Cooperation in Wireless Sensor Networks", 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2011), 2011
- [34] Frederick Ducatelle, Gianni A. Di Caro, Luca M. Gambardella, "Spatial awareness in robotic swarms through local wireless communications", 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2012), 2012
- [35] Nest Corp, "Nest" The Learning Thermostat, <http://www.nest.com/>, 2015.12.8 閱覽
- [36] iRobot Corp., "Roomba", <http://www.irobot.com/us/>, 2015.12.8 閱覽

-
- [37] Varun Chandola, Arindam Banerjee, and Vipin Kumar, "Anomaly Detection: A Survey," Technical Report, Department of Computer Science and Engineering University of Minnesota, TR- 07-017, 2007
- [38] Spence, C., Parra, L., and Sajda, P. "Detection, synthesis and compression in mammo- graphic image analysis with a hierarchical image probability model", In Proceedings of the IEEE Workshop on Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis. IEEE Computer Society, 2001
- [39] Fujimaki, R., Yairi, T., and Machida, K. ,"An approach to spacecraft anomaly detection problem using kernel feature space", In Proceeding of the eleventh ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery in data mining. ACM Press, 2005
- [40] Janakiram, D., Reddy, V., and Kumar, A, "Outlier detection in wireless sensor networks using bayesian belief networks", In First International Conference on Communication System Software and Middleware, 2006
- [41] Du. W Fang, L., and Peng, N, "Lad: localization anomaly detection for wireless sensor networks", *Parallel Distributed. Computer*, Vol. 66, Issue 7, 2006
- [42] Chatzigiannakis, V., Papavassiliou, S., Grammatikou, M., and Maglaris, B, "Hierarchical anomaly detection in distributed large-scale sensor networks", In ISCC ' 06: Proceedings of the 11th IEEE Symposium on Computers and Communications. IEEE Computer Society, 2006
- [43] Nitesh V. Chawla, Kevin W. Bowyer, Lawrence O. Hall ,W. Philip Kegelmeyer , "SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique", *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2002

-
- [44] Rehan Akbani, Stephen Kwek, and Nathalie Japkowicz, "Applying Support Vector Machines to Imbalanced Datasets," Lecture Notes in Computer Science Volume 3201, pp. 39-50, 2004.
- [45] 大塚 孝信, 坪井 辰之助, 吉村 卓也, 伊藤 孝行, "設置が容易なワイヤレスセンサネットワークの試作と評価", JAWS2012 予稿集, 2012
- [46] Vladimir N. Vapnik "A Training Algorithm for Optimal Margin Classifiers" 5th COLT, pp.144-152, 1992
- [47] A Practical Guide to Support Vector Classification,
<http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/guide/guide.pdf>, 2015.12.8 閲覧
- [48] 象印マホービン株式会社, "みまもりホットライン",
<http://www.mimamori.net/>, 2015.3.1 閲覧
- [49] 青木 茂樹, 大西 正輝, 小島 篤博, 福永 邦雄, "独居高齢者の行動パターンに注目した非日常状態の検出", 電気学会論文誌 (E), vol.125-E, no.6, pp.259-265, 2005
- [50] 松岡 克典, "住宅内行動の長期蓄積に基づく異常検知手法の検討", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.102, 2003
- [51] 矢崎 俊志, 松永 俊雄, 月江 伸弘, "RFID と生体センシング技術を利用した高齢者向け快適生活支援システム", 電気学会研究会資料. IIS, 産業システム情報化研究会, 2009
- [52] 田中 仁, 中内 靖, "ユビキタスセンサによる独居高齢者見守りシステム", 日本機械学会論文誌, No.75-760, 2009
- [53] 関 弘和, 堀 洋一, "高齢者モニタリングのためのカメラ画像を用いた異常動作検出", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol.122, 2000

- [54] セコム株式会社. “セコム・ホームセキュリティシステム”,
<http://www.secom.co.jp/homesecurity/plan/kodate/>, 2015.12.8 閲覧
- [55] ALSOK 総合警備保障株式会社. “ホームセキュリティシステム”,
http://www.alsok.co.jp/person/hs_price.html, 2015.12.8 閲覧
- [56] Intel-GE Care Innovations, “Quiet Care”,
<http://www.seniorlifestyle.com/quiet-care.aspx>, 2015.12.8 閲覧
- [57] Kumar, V. 2005. Parallel and distributed computing for cybersecurity. Distributed Systems Online, IEEE, Vol.6, 2010
- [58] 伊藤昌毅, “センサネットワーク技術を活用した環境モニタリングの実現.”
電気学会研究会資料. IIS, 次世代産業システム研究会, IEEE Japan, No.66,
2010
- [59] 酒巻 洋, 若山 俊夫, 白石 将, 田中 久理, 藤坂 貴彦, 植松 明久, 手柴 充博, 橋
口 浩之, 深尾 昌一郎, “ミリ波気象ドップラーレーダーによる霧検出”, 日本
気象学会, 日本気象学会大会講演予講集, 2002
- [60] 荒木 健太郎, 新野 宏, 加藤 輝之, “2011年4月25日に千葉県で発生した竜巻
とその親曇のドップラーレーダー解析”, 日本気象学会, 日本気象学会大会講
演予講集, 2012
- [61] 安井 元昭, 石井 昌憲, 岩井 宏徳, “ドップラーライダーによる新しい気象観測:
一光による豪雨をもたらす気流の計測技術”, The Journal of The Institute
of Electrical Engineers of Japan, Vol.133, No.3, The Institute of Electrical
Engineers of Japan, 2013
- [62] 佐藤正樹. “全球非静力学モデルへの道.” 日本気象学会論文誌, 日本気象学会,
Vol.54, 2007

-
- [63] 日下博幸. "領域気象モデル WRF について (-特集- 次世代気象モデルの開発事例と気象シミュレーションの最先端)." *ながれ: 日本流体力学会誌*, Vol.28.1, 2009
- [64] Browning, Keith A. "Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds." *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.21, Issue 6, pp.634-639, 1964
- [65] Wakimoto, Roger M., and Huaqing Cai. "Analysis of a nontornadic storm during VORTEX 95." *Monthly weather review*, Vol.128, pp.565-592, 2000
- [66] Wakimoto, Roger M., and James W. Wilson. "Non-supercell tornadoes." *Monthly Weather Review*, Vol.117, pp.1113-1140, 1989
- [67] Lee, Julian J., T. Samaras, and C. R. Young. "Pressure measurements at the ground in an F-4 tornado." *Preprints, 22d Conf. on Severe Local Storms*, Hyannis, MA, Amer. Meteor. Socety, Vol. 15, 2004
- [68] Crum, Timothy D., Alberty, Ron L."The WSR-88D and the WSR-88D Operational Support Facility." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.74, issue 9, 1993
- [69] Simmons, Kevin M., and Daniel Sutter. "WSR-88D radar, tornado warnings, and tornado casualties." *Weather and Forecasting*, Vol.20, pp.301-310, 2005
- [70] Winn, W. P., S. J. Hunyady, and G. D. Aulich. "Pressure at the ground in a large tornado." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)* 104.D18, pp.22067-22082, 1999
- [71] Karstens, Christopher D., et al. "Near-Ground Pressure and Wind Measurements in Tornadoes*." *Monthly Weather Review*, Vol.138.7, 2010
- [72] Davis Instruments, "Whether Products",
<http://www.davisnet.com/weather/>, 2015.12.8 閲覧

- [73] 気象庁, ”気象観測の手引き”,
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/tebiki.pdf,
2015.12.8 閲覧
- [74] 気象庁, ”天気予報の精度検証結果”,
http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/kensho/yohohyoka_top.html, 2015.12.8 閲覧
- [75] Niino, Hiroshi, Tokunosuke Fujitani, Nobuyuki Watanabe, ”A Statistical Study of Tornadoes and Waterspouts in Japan from 1961 to 1993”, J. Climate, Vol.10, pp.1730-1752, 1997
- [76] SAKURAI Keita, KAWAMURA Ryuichi, ”日本における竜巻発生環境場と予測可能性”, 気象学会学会誌 天気, 日本気象学会, Vol. 55, no,1, 2008
- [77] 水野 孝則, 新野 宏, 小林 文明, 鈴木 修, 加藤 輝之, 坪木 和久, 田村 幸雄, 赤枝 建治, 海老原 智, ”気象学会主催「竜巻シンポジウム」報告”, 日本気象学会, 2007
- [78] 気象庁, ”過去の気象データ検索”,
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>, 2015.12.8 閲覧
- [79] 気象庁報道資料, ”2012年(平成24年)5月6日 茨城県・栃木県で発生した竜巻について”,
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/tatsumaki-portal/tyousa-houkoku.pdf>,
2015.12.8 閲覧
- [80] 大塚孝信, 鳥居義高, 伊藤孝行, ”移動型ワイアレスセンサネットワークの周囲環境変化に応じた信頼性確保のための設置位置推薦手法の提案”. 第177回情報処理学会 知能システム研究会, 情報処理学会, 2014
- [81] 住友精密工業センサネットワーク事業部, ”無線センサーネットワーク MOTE”, <http://www.xbow.jp/01products/index.html>, 2014.11.18 閲覧

-
- [82] 戸部 義人, ”無線センサネットワークの技術動向”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol190-B, No.8, pp.711-719, 電子情報通信学会, 2007
- [83] 長 建太, 大須賀 昭彦, 本位田 真一, ”知的移動エージェントによるマルチパーパスワイヤレスセンサネットワークアプリケーション”, 情報処理学会論文誌, Vol47, No,12, pp.3165-3178, 情報処理学会, 2006
- [84] 大塚孝信, 鳥居義高, and 伊藤孝行. ”気圧センサノードを用いた局地的異常気象検知アルゴリズムの提案.” 情報処理学会研究報告. ICS,[知能と複雑系], pp.1-6, 2014
- [85] Hill, Jason, et al. ”System architecture directions for networked sensors.” ACM SIGOPS operating systems review. Vol. 34. No. 5. ACM, 2000.
- [86] Fok, Chien-Liang, Gruia-Catalin Roman, and Chenyang Lu. ”Rapid development and flexible deployment of adaptive wireless sensor network applications.” Distributed Computing Systems, 2005. ICDCS 2005. Proceedings. 25th IEEE International Conference on. IEEE, 2005.
- [87] Kuorilehto, Mauri, Marko Hnnikinen, and Timo D. Hmlinen. ”A survey of application distribution in wireless sensor networks.” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, pp.774-788, 2005
- [88] I.F. Akyildiz, W. Su*, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, ”Wireless sensor networks: a survey”, Computer Networks, Vol.38, pp.393-422, Elsevier Science B.V, 2002
- [89] Dhananjay Lal, Arati Manjeshwar, Falk Herrmann, Elif Uysal-Biyikoglu, Abtin Keshavarzian, ”Measurement and Characterization of Link Quality Metrics in Energy Constrained Wireless Sensor Networks”, Proc of IEEE International Conference on Global Communications Conference,pp.446-452, 2003

- [90] Geoffrey Werner-Allen, Konrad Lorincz, Matt Welsh, et.al, "Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano", IEEE INTERNET COMPUTING, March April, 2006, pp18-25, 2006
- [91] 宇谷 明秀, 山本 尚生, "複数の許容解を探索する Particle Swarm Optimization とその複数シンク無線センサネットワークにおけるシンクノード配置問題への適用", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J93-D, No.5, 電子情報通信学会, pp.555-567, 2000
- [92] 東京コスモス電機 ワイヤレス事業部, TWE-Strong, "<http://tocos-wireless.com/jp/products/TWE-001STRONG.html>", 2014.11.17 閲覧
- [93] デイジインターナショナル株式会社, Xbee Pro モジュール, "<http://www.digi-intl.co.jp/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-zb-module.html>" 2014.11.17 閲覧
- [94] デイジインターナショナル株式会社, X-CTU, "<http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/xctu>", 2014.11.18 閲覧
- [95] リニアテクノロジー, LT-Spice, "<http://www.linear-tech.co.jp/designtools/software>", 2015.12.20 閲覧
- [96] 小泉圭吾, et al. "土砂災害監視のための無線センサネットワークの実用化に向けた実験的研究." 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 69.1, pp.46-57, 2013
- [97] 田野辺博正, et al. "波長ルーティングフルメッシュ (AWG-STAR) によるトポロジ可変ネットワークの実現." 電子情報通信学会技術研究報告. IN, 情報ネットワーク, Vol.102, pp.133-136, 2003
- [98] 小泉圭吾, et al. "土砂災害監視のための無線センサネットワークの実用化に向けた実験的研究." 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69.1, pp.46-57, 2013

-
- [99] Romer, Kay, and Friedemann Mattern. "The design space of wireless sensor networks." *Wireless Communications, IEEE*, Vol.11.6, pp54-61, 2004
- [100] Younis, Ossama, Marwan Krunz, and Srinivasan Ramasubramanian. "Node clustering in wireless sensor networks: recent developments and deployment challenges." *Network, IEEE*, Vol.20.3, pp.20-25, 2006
- [101] Hongyang, Chen, et al. "An improved DV-Hop localization algorithm with reduced node location error for wireless sensor networks." *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol.91.8, pp.2232-2236, 2008
- [102] MEMSIC .inc, *Wireless Sensor Network*, "Eko",

<http://www.memsic.com/wireless-sensor-networks/>, 2014.12.1 閲覧
- [103] 宇谷 明秀, 山本 尚生, "複数の許容解を探索する Particle Swarm Optimization とその複数シンク無線センサネットワークにおけるシンクノード配置問題への適用", *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol.J93-D, No.5, pp.555-567, 電子情報通信学会, 2000
- [104] 大塚孝信, 鳥居義高, and 伊藤孝行. "移動型ワイアレスセンサネットワークの周囲環境変化に対する信頼性確保のための設置位置推薦手法の提案." *情報処理学会研究報告. ICS*, [知能と複雑系], pp.1-8, 2014
- [105] 大塚孝信, 鳥居義高, and 伊藤孝行. "移動式 WSN のためのノード間電波強度予測アルゴリズムの提案." *人工知能学会全国大会論文集 29*, pp.1-4, 2015
- [106] 大塚孝信, 鳥居義高, and 伊藤孝行. "移動式ワイアレスセンサネットワークのための設置位置推薦アルゴリズムの提案." *第 77 回全国大会講演論文集*, pp.511-513, 情報処理学会第 77 回全国大会, 2015

-
- [107] 東京コスモス電機 ワイヤレス事業部, TWE-Strong,
”<http://tocos-wireless.com/jp/products/TWE-001STRONG.html>”,
2014.12.1 閲覧
- [108] Fukatsu, Tokihiro, and Masayuki Hirafuji. ”Field monitoring using sensor-nodes with a web server.” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.17.2, pp.164-172, 2005
- [109] 三島市洪水避難地図 (ハザードマップ) ,
”http://www.city.mishima.shizuoka.jp/media/05082030_pdf.2012926_rad5B39B.pdf”, 2014.12.1 閲覧
- [110] Digi International, Xbee Pro,
”<http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-zb-module>”,
2014.12.1 閲覧
- [111] Digi International, Xbee RF-modules Datasheet,
”<https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>”, 2014.12.1 閲覧
- [112] Gubbi, Jayavardhana, et al. ”Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions.” *Future Generation Computer Systems*, Vol.29.7, pp.1645-1660, 2013
- [113] Atzori, Luigi, Antonio Iera, and Giacomo Morabito. ”The internet of things: A survey.” *Computer networks*, Vol.54.15, pp.2787-2805, 2010
- [114] Teixeira, Thiago, et al. ”Service oriented middleware for the internet of things: A perspective.” *Towards a Service-Based Internet*. Springer Berlin Heidelberg, Vol.220-229, 2011

-
- [115] Lin, Kwei-Jay, et al. "Building smart m2m applications using the wukong profile framework." Green Computing and Communications (GreenCom), 2013 IEEE and Internet of Things (iThings/CPSCoM), IEEE International Conference on and IEEE Cyber, Physical and Social Computing. IEEE, 2013
- [116] Takanobu Otsuka, Yoshitaka Torii, Takayuki Ito, "Anomaly Weather Information Detection using Wireless Pressure-Sensor Grid", Journal of Information Processing (JIP), Vol.23, No.6, Information Processing Society of Japan (IPSJ), 2015
- [117] Otsuka, Takanobu, Yoshitaka Torii, and Takayuki Ito. "Challenges and implementation of ad-hoc water gauge system for the grasp of internal water damage." 14th International Conference on Computer and Information Science (ICIS), 2015 IEEE/ACIS . IEEE, 2015
- [118] Takanobu Otsuka, Yoshitaka Torii, and Takayuki Ito. "A proto-type of a portable ad hoc simple water gauge and real world evaluation." The Proceedings of the 2nd International Workshop on Smart Simulation and Modelling for Complex Systems, 2015
- [119] Maxim integrated, "One wire device.",
<https://www.maximintegrated.com/jp/products/digital/one-wire.html>,
2015.12.1 閲覧

謝辞

本研究の遂行ならびに論文の作成にあたり、終始懇切なる御指導を賜りました名古屋工業大学大学院情報工学専攻 伊藤孝行教授 に謹んで感謝の意を表します。伊藤孝行教授には修士課程より、長期にわたり研究そのものの意義、目的について多くの議論やアドバイスを頂きました。

また、情報工学分野における多くの有益な御助言と御教示を賜りました、名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻 加藤昇平教授、社会工学分野における本研究の意義や、河川管理の現実について有益なご助言とご教示を賜りました、名古屋工業大学大学院工学研究科 社会工学専攻 富永晃弘教授 に心より謝意を申し上げます。

また、本研究の遂行にあたり、情報工学的観点だけではなく、実社会における応用に関して有益な御助言と御教示を賜りました産業技術大学院大学 松尾徳朗教授 に心より謝意を申し上げます。

本研究は名古屋工業大学 伊藤孝行研究室にて多くの方々の協力を得て実現いたしました。本研究室の卒業生である、東京農工大学 藤田桂英准教授、静岡大学 福田直樹准教授には、研究に関する多くのアドバイスや議論頂きました。ここに謝意を申し上げます。実験の実施にあたり、卒業生の坪井辰之助くん、吉村卓也くん、在学生の鳥居義高くん、奥原俊くんをはじめとする、研究室のみなさんの熱心な協力を得たことを記すとともに、心より感謝申しあげます。

実フィールドにおける実験にご協力いただきました名古屋工業大学、国土交通省中部地方整備局の皆様 に心より感謝申し上げます。

また、研究を進めるにあたり、ご支援・ご協力を頂きながら、ここにお名前を記

すことができなかつた多くの方々に心より感謝申し上げます。

最後になりますが，私の自然科学分野への興味を一貫して応援頂き，平成 19 年 7 月 14 日に永眠した父にこの論文を捧げます。

本論文に関する原著論文

学術論文

- [1] Takanobu Otsuka, Yoshitaka Torii, Takayuki Ito, “ Anomaly Weather Information Detection using Wireless Pressure-Sensor Grid ”, Journal of Information Processing Vol.23(2015) No.6, ISSN:1882-7764
- [2] 大塚 孝信, Deyue Deng, 伊藤 孝行, ”3 単語共起フィルタリングによる有害文書分類手法と大規模データ処理” 電気学会論文誌 C,Vol.134, No.1, pp.168-175,2014.
- [3] Takanobu Otsuka, Takayuki Ito , “ Flexible WSNs Aims Easy Installation With Noise Reduce Method For Elderly People Care ” The International Journal of Networked and Distributed Computing, Vol1-3, pp174-186, 2013, ISSN : 2211-7938
- [4] 伊藤孝行, 金森 亮, Chakraborty, S., 大塚孝信, 原圭祐: 未来の社会システムを支えるマルチエージェントシステム研究:(2) 電力システムおよびワイヤレスセンサネットワークへの応用, 人工知能学会誌, Vol. 28, No. 3, pp. 370-379, 2013

国際会議

- [1] Takanobu Otsuka, Yoshitaka Torii, Takayuki Ito, ” A Innovative Outdoor IoT System Architecture for Service Oriented Things”, In the Proceedings of the

- Tenth International Conference on Knowledge, Information and Creativity Support Systems, Phuket, Thailand, November 12-14, 2015
- [2] Takanobu Otsuka, Yoshitaka Torii, Takuma Inamoto, Takayuki Ito, “A High-Speed Sensor Resources Allocation method for Distributed WSN”, International Workshop on Knowledge and Service Technology for Life, Environment, and Sustainability (KASTLES2015), Rome, Italy, 19-21 October 2015
 - [3] Takanobu Otsuka, Yoshitaka Torii, Takayuki Ito, “Autonomous Full-Mesh Network for Large-scale Outdoor Sensing” the 8th IEEE International Conference on Service Oriented Computing & Applications (SOCA2015), Rome, Italy, 19-21 October 2015
 - [4] Takanobu Otsuka, Yoshitaka Torii and Takayuki Ito, “A prototype of a portable ad hoc simple water gauge and real world evaluation”, The 2nd International Workshop on Smart Simulation and Modelling for Complex Systems in International Joint Conference on Artificial Intelligence 2015 (SSMCS2015/IJCAI2015), Buenos Aires, 25 - 31 July 2015
 - [5] Takanobu Otsuka, Yoshitaka Torii, Takayuki Ito, “Challenges and implementation of ad-hoc water gauge system for the grasp of internal water damage”, 14th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science (IEEE/ACIS ICIS 2015) June 28 - July 1, 2015 Las Vegas, USA.
 - [6] Takanobu Otsuka, Yoshitaka Torii, Takayuki Ito, “Anomaly detection algorithm for localized abnormal weather using low-cost wireless sensor nodes.” KASTLES2014
 - [7] Takanobu Otsuka, Tatsunosuke Tsuboi, Takayuki Ito, “Prototyping and evaluation of a wireless sensor network that aims easy installation”, In the Proceedings of the 26th International Conference on Industrial, Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE2013), 2013.
 - [8] Takanobu Otsuka, Tatsunosuke Tsuboi, Takayuki Ito, “A Bayesian Network based Method for Reducing Noise-data for Anomaly Detection in Flexible

Wireless Sensor Networks ”, The First International Workshop on The 1st International Workshop on Multiagent-based Societal Systems (MASS2013), 2013.

- [9] Takanobu Otsuka, Tatsunosuke Tsuboi, Takayuki Ito, ” Prototyping and evaluating a wireless sensor network for easy installation, ” Computer and Information Science (ICIS), 2013 IEEE/ACIS 12th International Conference on , vol., no., pp.129,134, 16-20 June 2013 doi: 10.1109/ICIS.2013.6607829
- [10] Takanobu Otsuka, Takuya Yoshimura, Takayuki Ito, An Implementation of Senior People Care Support System Using Motion Sensors ”, International Symposium on Green Computing and Sustainable Society(GCSS2012), pp.15-20, 27-30 Aug 2012.

国内会議 (査読付き)

- [1] 大塚孝信, 鳥居義高, 伊藤孝行, ”自律分散ワイアレスセンサネットワークによるネットワーク再接続速度向上手法の提案”, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2015 (JAWS2015),2015/9/30-10/2, 山中温泉河鹿荘ロイヤルホテル
- [2] 大塚孝信, 鳥居 義高, 伊藤 孝行, ”グリッド配置環境情報収集ノードによる局地的異常気象検知手法の提案”, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2014(JAWS2014), 2014/10/27-29,ANA ホリデイ・イン リゾート 宮崎
- [3] 大塚孝信, 伊藤孝行, モーションセンサによる異常検知とベイジアンネットワークによる誤センシングデータの除去, 第12回情報科学技術フォーラム (FIT2013), 鳥取大学, 2013/9/4-6.
- [4] 大塚孝信, 坪井辰之助, 伊藤孝行, ”設置が容易なワイヤレスセンサネットワークの試作と評価, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2012(JAWS2012), 2012/10/24 - 26, ヤマハリゾートつま恋

研究会・全国大会等

- [1] 大塚孝信, 鳥居義高, 伊藤孝行, ”自律分散 WSN における高速なセンサ資源融通手法の提案”, 平成 26 年度電気関係学会東海支部連合大会, 2015/9/8-9/9, 名古屋工業大学
- [2] 大塚孝信, 鳥居義高, 伊藤孝行, ”分散コンピューティングによる超低消費電力な高齢者見守り WSN の構築”, 日本生体医工学会全国大会, 2015/5/7-9, 名古屋国際会議場
- [3] 大塚孝信, 鳥居義高, 伊藤孝行, ”生活習慣を基にした独居高齢者の行動パターン可視化による異常検知手法の提案”, 日本生体医工学会全国大会, 2015/5/7-9, 名古屋国際会議場
- [4] 大塚孝信, 鳥居義高, 伊藤孝行, “移動式 WSN のためのノード間電波強度予測アルゴリズムの提案” 人工知能学会 2015 年度全国大会, 5/30-6/2, 公立ほこだて未来大学
- [5] 大塚孝信, 鳥居義高, 伊藤孝行, “大規模内水被害軽減のための可搬型水位計測装置の実装”, DRIS 第 4 回合同研究会, 2015/9/14, 松山
- [6] 大塚孝信, 鳥居義高, 伊藤孝行, “大規模フィールドセンシングのための移動型屋外センサネットワークの課題と設計”, 人工知能と知識処理研究会, 2015/6/18, 早稲田大学
- [7] 大塚孝信, 鳥居義高, 伊藤孝行, “移動式ワイアレスセンサネットワークのための設置位置推薦アルゴリズムの提案”, 情報処理学会第 77 回全国大会, 2015/3/17- 19, 京都大学
- [8] 大塚孝信, 鳥居義高, 伊藤孝行, “移動型ワイアレスセンサネットワークの周囲環境変化に応じた信頼性確保のための設置位置推薦手法の提案”, 情報処理学会 第 177 回知能システム研究会, 2014/12/15, 株式会社ドワンゴ 14 階セミナールーム
- [9] 大塚孝信, 伊藤孝行, ”平均行動量に基づく住民活動モデルを使った異常検知システム”, 情報処理学会 第 172 回 知能システム研究会 (SIG-ICS) , 2013/11/12,

東京農工大学

- [10] 大塚孝信, 伊藤孝行, ”独居高齢者の行動パターン可視化と異常検知手法の提案”, 平成 25 年度電気関係学会東海支部連合大会, 2013/9/24-25, 名古屋工業大学
- [11] 大塚孝信, Kway-Jay Lin, 伊藤孝行, フレキシブルなワイアレスセンサネットワーク実現のためのミドルウェアと大規模センサノードの統合管理, 電子情報通信学会, 人工知能と知識処理研究会, 2013/7/4, 早稲田大学
- [12] 大塚孝信, 坪井辰之助, 伊藤孝行, ”設置が容易なワイヤレスセンサネットワークの試作とプログラム容易化のためのインターフェース”, 2013 年度人工知能学会全国大会 (第 27 回), 2013/6/4 - 7, 富山国際会議場
- [13] 大塚孝信, 坪井辰之助, 伊藤孝行, ”ベイジアンネットワークを用いた異常検知センサシステムにおけるノイズ除去手法の提案”, 情報処理学会知能システム研究会, 2013/3/18-19, 名古屋工業大学ネットワーク実装への課題, ”第 10 回人工知能学会知識流通ネットワーク研究会プログラム, 2012/3/9, 東京学芸大学