

ワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用 と効率化

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2014-01-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小林, 秀幸 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00007475

静岡大学大学院創造科学技術大学院情報科学専攻博士論文

ワイヤレスセルラネットワークの 環境認識への応用と効率化

小林 秀幸 (5074-5038)

2011年6月24日

指導教員：杉浦 彰彦

目次

第1章 序論	4
1.1 本論の背景	4
1.2 本論の目的	5
1.3 本論の構成	7
第2章 原理	8
2.1 セルラネットワーク	8
2.1.1 携帯電話等によるセルラネットワーク	8
2.1.2 医学的なモデルとしてのセルラネットワーク	8
2.1.3 センサネットワークとセルラネットワークの差異	9
2.2 ワイヤレスセルラネットワーク	11
2.3 ワイヤレスセルラネットワークによる環境認識	13
2.4 本論で使用するセンサノード	19
2.5 渋滞環境推定システム	21
2.5.1 アドホックネットワークにおけるルーティング	21
2.5.2 渋滞認識手法	27
2.6 干渉低減手法	30
2.6.1 CSMA	30
2.6.2 CSMA/CA	30
2.6.3 IEEE802.15.4の周波数分割ネットワーク	32
2.7 本論の関連研究	33
2.7.1 ワイヤレスセルラネットワークの通学路安全システムへの適応	33
2.7.2 画像マルチホップ転送ネットワーク上での周波数分割を用いた干渉低減手法	34
2.7.3 ワイヤレスセルラネットワークのバレーボール動作検知システムへの適応	34
2.7.4 IEEE802.15.4 センサ端末の有線による伝送	35

2.8	本論の原理	37
第3章	渋滞環境推定システム	39
3.1	Introduction	39
3.2	原理	41
3.2.1	IEEE802.15.4	41
3.2.2	Traffic congestion	41
3.3	システムの概要	42
3.3.1	Proposal system	43
3.3.2	Estimation length	44
3.3.3	周波数分割多重を利用した渋滞距離推定手法	45
3.4	シミュレーション実験	47
3.4.1	複数回通信実験	48
3.4.2	複数車線シミュレーション	51
3.4.3	実機実験	53
3.5	まとめ	57
第4章	ワイヤレスセルラネットワークの干渉低減	58
4.1	緒言	58
4.2	原理	60
4.2.1	ACKnowledgement	60
4.2.2	Timing Group Division	62
4.2.3	RSSIを用いたTGD	63
4.3	提案方式ACKとZigBeeACKの比較	65
4.3.1	ACK方式比較実験	65
4.3.2	ACK方式比較実験結果	66
4.4	TGDの評価実験	68
4.4.1	マルチエージェントシミュレーション	68
4.4.2	実機実験	69
4.5	RSSIを用いたTGDの拡張	74
4.5.1	手動グループ分け	75

4.6 結言	79
第5章 まとめ	80
5.1 本論のまとめ	80
5.2 今後の展望	82
謝辞	83
参考文献	84

第1章 序論

1.1 本論の背景

近年、高性能なカメラなどによる入力系や、高精度なパーソナルコンピュータなどの処理による画像のオブジェクト認識が行われている。しかし、簡易な画像入力系や高圧縮符号化を適用した場合、従来の認識手法では性能が極端に低下してしまう。本論では簡易な入力系を搭載した多数の端末をワイヤレスネットワークでつなぎ、一つの認識システムとして活用するワイヤレスセルラネットワークを提案する。提案モデルでは、簡単なセンサにより計測される単純な取得情報を周辺の端末に送付し、これらの情報を交互に交換しあうことで環境認識を実現する。環境認識とは、我々が提案する新しい認識手法のことで、端末が動作する周辺の状態を認識する手法である。本論では、単純な情報処理と簡単な情報通信しかできない多数の端末が寄り集まることで、高度な知的処理を行い、環境認識を効率的に行う手法を提案する。各端末の情報伝達は簡易なものであるが、それらの関連性から相互作用が生まれ、ネットワークの持つ知識や経験をもとにネットワーク自体が知的に環境を認識する。そのことによって、環境認識を実現している。ワイヤレスセルラネットワークによる環境認識の実現のために本論では IEEE802.15.4 を利用する。また、ワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用例として、渋滞に巻き込まれたときに渋滞の先頭から自車までの位置を推定する渋滞距離推定システムを提案する。

1.2 本論の目的

本論は、私の提案するワイヤレスセルラネットワークによる環境認識の有効性を示すことを目的にする。本論の中で、ワイヤレスセルラネットワークの環境認識の応用例として、渋滞環境推定システムの提案と実装を行う。また、ワイヤレスセルラネットワークの環境認識への効率化として干渉低減手法の提案と実装をこなう。

渋滞距離システムを作成するために、本論では車々間通信を用いてワイヤレスセルラネットワークによる環境認識システムを作成する。渋滞は前の車が止まる、あるいは減速することにより後続車が減速し停車することによって発生する。つまり、渋滞は前方からの情報を後続車が受信することによって確立される一方向のネットワークと捉えることが出来る。本論で提案するシステムは、複数の車から構成される。車にはそれぞれ、IEEE802.15.4 端末を搭載しているものと搭載していないものがある。渋滞は一方向のネットワークと考えることが出来るので、前の車からの情報を後続の車が受信し加算していくことで、ネットワーク内の順番付けが行われる。この番号付けにより、各車はネットワーク内の搭載車で何番目なのかが分かる。端末が受信したデータ数から推定パラメータを求め、その値と受信した番号を使用し渋滞の先頭からの距離を求める。本論では、推定パラメータの定式化を行い、シミュレーションにより推定精度を計算し、最後に実装実験を行い端末がどの程度の環境でシステムが機能するかを求めた。さらに IEEE802.15.4 の周波数分割を使用し高速化を試みた。実験の結果、複数回通信することで推定精度とネットワーク形成率が向上することを確認した。

しかしながら、通信回数が増えたことにより端末間干渉が問題になる。端末間の干渉が起こった場合、通信の遅延や品質の低下は避けられない。そのため、近距離無線通信規格では端末間干渉の回避手法として、様々な手法が提案されている。なかでもパケットの衝突回避手法として、CSMA/CA (CSMA/ Collision Avoidance) が使用されている。しかし、端末数が増加するにつれ、CSMA/CA 自体の遅延が問題になる。そこで本論では、時間グループ分割制御 (Timing Group Division:TGD) と呼ぶ手法を提案し、TGD と CSMA/CA を併用した IEEE802.15.4 の高速化を行う。我々が提案する TGD とは、端末群をグループ分けし、各グループに待ち時間をもたせ、送信時間をずらすことにより、一回の CSMA/CA に参加する端末数を制御することで遅延を回避する方法である。本論では、実機実験を通して TGD の待ち時間のしきい値を検証し、最適値に付いて検討する。さらに、本論では TGD のグループ分けの指標として、RSSI(Received Signal Strength Indication) を用いる手法を提案し、分散制御を行うような場合においても本手法が有効に動作することを確認する。また、多数の端末が同時に通信を行おうとした場合 IEEE802.15.4 の ACK プロトコルでは対応しきれない場合が存在する。

そこで、本論では多数の端末が通信を行う場合にも動作可能な ACK プロトコルの提案を行い、実機に搭載することによって動作を確認する。

1.3 本論の構成

本論では、ワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用と効率化の提案を行う。また、ワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用事例として渋滞環境における測距システムの作成を目指す。さらに、ワイヤレスセルラネットワークにおける効率化のために、干渉低減手法の提案を行う。

本論文は以下の6章で構成されている。

本章“序論”では、本研究の背景と必要性、及び目的と本手法の有用性について述べた。

2章“原理”において、ワイヤレスセルラネットワークの環境認識、渋滞距離推定システム、干渉低減手法の各先行研究の説明を通して、現在の研究分野における状況をまとめる。また、併せて本論に関連する研究に付いても説明を行う。

3章“渋滞環境推定システム”では、提案する渋滞距離推定システムの説明を行い、シミュレーション実験と実機実験によりシステムの有効性を示す。

4章“ワイヤレスセルラネットワークの干渉低減”では、既存の干渉低減手法の問題点に言及し、本論で提案する干渉低減手法について説明する。さらに、実機実験を通じた検証により提案手法の有効性を示す。

5章“結論”において本論のまとめと今後の展望について述べる。

第2章 原理

2.1 セルラネットワーク

本論で使用する“セルラネットワーク”と言う用語においては、携帯電話等のセルゾーン方式を採用した方式としての意味と、医学的な細胞間の動作を模したモデルとしての意味の二種類が存在する。本論で言うセルラネットワークは後者のことを指すが、通信系の分野においては前者のことを指すとの誤解が生じうる。従って、本論で使用するセルラネットワークとセルゾーン方式を使用する手法との差異を示すため、本節において、それぞれの特徴を示す。また、センサネットワークとセルラネットワークの差異について説明する。

2.1.1 携帯電話等によるセルラネットワーク

携帯電話をセルラーホンと呼ぶ。これは、基地局を細胞核と捉え、基地局のカバーするエリアを細胞と見立てることにより、細胞のように通信エリアを敷き詰めることにより端末が移動するエリアをカバーし、通信可能にするところから命名されている。細胞をモデルとして大規模なシステムを構築するといった意味で、携帯電話等のセルゾーン方式によるセルラネットワークも本論で使用するセルラネットワークの一種であると捉えることが可能である。

2.1.2 医学的なモデルとしてのセルラネットワーク

生物は、自己増殖を行い能動的に動作し、生物間あるいは環境との情報の伝播により協調動作する仕組みを有している。この様なシステムの動作に学んだ情報処理システムの研究が盛んに行われている。特に、細胞の動作と細胞間の情報のやり取りをネットワークとして模倣したシステムを、セルラ(細胞)ネットワークと呼ぶ。セルラネットワークとは医学系の分野で使用される細胞間の情報伝播のやり取りを示すネットワークモデル [1] であり、本論では、セルラネットワークの情報処理分野での使用を目指す。

表 2.1: セルラネットワークとセンサネットワークの差異

Tab. 2.1 the difference between cellular network and sensor network

	pattern recognition	self-repairing	interaction	using of the physical space	environment recognition
cellular network	○	○	○	△	×
sensor network	△	△	△	○	○

医学系の分野では、視覚細胞や神経細胞などは、細胞単体では動作せず、ネットワークとして動作するということが知られており、それら細胞間のネットワークの動作をモデル化することにより、視覚や神経細胞の動作を明らかにしようという試みが行われている。

また、それらの工学的な応用として、神経細胞を基にしたモデルではあるが、実際の神経細胞との動作とは異なりながらも、パターン認識などに使用可能な人工ニューラルネットワークの研究が行われている。人工ニューラルネットワークの例や携帯電話等のセルゾーン方式のように実際の生体機構における細胞の動作とは異なりながらも、工学的に有用なセルラネットワークの応用が多数提案されている。そこで、本論で我々はワイヤレスセンサネットワークにセルラネットワークの適用を行う。

2.1.3 センサネットワークとセルラネットワークの差異

センサネットワークとセルラネットワークの差異を表.2.1 に示す。

セルラネットワークではニューラルネットワークなどに見られるように、パターン認識による認識が行われている。しかしながら、センサネットワークではパターン認識を用いるよりも測定したデータがどのような値であるかに着目することによって、センサが配置された空間の情報を収集しようという試みが多い。そのデータをパターン認識用に用いることもあるが、センサネットワークはデータの収集が目的であり、パターン認識はその後の処理で用いられることがある。

セルラネットワークでは免疫系のシステムや細胞をモデルとしたロボットにみられるように、自己修復機能を備えているものが存在する。センサネットワークでも、故障した端末をネットワークから除外することや、ロバストなデータの処理などでネットワークを正常に保つものが存在する。しかしながら、データや端末を除外するのではなく修復する機能を備えたものは少ない。

また、セルラネットワークは相互作用によって動作する。しかしながら、センサネットワークの場合、一つのセンサノードだけでもセンシングが出来るため、必ずしもデータの取得などで相互作用を行う必要はない。

さらに、センサネットワークは物理的な空間で使用されることをその目的としている。しかしなが

ら、セルラネットワークはパターン認識や機械学習など、必ずしも物理的な空間で使用されなくともよい場合が存在する。

また、センサネットワークは物理的な空間で、センサ端末が配置された空間のデータを取得することにより、環境の認識を行う。しかしながら、セルラネットワークで環境認識を行った例は存在しない。そこで、本論ではセルラネットワークにセンサネットワークを適用することで、環境の認識を試みる。

2.2 ワイヤレスセルラネットワーク

セルラネットワークの例として、神経系の学習を模した人工ニューラルネットワークの研究が盛んに行われている。呂ら [2] は、教師信号に依存しないニューラルネットワークを提案し、カラー画像の雑音除去にフィルタとして利用している。また、武田ら [3] は、組合せ最適化問題を高速に解く Hopfield 型ニューラルネットワークへ論理型推論言語 Prolog を変換する手法を提案している。この変換により、より一般的な問題に対して、ニューラルネットワークによる最適化を適応可能であるとしている。このように、ニューラルネットワークは、教師学習を利用したパターン認識やクラスタリング、最適化手法に広く用いられている。

また、生物の DNA などを模し、交叉などの遺伝情報をもとに生物の進化をまねた遺伝的アルゴリズムの研究が盛んに行われている。遺伝的アルゴリズムは最適化に適した手法であり、様々な最適化問題への適応が加藤 [4] など多くの研究によって示されている。また、遺伝的アルゴリズムはパラメータによって、最適化を解く時間や精度などが変わってくるため、金久保 [5] や木津 [6] らによって、パラメータフリーな遺伝的アルゴリズムの提案が行われている。また、遺伝的アルゴリズムの工学的な応用として、村川 [7] らは、光ファイバの通信ロスを低減させるための自動調芯に遺伝的アルゴリズムを利用する方法を提案している。また、ネットワークの最適なルーティングに遺伝的アルゴリズムを利用する試み [8] が奥原らによって提案されている。

さらに別の試みとして、免疫系の動作を模したシステムの研究が行われている。免疫細胞は、鍵と鍵穴の関係で例示されるような特異な自己と非自己の認識機構と適応学習能力を持ち、動的なネットワークを臨機応変に作成し、遺伝的組換えにより多様性を表現可能である [9]。田村ら [10] は、免疫システムの持つ認識の曖昧さに着目し、曖昧さ許容することによる免疫ネットワークのアナログ画像パターン認識システムを提案している。また、免疫が持つ自己と非自己の認識機能を故障している端末か否かの判定に用いる手法を石田らは提案し [11]、ユニット単位による分散システムの自己修復手法を提案している。

これまでのセルラネットワークはコンピュータ上のシステムとして実現されるものが主であり、実端末に利用している例は少数である。その中でも、同一の機能を持つ端末を一つのユニットとして、それらが複数集まることで、形態を自在に変形させ、故障の際もユニットの交換や、形態の変化によって対応する細胞をモデルとした ATRON [12] というロボットが H.H.Lund を中心とした Jorgenson らの研究グループによって実現されている。

セルラネットワークは、以上のようにパターン認識やクラスタリングなどの認識系への応用が可能

である。さらに、セルラネットワークの特徴として、生物学を模したモデルであるため、一部の端末が故障していてもシステムとして動作するなど耐故障性に優れていることが挙げられる。また、エラーのある端末を修復するなど自己修復が行えるといったシステムを作成可能である。

本論では、これらセルラネットワークの特徴に着目し、セルラネットワークをセンサネットワーク、特にワイヤレスシステムのセンサネットワークに適応するワイヤレスセルラネットワークを提案する。

特に、本論では、ワイヤレスセルラネットワークを渋滞距離推定システムに利用する。従来のセンサネットワークを使用する場合、網羅的に情報を収集するには、ネットワークを構成するすべての端末がセンサを搭載する必要があり実現は困難である。そこで、本論では、ワイヤレスセルラネットワークを利用することにより、搭載していない端末を一部動作していない細胞と捉え、すべての端末がセンサを搭載する必要のないシステムを実現する。

この応用例から、本論ではワイヤレスセルラネットワークによるパラダイムの変化を目指す。現在までは、端末が遍在することによるユビキタスネットワークによって環境認識がなされてきた。しかしながら、複数のシステムが共存するような場合、中央管理端末やネットワークインフラを共通に使用するため負荷の増大が懸念される。そこで、本論で提案するワイヤレスセルラネットワークの情報システムへの応用により、端末群は一つのネットワークを形成し、閉じた情報処理システムを実現可能である。そのため、複数のシステムが共存するような場合でもシステム間の情報処理は閉じた形で行うことが可能であり、中央管理端末を削減することが可能である。これは、生命を構築する細胞が生命内の情報交換のみで閉じたシステムを形成することと同じである。

2.3 ワイヤレスセルラネットワークによる環境認識

近年、端末の置かれた環境を認識する取り組みが様々な分野で広がっている。

自動監視システムの高精度認識手法の一つの試みとして、波田ら [13] は、移動する対象を、アクティブビジョンシステムとカルマンフィルタを用いることで追跡する手法を提案している。この提案方式での追跡は、移動物体の検出と運動予測で行われている。移動物体の検出には、観測画像と予め撮影しておいた背景画像との差分による背景差分法を用いている。この手法はキャリブレーションの手間や適切な背景画像が必要になるなど、限定的な手法にはなるが、システムの構成が比較的簡易である。

また、カルマンフィルタによる運動予測は、実時間での推定が可能であり、高精度の推定が期待されている。特に川瀬ら [14], [15] は、宇宙からの衛星信号を受信するための運動予測のためにカルマンフィルタを使用している。

また、海老根ら [16] は、3次元環境内を運動する物体を、観測用画像がから、検出しようと試みている。通常のオプティカルフローによる検出手法では、観測系の含有する時間的な変化成分も取得してしまうため、移動体からの処理には向いていない。そこで、海老根らは、自律走行車や航空機のように取り付けるカメラのように、観測系の運動を既知とした手法への適用を試みた。さらに、実時間性を考慮するために、静止環境の像の運動をすべて同一方向とする直線輝度信号に写像する変換を提案している。この研究は、シミュレーション実験のため、実際の機器でオプティカルフローを実現しようとした場合の実時間性については、未知の部分が残る。

これらの手法は、対象オブジェクトが背景と異なる動作をするときに有効な手法である。しかしながら、車載カメラによるランドマークの検出などにおいては、背景とオブジェクトが同様の動きをするため、これらの手法は適さない。そこで、高橋ら [17] は、ITS の分野において、車載カメラによる映像から部分的に隠れたオブジェクトを認識し、ランドマークとして識別する手法を提案している。高橋らの研究は、内村ら [18] が行った、道路情景カラー画像からの道路標識といった、円形のものや色が得意なものに限った単純なテンプレートマッチングとは異なる。さらに、道路標識は、一般に運転手が認識しやすいように設置されるため隠れる部分が少ない。対して、ランドマークの形状は複雑であり、部分的に隠れることが頻繁におこり、対象オブジェクトの認識が困難になる。そこで、高橋らは Hirata らの手法 [19] を車載カメラによる認識に利用することで、ランドマークの自動抽出を試みている。Hirata らの手法は、色の類似度により細かく分類を行い、近隣領域の色やテクスチャの類似度や境界の複雑度を領域のサイズを用いて徐々に統合していき、複数の細かな要素で構成される

オブジェクトの領域を統合することで、オブジェクトの構造を考慮した領域の切り出しを実現している。そのように切り出したオブジェクトと予め用意しておいたランドマーク辞書データとの類似度を求め、ランドマークの検出を行う。この手法は、広い意味でのパターンマッチングを行っているが、部分的に隠れたオブジェクトを認識できるなど、従来のパターンマッチングに比べ、柔軟かつ頑強な手法である。

これらのオブジェクト認識の手法として、認識元とのマッチングを取るためのデータが必要になってくる。Mohanら[20]は、画像データの部位ごとの検出を行い、数万に上るマッチングデータを使用し、人物を認識する手法を提案している。この提案手法では、人体の各部位を検出し、それらの関係性によって画像内から人物を検出している。オブジェクトの各部位の関係性から、オブジェクトを認識しようという試みは、各オブジェクトの関係性が自明の時のみに動作する。オブジェクトの部位の関係性が変動する場合、先程の手法は使えない。この関係性の変動を抑えるためには、確率的に変動の可能性を表現するGemanらのシュミレーテッドアニーリング法[21]などの確率モデルが適している。確率的なモデル化による手法としてWangらは、海原や風に揺れる木々などといった動画からの物体表面形状の抽出手法として、マルコフ連鎖モンテカルロ法による手法[22]を提案している。この提案手法では、統計的パラメータ推定手法としてEM (Expectation-maximization) アルゴリズムを使用している。しかしながら、シミュレーテッドアニーリング法、EM アルゴリズムなどは、網羅的な手法であるため、実行時間に多くの時間がかかることが示されている[23],[24]。そこで、古賀らはオブジェクトのマッチングデータを数枚とした手法[25]を提案している。この手法はオブジェクトをパーツ単位で分割し、パーツを発見した場合に、近傍の領域から別のパーツの探査を繰り返すことで、網羅的にならず、また、パーツの位置が変動したとしても、検出を可能にしている。

このように、画像処理の分野を中心にオブジェクト認識の研究は盛んに行われている。しかしながら、画像処理の分野では、その物体がどのような環境に置かれているかを認識しようとする環境認識へのアプローチは少ない。また、先程から示すように、画像処理の分野におけるオブジェクト認識では、大規模なサーバ、実行時間に課題がある計算方式、高精度な入力系の必要性など、実用化するに当たり解決すべき課題が多い。

これに対し、ネットワークの分野では、ネットワークがどのような環境にあるかを認識しようとする試みが存在する。ネットワークの環境を認識する手法のうち、ネットワークトポロジーの推定手法として、高橋ら[26]によってフェロモンモデルを利用したセンサネットワークの自動推定手法が提案されている。フェロモンモデルとは、昆虫の出すフェロモンの伝播をモデル化することによって、隣接関

係推定を行えるモデルである。フェロモンは排出源から離れた場所へも情報の伝播が行え、古い情報を破棄し新しい情報が強く反映される。そのため、フェロモンをモデル化することによって、環境の変化に柔軟に対応したモデルの構築が行える。このフェロモンモデルを利用し、時系列センサデータのみで自律的にセンサネットワークトポロジの推定を行なっている。

また、環境を認識する試みでセンサネットワークの研究も盛んに行われている。カリフォルニア大学バークレー校の Kahn らは 1999 年の MobiCom において、ミリメートルスケールでのセンシングを実現するデバイスである Smart Dust[27] の発表を行った。Kahn らの提案する Smart Dust プロジェクトで使用されるノード端末 (MOTE) は MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) に分類される技術である。藤田 [28] によると、MEMS は、薄膜の上に様々な素子を載せ、ナノレベルでの微小な加工により、様々な機能を持たせたデバイスを作成しようというトップダウン的な手法により作成されるデバイスの総称である。Kahn らの提案する MOTE は、1-2[mm] の薄膜バッテリーの上に、ソーラーパネル、各種センサ類、レーザダイオード、受光素子等を搭載したものを想定している。現状ではその小ささのデバイスは実現していないが、Kahn らが想定しているものに近いデバイスが販売されている。例えば、Oracle(旧 Sun Microsystems) 社製の Sun SPOT は java 仮想環境で動作し、加速度センサ、照度センサ、温度センサの各センサ類が、手のひらに乗る大きさで提供されている。このように、センサネットワークは、微小化技術などによるデバイス作成技術の発展に伴い、その実現が可能となっている。Kahn らが指摘するように、センサデバイスの小型化は、新しい試みであり、センサ間をネットワークとして繋げることで、より Smart な空間を創りだし、新たな価値を想像することになる。このように、小さいセンサ群をありとあらゆる所に配置し、そのデータを集約することで、我々人類は、自然環境などのあらゆる環境の状態をより知ることができ、環境への認識を深めていくことができる。

Kahn らが提唱した、Smart Dust により、何万ものセンサ群が一つのネットワークに接続される大規模なセンサネットワークの実現が予想される。そのようなネットワークにおいて、シルビアら [29] は以下のように新しい研究課題が生じていると指摘している。

- 電力消費
- 通信の制限
- 限られたデータ計算・蓄積能力
- 自己組織化

センサノードの電力供給は、様々な制約を受けるためノードの電力消費はより少ないほうが望まし

い。また、センサノード間の通信は、電力の消費が大きいため、電力消費の観点からもネットワーク内での通信の最適化がシステム設計において重要である。また、消費電力やコストの関係上、センサノードに高速な CPU や大容量のメモリを積むことができないが、センサノードに適したそれらの開発が期待される。多数のノードが配置され、それらの故障が起こった場合、センサネットワークは自己組織化されるべきである。従って、自律的な動作を研究する必要がある。これら、シルビアらの指摘は、多くの研究者にとって支持できる内容になっている。

これらのセンサネットワークをひとつのデータベースとして捉え、センサノード群のデータのやりとりをデータベースで得られた技術を使うことで、様々な問題に対応しようとする試みがある。MaddenらはTAG(Tiny AGgregate)[30]を提案し、アドホック内のセンサノードからのクエリをデータベース的に解決しようとしている。TAGはSQLの記法に沿って、各センサノードにアクセスを試みる手法である。この手法は通信の最適化のため、全ノードへのブロードキャストによりデータ収集を命令できるが、しきい値に達していないデータの場合、データを返さないなどの処置が行われている。このようにセンサノードからのデータはサンプリングされ離散的に収集される。しかしながら、ある空間での放射線の量を測定するなど、連続的な計測が必要なときには、データ間の補正をする必要が生じる。そこで、シルビアらは文献[29]において、Oliverらの提案する計算の複雑性を持つKriging[31]を利用する手法を提案している。Krigingは推定値に対するサンプルデータの重み付けによって、滑らかな推定値と誤差の割合を返すことができるが、ネットワーク内の全センサノードに対しデータ応答を待つ無駄がある。そこで、シルビアらはQUAKE(Query Answering Using Adapted Kriging Estimation)という、ネットワーク内の計算を最小化するKrigingを提案している。これは、センサノードからのデータ収集の深さをしきい値を用いて決定する方法である。しきい値にはユーザの許容誤差を用い、データの誤差が許容以内であれば、それ以上深い位置にあるセンサノードからのデータ収集を行わない。

このように、センサネットワークによって環境を認識するという試みが行われている。しかしながら、シルビアやMaddenらの考えるセンサネットワークはシルビア自らが指摘しているように自己組織化については研究が進められていない。

そこで、本論ではワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用を提案する。これまでの画像処理によるオブジェクト認識や、センサネットワークではセンサノードに計算コストなどの負荷がかかりすぎる。そこで、簡易な画像入力系や高圧縮符号化を適用した場合、従来の認識手法では性能が極端に低下してしまう。本論では簡易な入力系を搭載した多数の端末をワイヤレスネットワークでつ

なび、一つの認識システムとして活用するワイヤレスセルラネットワークを提案する。ワイヤレスセルラネットワークとは、生物と細胞の關係に着目した無線ネットワークの概念である。生物は複雑な機構によって構成される。しかしながら、その機構を構成する細胞は簡易な機能しか持ち合わせていない。それら細胞の相互作用により、生命という複雑なシステムは動作している。センサノードを細胞(セルラ)に見立て、各センサノードが自律的、有機的に繋がり機能するセルラネットワークを本論ではワイヤレスセルラネットワークと定義し、その有効性を検証する。提案モデルでは、簡単なセンサにより計測される単純な取得情報を周辺の端末に送付し、これらの情報を交互に交換しあうことで環境認識を実現する。ここで環境認識とは、本論において提案する新しい認識手法のことで、端末が動作する周辺の状態を認識する手法である。現在の認識手法では、ある物体が何であるかなどを知ることが出来るが、その環境がどのような状態にあるかを推定することは難しい。本論では、単純な情報処理と簡単な情報通信しかできない多数の端末が寄り集まることで、高度な知的処理を行い、環境認識を効率的に行う手法を提案し、試作装置により実働実験を行い、実用性を評価する。図 2.1 は、提案するワイヤレスセルラネットワークの概念図である。各端末は WPAN(Wireless Personal Network)によって結ばれ、簡易な情報伝達を行っている。情報の伝達は簡易なものである。しかし、それらの関連性から相互作用が生まれ、ネットワークの持つ知識や経験をもとにネットワーク自体が知的に環境を認識する。そのことによって、環境認識を実現している。

ワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用と効率化の一例として、

- 渋滞環境認識のための渋滞環境推定システムの提案
- センサ通信最適化のための干渉低減手法の実現

を行う。

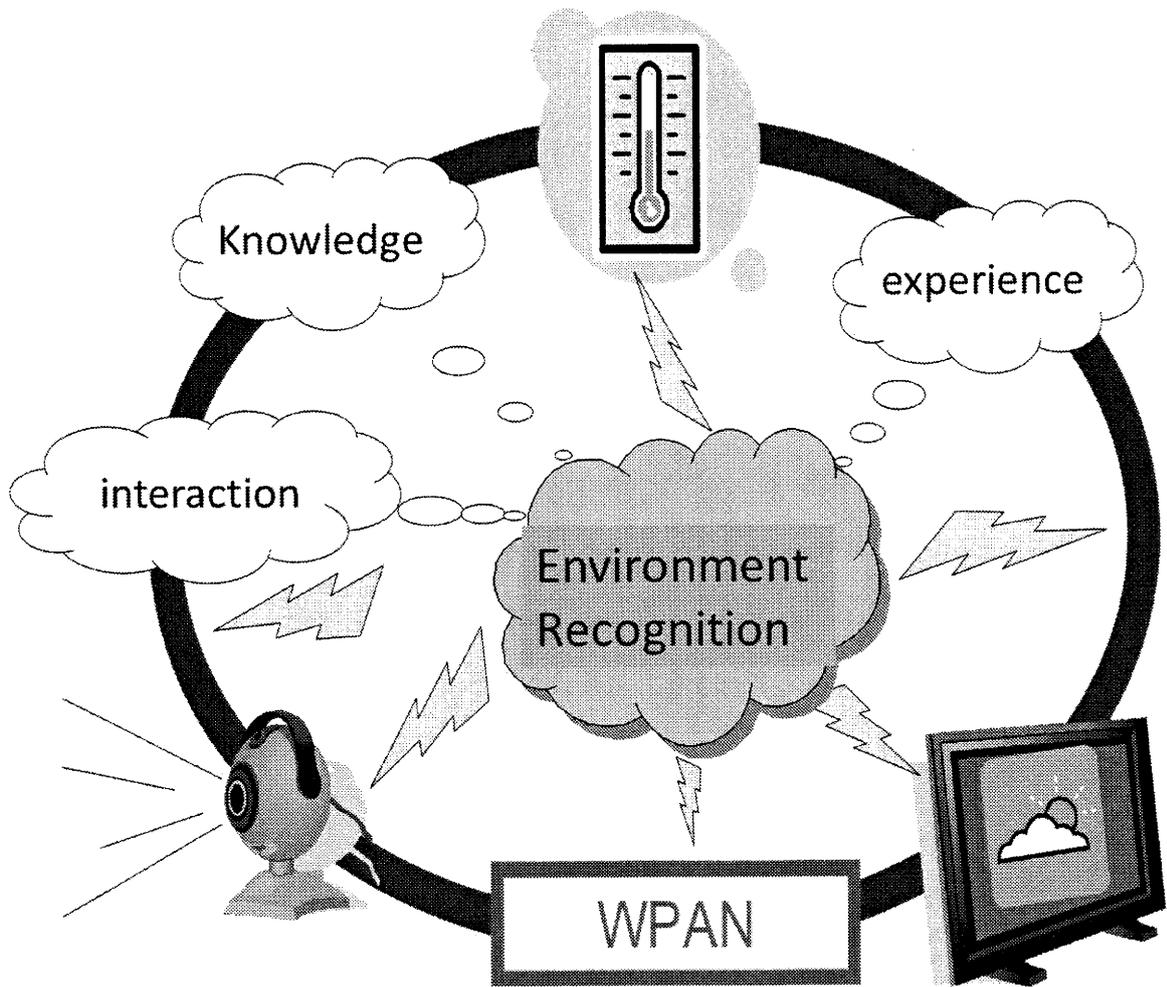


図 2.1: ワイヤレスセルラネットワーク概念図

Fig. 2.1 Environment Recognition Wireless Cellular Network Model

2.4 本論で使用するセンサノード

Jubin ら [32] によれば, Packet Radio Network(PRNET) がアメリカ合衆国の DARPA (the Defense Advanced Research Projects Agency: 国防高等研究計画局) によって 1973 年に開発された. PRNET は, 他のネットワークとインターネットのゲートウェイを通して接続可能であるなど, 現在のアドホックネットワークやセンサネットワークの基礎となる研究と言えよう. Johnson らは 1996 年の発表 [33] においてアドホックネットワークをワイヤレスモバイルホストからなるインフラストラクチャや集中的な管理を持たないものと定義している. 阪田らも同様であるという見解 [34] を示している. 阪田らによれば, アドホックネットワークとは

- 固定的なネットワークインフラが存在しない
- 集中管理機構がない
- ネットワークトポロジが動的に変化 (移動環境が前提)
- 無線マルチホップネットワーク

の各要素が定義付ける特徴がある. アドホックネットワークの標準化をインターネットの標準化機関である IETF の MANET (Mobile Ad hoc NETwork) Working Group[35] で行っている.

センサネットワークの場合, 上記のアドホックネットワークの特徴をすべて満たす必要はない. しかし, 本論の目指すワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用の場合, より柔軟により広い環境の認識を行うためにも, 上記の特徴を満たすことが望ましい.

そこで, 本論では IEEE802.15.4 に着目した. IEEE802.15.4 は WPAN (Wireless Personal Area Network) 用の標準規格の一つである. PHY(PHYsical) 層と MAC(Media Access Control) 層を標準化している. 変調方式には O-QPSK(Offset Quadrature Phase Shift Keying) を使用し, 拡散方式には DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) を使用している. また, 日本国内の場合, ガードバンドを含め 5[GHz] 単位で, 16[ch] に分割し, ISM(Industry Science Medical) 帯である 2.4[GHz] 帯を使用している. ISM 帯を使用しているため, 特殊な無線資格を有することなく使用可能である. 図 2.2 に 2.4[GHz] 帯における, IEEE802.15.4 のチャンネル割り当てを示す. また, アドレスに 2[Byte] 確保しているため, $2^{16} = 65536$ 台の端末を一つのネットワークとして接続することが可能である. 同じ WPAN である Bluetooth は 8 台が基準のため, 大規模なネットワークキャパシティを持っていることが言える. また, チップレートが 2[MHz] で, 最大通信速度は 250[kbps] となっている. これらの特徴は, センサネットワークに

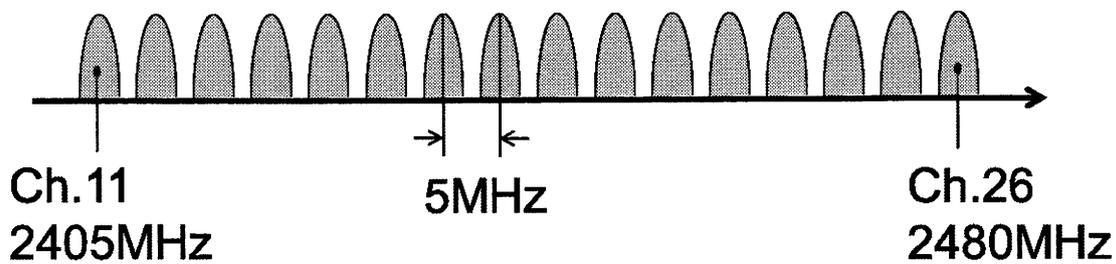


図 2.2: 2.4GHz 帯における IEEE802.15.4 のチャンネル割り当て
 Fig. 2.2 IEEE802.15.4 Channels about 2.4GHz-band

適応するにふさわしい通信規格と言える。実際、センサネットワークの研究において、IEEE802.15.4 は広く使用されている。

また、IEEE802.15.4 の上位層である、NWK(NetWoRK) 層と APS 層 (APplication Support sub-layer) は ZigBee Alliance によって仕様化され、それらの規格に則った端末は ZigBee を名乗ることができる。ZigBee のネットワークは、ネットワークを管理するコーディネータ、ルーティングの機能を持つルータ、ネットワークの末端に位置するエンドデバイスの三種類のノードによって構築される。また、そのトポロジは、スター型、ツリー型、メッシュ型など柔軟に対応可能である。ZigBee のルーティングプロトコルとして、MANET の AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)[36] が採用されている。

青野ら [37] は、IEEE802.15.4 と大平らが作成した一本の給電素子からなる電解のコントロールで指向性を電子的に制御するエスパ (ESPAR:Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) アンテナ [38] を利用した暗号鍵の作成を行なっている。青野らは、エスパアンテナの指向性を変化させられることを利用し、短い間に RSSI(Received Signal Strength Indicator) を変更し、暗号鍵の作成に利用している。また、山田ら [39] は IEEE802.15.4 の RSSI を使用した、位置計測を行っている。

このように、IEEE802.15.4 や ZigBee を使用した様々な研究、開発が行われており、その関心の高さをうかがい知ることができる。本論で使用するセンサノードにも、IEEE802.15.4 準拠の端末を使用する。本論で使用する端末には TI(Texas Instruments) 社製の CC2420 チップを搭載している。

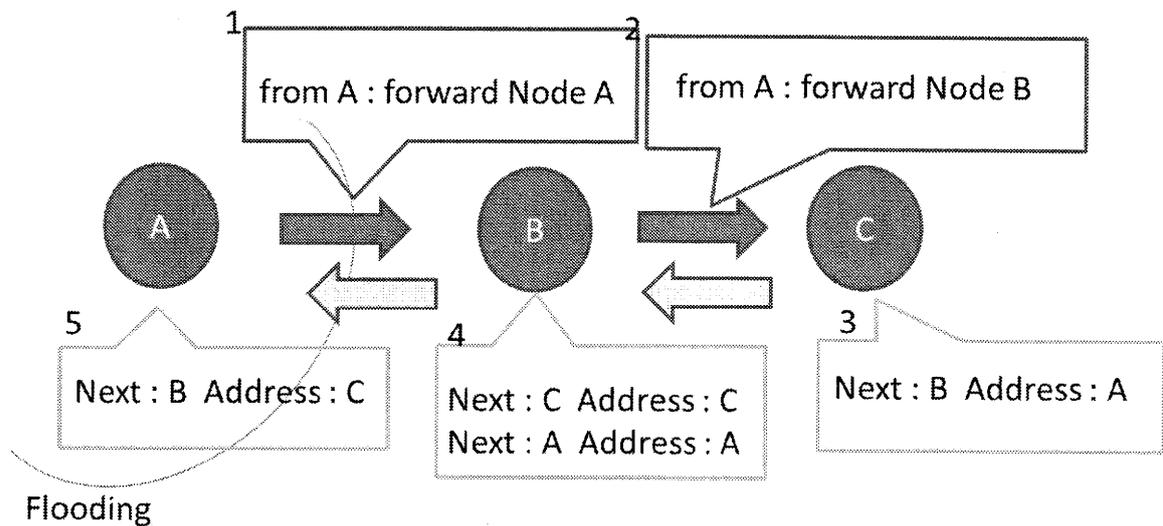


図 2.3: AODV モデル
Fig. 2.3 AODV Model

2.5 渋滞環境推定システム

2.5.1 アドホックネットワークにおけるルーティング

アドホックネットワークのルーティング手法を大別すると 2 種類に分けることができる。一つは、ZigBee など採用されている AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)[36] や Johnson らが提案した DSR(Dynamic Source Routing)[33] を代表とするリアクティブ型 (On-demand 型) のルーティングプロトコルである。リアクティブ型の特徴として、データ伝送の必要が生じた場合に、ノードは経路情報を作成し、その情報を使用して通信を行うことがあげられる。AODV の場合、送信元は隣接のノードにルートリクエスト (RREQ) パケットをフラッディングし、RREQ を受け取ったノードは目的のノードに到達するまでフラッディングを続けることで、ルーティングテーブルを完成させる。また、RREQ パケットに対するルート応答 (RREP) パケットを受信することで上り下り方向でのルーティングテーブルを確立させることができる。AODV では、各ノードがルーティングテーブルを保持している。図 2.3 に AODV のモデル図を示す。DSR の場合は、RREQ を受け取った端末は自身の ID を印加しフラッディングを行う。この機能により、RREQ のデータには、そのパケットが到達するまでにどのノードを経過したかが記載されることになる。その記載されたデータを使用し経路情報を各端末は知ることができる。図 2.4 に DSR のモデルを示す。リアクティブ型の場合、データが発生した時点で経路が決定されていくので、柔軟なネットワークを構成することができる。しかしながら、いちいちルート検索を行うため、ルート検索のためのパケット送信が多くなる問題がある。また、朴ら [40]

パケットによる定期的な隣接ノードの確認により、ノードは常に隣接ノードを確認可能で、効率的なルーティングを行うための隣接ノードの集合を保持することができる。プロアクティブ型の場合、経路情報の作成などネットワーク構築や維持に時間とコストがかかると言った問題や、端末の故障や端末の移動などで経路情報が変わる場合などに経路情報を修正しなければならないなどの課題が存在する。

リアクティブ型、プロアクティブ型ともに、利点と欠点があり、IETFでは一本化を行おうという議論があるが、現在定まっていない。そこで、1997年にHassらはZRP(Zone Routing Protocol)[42]を発表した。この手法は、ある決められたエリア内ではリアクティブ型を利用し、エリア外ではプロアクティブ型を使用するという試みである。しかしながら、この手法は、二つの混ぜあわせであり、ネットワークの設計手法の参考にはなるものの、それぞれの利点と欠点を相補的に補うものではない。

また、どのタイプのルーティングにも共通な部分として、フラッディングによるルーティングを行うことがあげられる。フラッディングによるルート探索とは、ブロードキャストの繰り返しにより、隣接ノードを調査し、最適なルート検索を行う手法である。しかしながら、フラッディングの頻度が増えるほど、冗長なブロードキャストパケットが増加し、通信路に過大な負荷を与えるブロードキャストストームが問題になっていることをNiら[43]が指摘している。

そこで、経路探索のフラッディングを抑制する手法として様々な手法が提案されている。宇津ら[44]は、端末それぞれがパケット送信状況を判断し確率的にあるいは、通信回数によって送信パケットをコントロールし、余分な再ブロードキャストを抑制する手法を提案している。

また洞井ら[45]は、センサネットワークの特徴に着目したフラッディングを行わないオーバーレイネットワーク(P2P)技術の提案を行なっている。洞井らは、センシングデータは、一つ一つのデータにそれほど価値はなく、それらが集まったときに意味が出てくるという設計思想をもとに提案手法を作成した。この手法は、センシングデータの特徴から、データが作成された時間の近いものを集約させ、地理的な位置に基づいたデータの集約化を行うことで、余分なブロードキャストを抑制する手法である。

また、小川ら[46]はアドホックネットワークに参加するノードは移動体であるとして、端末が移動中であるか否かの状態を利用することで、冗長なブロードキャストを起こさず、隠れ端末問題も解決するようなMAC層の提案を行っている。

センサネットワークやアドホックネットワークのルーティングにおいて、より効率的なデータ伝送を行うために、端末間の測距などを行い、隣接ノード間の距離の関係を知ることによって、効率的な

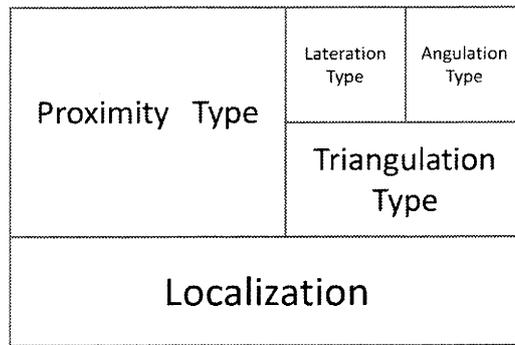


図 2.6: 峰野らによる位置推定手法の分類
Fig. 2.6 Mineno Model

ルーティングを行うことができる。そのため、端末間の位置測定は大変重要な技術となる。そこで様々な位置検出の手法が提案されている。

峰野ら [47] によると、位置推定の手法は、位置検出端末の位置を対象物の位置と推定する Proximity 型と三角関数等の幾何学的な手法を利用し推定する Triangulation 型に分類できる。峰野らによる位置推定手法の分類を図 2.6 に示す。Proximity 型は、事前に位置検出端末の位置を記録したデータベース等を用意し、その端末に近接あるいは、その端末から発せられる電界強度の強弱により位置検出端末の位置と対象物の位置を近似し推定する方式である。この手法の例として、後に説明する Sugiura ら [48] の手法が当てはまる。また、Triangulation 型は更に、二つの手法に分けられる。すなわち、位置検出端末との角度や方位を利用する Angulation 型と位置検出端末との距離により位置を推定する Lateralation 型である。Lateralation 型には、RSSI を使用するものや信号の送信時間から距離を算出する TOA (Time of Arrival)、複数の位置検出端末間での信号の受信する時間差を利用する TDOA (Time Difference of Arrival) がある。

Angulation 型には信号を受信した方位を利用する AOA (Angl of Arival) があり、代表的なものとして、指向性アンテナを利用した佐藤ら [49], [50] の研究が挙げられる。

Lateralation 型は様々な手法が提案されている。小島ら [51] は、ZigBee の RSSI (Received Signal Strength Indicator) や S/N 等から求められる LQI (Link Quality Indicator) を用いた近傍ノードの位置検出を行った。

また、高島ら [52] は、受信電力から最ゆう法を用いて、確率密度を計算するキャリブレーションを行うことで、推定を行う手法を提案した。その手法を利用した、固定ノードの数を変化させるフィールド実験において、1m 程度の推定精度で位置検出が可能であることを示した。

また、Savvides ら [53] は Medusa という端末を使用し、RSSI と超音波端末による位置推定の精度を検証した。また、その報告の中で、Savvides らはアンカーノードを使用した最小二乗法による位置

推定法式である Multilateration を提案している。しかしながら、この提案手法ではアンカーノードの配置によって位置推定の精度が落ちることが徳永ら [54] によって指摘されている。そこで徳永らは Multilateration を最小二乗法で解を導くのではなく、パラメータの埋込みにより、ルンゲクッタ法を用いる反復計算により解を導き出せる手法に拡張している。

また、Priyantha ら [55] は超音波信号を使用することで、Harter ら [56] らは、超音波センサを用いて端末間の測距を行っている。しかしながら、超音波センサなどのデバイスは、指向性の問題があり、センサノードの配置に制限が存在する。

RSSI や LQI は距離に依存するが、それ以上に環境による影響を受け易い。Whitehouse らが行った RSSI と GPS を利用したノードの位置推定の研究 [57] においても、そのことが指摘されている。Whitehouse らの研究では RSSI を用いるものよりも GPS を利用する手法のほうが高い精度で位置を推定可能であるとしている。また、同様の指摘を、超音波端末 Medusa と RSSI を使用した比較を行った Savvides ら [53] が行っている。そこで、RSSI や LQI と言った値を直接使うのではなく、大小関係のみに着目して位置を推定しようという試みが山田ら [39] によって提案されている。山田らは非計量多次元尺度法と言う手法を使い、アンカーノードとターゲットノードそれぞれの位置関係を推定することで、ターゲットノードが多くなるにつれ位置推定誤差が小さくなる手法を提案している。しかしながら、この手法は、集中管理機構を要するため、アドホックネットワーク的ではない。

移動端末の測位のために、信号の到達時刻を用いる手法としても TOA や TDOA を用いる様々な手法が提案されている。TOA は到達信号の時刻により位置を検出する手法である。しかしながら、TOA のみによる位置測定は、アンカーノードとターゲットノードのすべてが時刻同期を行っていないとならず、実現するには過大なコストがかかる。TDOA は信号の到達時間差を利用する手法であり、時刻同期はアンカーノードのみでよく、ターゲットノードが時刻同期を取る必要がないため、比較的実現が容易である。

川端ら [58] は TDOA の問題点として、マルチパスによる到達時間差が存在するため正確な位置測定が難しいことを指摘し、解決案として最尤推定法を用いる手法を提案している。

谷口ら [59] も、TDOA の問題点として、マルチパスフェージングと見通し外伝搬による精度の劣化であると指摘している。そこで、谷口らは階層型粒子フィルタを利用した TDOA のフィルタリングにより、それらの問題を解決する手法を提案している。谷口らの使用した階層型粒子フィルタは、Godsill らが提案した非線形な状態空間におけるモンテカルロフィルタ [60] を二重に行う手法である。Godsill らのモンテカルロフィルタは、マルチパスや見通し外伝搬による影響を考慮していないため、

谷口らは第一階層において、非ガウシアンの状態空間モデルを利用し、マルチパスの影響を除去している。さらにマルチパスの影響を除去した信号を第二階層において測位に使用する。

志村ら [61] は、TDOA を解く問題は、非線形の連立方程式を解く問題であるため、非線形連立方程式を解く方法として重み付けを変化させられるテイラー級数推定を用いて TDOA の解を求めるアルゴリズムを提案している。

TOA や TDOA においては、時刻同期が重要な技術となる。しかしながら、時刻同期による冗長なパケット通信は、ネットワーク負荷の増大につながる。そこで、徳永ら [62] は、隣接ノードの動作を監視し、時刻同期の可否を判定することで、冗長なパケット送信を抑えつつも、ネットワーク全体で時刻を伝播することができる手法を提案している。

また、古賀ら [63] は TDOA を航空機衝突防止装置 (ACAS: Airborne Collision Avoidance System) に応用し、仙台空港におけるフィールド実験によって動作を確認している。古賀らもマルチパスの影響による誤差を指摘している。

また、データの伝達方法として、フラッディング手法とは別にアドホックネットワークでの情報伝送に群でデータを伝送しようとする群伝送の試みが群ら [64] によって提案されている。これまで、IETF(Internet Engineering Task Force)[35] の MANET(Mobile Ad hoc NETwork) などによる標準化を代表するような様々なルーティング手法が提案されている。ほとんどの既存手法は、通信相手の経路発見と経路確立後の経路の維持を行う。このようなシステムでは、事前に最適なルートを決めたり、定期的な経路確認を行う必要がある。システム全体で複雑な通信手順を実行する必要が出てくる。そこで、群らはノードの構成が簡易でありながら迅速な経路選択が行えるように、決められた最適ルートを転送するのではなく、同じ情報を複数のノードで共有しながら伝送する群伝送アドホック通信を提案している。群伝送において各ノードは特定の通信相手ではなく、伝送する方向にあるノード群に同一のデータの伝送を行う。その受信したデータと雑音電力比等を求め、情報の尤度を決定し、転送するか否かを決定する。その繰り返しによって、ネットワーク全体へのデータ転送が行われる。この手法は、耐故障性やデータの品質保証などに優れている。また、尤度情報の伝播によって、通信路を決定することで、下りから上りへの逆方向の通信も可能にしている。

以上のようにアドホックネットワークにおいて、様々なルーティング手法が提案され、実現されている。本論では、これらのルーティング手法をもとに渋滞距離推定システムへの応用を行う。また、本論で提案する渋滞距離推定システムは、渋滞という環境を利用した距離推定手法であり、多くの研究で用いられるアンカノードを用いない手法であるため、峰野ら [47] が分類した位置推定の手法の

いずれにも分類不能な手法となる。

2.5.2 渋滞認識手法

近年、情報技術を取り入れた交通システムの高度化を行う ITS (Intelligent Transport System) の研究が盛んに進められている。

藤井 [65] によれば、ITS の萌芽的研究は 1960 年代に遡ることができ、日本で官民一体の国家的な活動として推進されるようになったのは、1996 年 7 月に警察庁、通産省、運輸省、郵政省、建設省の関連 5 省庁が“ITS 推進に関する全体構想”を策定してからであるとしている。全体構想を策定してから約 15 年で、カーナビゲーションシステム、道路交通情報通信システム (VICS: Vehicle Information and Communication System)、電子料金收受システム (ETC: Electronic Toll Collection) などの普及に見られるように、大きな成果を得られている。また、ITS の国際標準化活動として 1992 年から ISO/TC204[66] において、16 のワーキンググループによって作業が進められている。また、日本国内においては、社団法人自動車技術会に設置された ITS 標準化委員会が作業に当たっている。標準化作業の他にも、様々な研究が行われている。

齋藤ら [67] は、複数の通信設備を搭載した車両による、車々間通信と路車間通信を併用した場合の、ITS における経路選択を行っている。実際にそのような環境を構築するには、社会的なコストや端末のコストが多分に掛る問題がある。

金ら [68] は、長谷川らが提案している一つの道路を OS(Operating System) のように捉え、基本走行機能、リアルタイム位置特定機能、リアルタイムシームレス通信機能の基本三機能と定義した機能を提供するドット ITS[69] をもとに、MSLM (M-Sequence Lane Markers) システムを適用させた高速道路と一般道路の交差点でのリアルタイム位置計測を提案している。MSLM は長谷川らが提案した、M 系列の拡散符号を使用した磁気マーカを道路上に埋め込み位置情報を高速に検知する試みである。金らの研究は、GPS を使用しない位置特定であるため、トンネル内や都市部での位置測定に適してはいるが、インフラストラクチャに磁気マーカを設置しなければならず、大変なコストが必要になる課題がある。

その課題の解決のために、金らは MSLM ではなく、道路にペイントを施しそのペイントを赤外線カメラで撮影し、M 系列マーカとして利用し車両位置を測定する提案 [70] を行っている。このような技術は、近年、拡張現実感として研究が盛んに行われている。マーカを用いた研究として久保らは 3 次元コード化された動画像マーカを使用し携帯電話向けの楽譜情報再生手法 [71] を提案している。

この手法は、携帯電話向けの手法であるため、車載端末に携帯電話を利用しようとする場合、コストを抑えることが可能である。また、武富ら [72] はランドマークをマーカとして利用する手法を提案し、実時間によるカメラの位置と姿勢の推定を行なっている。また、画像のパターンマッチングは専用のハードウェアを用いなければ並列で処理が行えないため、処理時間が遅くなってしまう。そこで、安永ら [73] は FPGA (Field Programmable Gate Array) を利用し、ハードウェア設計からの顔画像識別の高速化を行い、600[ns] というナノ秒オーダーで認識を成功させている。これらの技術を利用することが出来れば、車両位置の推定に応用可能である。しかしながら、これらの研究は発展途上の技術であり、ITS の分野に応用した例は少ない。また、金らの提案 [70] は、赤外線カメラなどが必要であるため車載端末のコストが問題となっている。また、道路に埋め込むタイプの M 系列マーカを使用した測位手法に比べコストは低いものの、ペイントが剥がれる等の道路の保守コストは依然として課題である。

そこで、インフラ側に負担の少ない車々間通信による ITS の研究が行われている。Ari らは車々間通信のシミュレータ [74] の作成を行った。さらに Ari らはそのシミュレータを使用し、車々間通信が道路交通にどのような影響を与えるかを事故発生率等から求める研究 [75] を行っている。この実験モデルは 2,3 車線の場合であることと、車両長が同一であること、通信距離に電波伝搬の概念がなく一律に設定していること、搭載端末数 (普及率) が 0[%],50[%],100[%] の値しか取っていないことなどの問題点がある。

また車々間通信の例として、無線通信機器搭載車両をセンサのプロープに見立て、プロープによって計測された情報を加工しユーザに提供するプロープカーシステム、プロープパーソンシステムの研究開発が行われている。

イギリスの研究グループである Brackstone ら [76] はシカゴ市の道をモデル化した道路上で、4000 台のプロープカーによるシミュレーションを行った。また、Zou ら [77] によって、タクシーをプロープカーとして使用し、プロープ情報として GPS を使用する手法が提案されている。

砂原ら [78] は、自動車はブレーキサポートシステムである ABS(antilocked braking system) やタイヤの空転を制御する技術である TRC (Traction Control System) などのために各種センサを搭載しているが、その情報は一台の自動車だけで閉じていると指摘している。それらの情報を位置情報と合わせ、多くの車両から一極に集めて処理することにより、より有益な情報を提供することが可能になると考え、インターネットを利用した IPCar というプロープカーシステムを提案し、300 台の実験によって、動作を確認している。

大規模なプローブカーシステムのフィールド実験は、2002年1月から3月にかけて、時津らによって、名古屋で行われた[79]。この実験は、1570台のタクシーから位置情報、速度、ワイパーの動作状況等を情報センターに送信し、道路交通情報の収集等に役立てるために行われた。この実験以降、この実験データは様々な研究へ応用されていくことになる。

若山ら[80]は、時津らの実験において、通信機器搭載車両における通信料金が、タクシー会社のコストを圧迫している点に着目し、データ通信料の削減を目指して研究を行なっている。先行研究において、定期的に送信していた情報を連続走行距離、発車、停車の各状態への変化をトリガとして送信する手法に変えて、送信する情報量の削減を行なっている。この手法では、右左折の多い箇所において、情報送信端末を見失う問題点がある。しかしながら、端末数が多い都市部の場合、端末が相補的に情報を補うことが可能であると推察されている。

熊谷ら[81]は、プローブカーのデータ収集には、若山らの研究のように、欠損が生じることを踏まえ、それらを補う手法を提案している。リンク(経路)間の相関に着目し、フーリエ変換による特徴空間への射影と同様の手法により、欠損した情報を推定補完する手法を提案している。また、プローブカーによる情報のみからではなく、道路に設置した端末からの情報を利用することによって、プローブカーの情報欠損を補う手法を提案している。

また、プローブパーソンの研究例として高山ら[82]の研究がある。高山らは、機械的に判断しにくい路面の凍結状況を人が判断し、人をプローブ情報として捉え集約し、ネットワークを使用し凍結情報の提供を行う手法を提案し、実装している。

このように、ITSの研究やプローブカーの研究が進められている。しかしながら、情報の集中管理機構を要する必要がある、アドホックネットワーク的ではない。また、それらの情報が必要な端末は、それらの情報が収集された場所に近い位置にいることが考えられるため、集中管理を行うよりもその場で情報を収集し、配信する仕組みを作ったほうが通信コストの点を考えても有用である。そこで、本論では集中管理機構を要する必要のない渋滞距離推定システムをワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用例として提案する。

2.6 干渉低減手法

本節では、通信における干渉低減手法について説明する。

2.6.1 CSMA

1976年 Robert M. Metcalfe らによって、“Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks” [83] という論文が発表された。この論文は、Ethernetが提案された世界初の論文である。特に、名前こそ示されていないものの、多端末が接続されるネットワークの干渉回避手法として、CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) が世界で初めてこの論文によって提案されている。

CSMA/CDは有線の通信で用いられるパケット衝突検知手法である。パケット衝突を検知した場合、一旦通信をやめ、乱数によって発生させた待ち時間を利用し、パケット衝突が無くなった場合に通信を行う。このような動作で、多端末による通信を実現している。

有線通信では、パケットの衝突を検知することが可能なためCSMA/CDが動作するが、無線通信の場合、パケット衝突の検知と正常な通信を区別することが出来ずCSMA/CDを用いることは出来ない。

そこで、無線通信のためにCSMA/CDを拡張したCSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) が、様々な無線通信規格で使用されている。

2.6.2 CSMA/CA

CSMA/CAは、CSMA/CDと違いパケットの衝突を検知するのではなく、パケット通信そのものを検知し、パケット通信が使用チャンネルで発生していた場合、検知した端末がランダムな待機時間を設け、パケット衝突自体を回避する手法である。

近距離無線通信規格であるIEEE802.15.4でも、CSMA/CAが用いられている。図2.7はIEEE 802.15.4のノンビーコンモード (beacon-less mode) における、CSMA/CAの動作アルゴリズムを表している。標準で、 BE_{min} は3、 BE_{max} は5、 $MaxBackOff$ は4と定められている。

まず端末は、CSMA/CAのための初期値を設定する。次に、0から $2^{BE} - 1$ までのランダムなBackoff periodだけ待ち時間を発生させる。このとき1 Backoff periodは理論値で $320\mu sec$ である。待ち時間が経過した後で、端末はCCA (Clear Channel Assessment) を行い、使用する周波数が空いているかどうかを判断する。使用する周波数が空いていた場合は送信の処理に進む。使用する周波数が空いてい

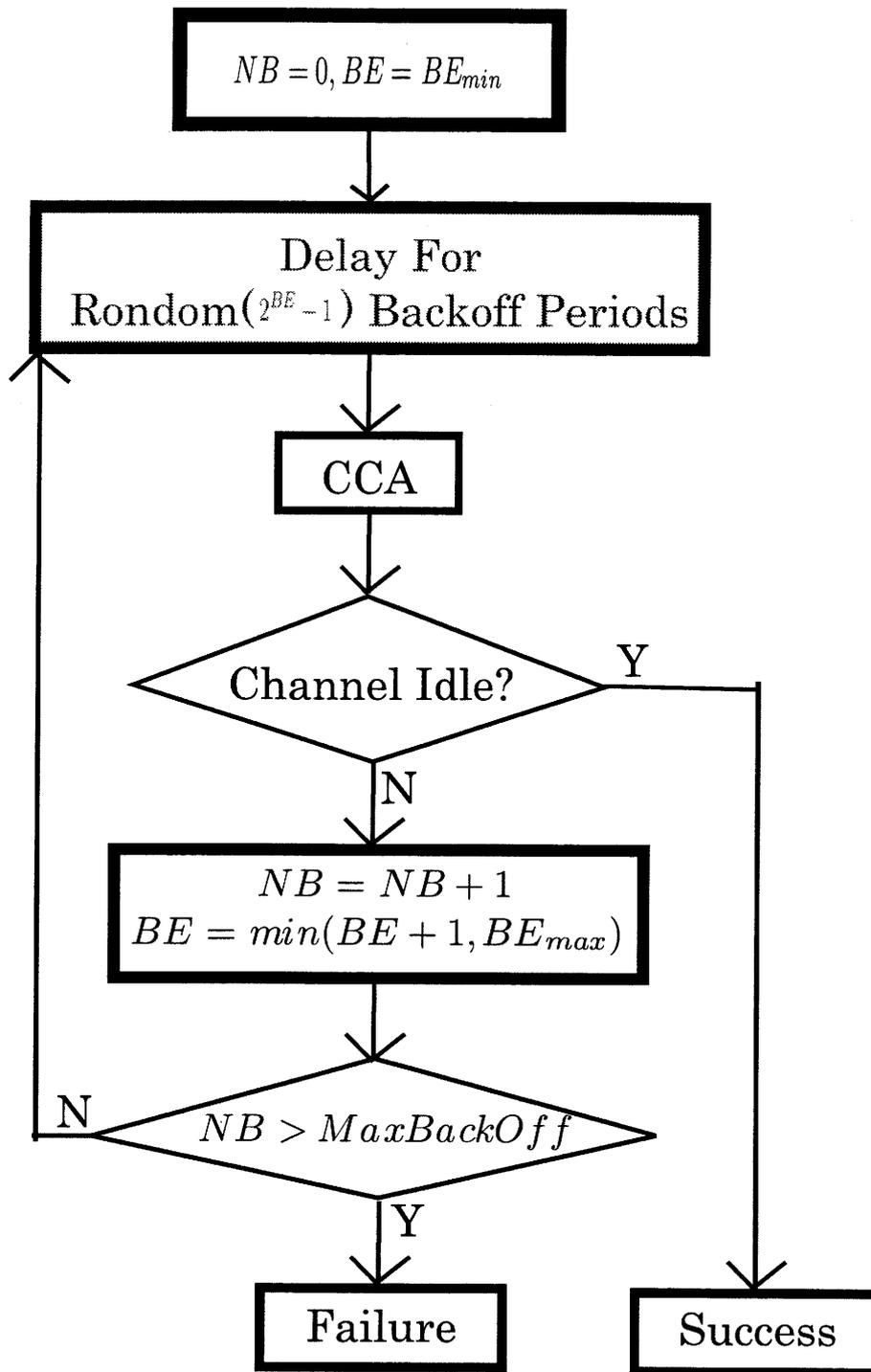


図 2.7: 周波数分割多重概要図
Fig. 2.7 CSMA/CA Algorithm

なかった場合は NB に 1 を加算する。 BE は $BE + 1$ と BE_{max} のうちの小さい値に更新される。 NB の値が $MaxBackOff$ より大きい場合は、通信は失敗する。 NB の値が $MaxBackOff$ より低い場合は、0 から $2^{BE} - 1$ までのランダムな Backoff period だけ待ち時間を発生させる。端末は以上の処理を繰り返す。例えば、2 回目の待ち時間は 0 から $(2^4 - 1)$ までのランダムな値に $320\mu sec$ を乗じた値となる。この様に IEEE802.15.4 の CSMA/CA は確率的にパケット衝突を回避する手法である。しかし、こ

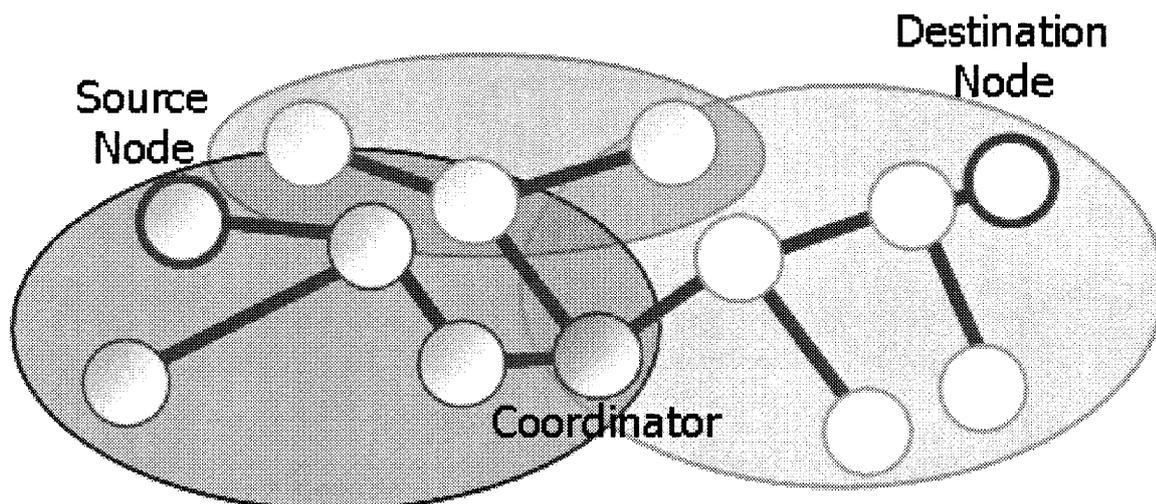


図 2.8: 周波数分割多重概要図
Fig. 2.8 Frequency division multiplex

の手法の場合、端末の数が多くなるにつれて CSMA/CA 自体の待ち時間が増加し遅延の原因となる。また、この手法は乱数によって衝突を回避する手法であるため、端末の数が増加するほど衝突する確率も増えていく。さらに伝送するパケットサイズが大きくなった場合、通信にかかる時間も増す。そのため、CSMA/CA による待ち時間に対して通信にかかる時間が増すことによって CSMA/CA の効果が出にくくなることが考えられる。

2.6.3 IEEE802.15.4 の周波数分割ネットワーク

マルチホップネットワークにおいて任意の端末間で情報の配信を行うとき、端末間干渉は重大な問題になってくる。CSMA/CA を用いて通信を行った場合に、同じ周波数帯に干渉波が存在する場合スループットの低下やタイムラグが発生してしまう。リアルタイム性を持ったネットワークの場合、このようなスループットの低下やタイムラグの発生が問題となる。そこで、目的に応じて使用周波数を分割することで、干渉を低減させる周波数分割ネットワークが野村らによって提案されている [84]。提案されている周波数分割ネットワークは、Fig.2.8 のように複数の周波数によって分割されたネットワークが混在している場合、ネットワークの混在する点に管理端末 (Coordinator) を配置し、ネットワークごとに PAN-ID (Personal Area Network Identification) と周波数を、アドレスとして割り当てることで、IEEE802.15.4 端末間の干渉を低減する手法である。

2.7 本論の関連研究

ワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用事例として様々な研究を行っている。本節では、それらの代表的な物の説明を行う。

2.7.1 項では、ワイヤレスセルラネットワークを児童の通学路安全システムに適応した研究 [48] の説明を行う。

2.7.2 項では、干渉低減手法の一つとして、ネットワーク内で周波数分割を行い、IEEE802.15.4 で画像のマルチホップ伝送を行った研究 [85] の説明を行う。

2.7.3 項では、ワイヤレスセルラネットワークをバレーボールの動作検知に適応した研究 [86], [87] の説明を行う。

2.7.4 項では、ワイヤレスセルラネットワークのセンサ端末の設置方法の一つとして、有線の滑車に IEEE802.15.4 の通信を適応した研究 [88] の説明を行う。

2.7.1 ワイヤレスセルラネットワークの通学路安全システムへの適応

近年、児童をめぐる事故や事件が多発しており、政府、自治体、NPO などが犯罪から子供を守るための各種対策を展開している。事故や事件を未然に防ぐべく、登下校時における児童の位置確認に対する需要が増している。そこで、IEEE802.15.4 を用いることにより低コストで位置確認が構築できるシステムの考案を行う。IEEE802.15.4 は、低速ながら、低コスト、そして、約 65000 台の端末を 1 つのネットワークで利用できるという、高いネットワークキャパシティを持つという特徴がある。

しかし、IEEE802.15.4 が通信に用いている 2.4Ghz 帯は、無線 LAN といった多数の近距離無線通信機器が使用している帯域である。そのため、通信出力が弱い IEEE802.15.4 は、他の無線通信機器の影響を顕著に受ける。また、本提案手法のようなシステムでは、同一周波数チャンネルに、多数の AP(Access Point) や端末が存在し、通信遅延や衝突の発生により、通信の質が低下する。そのような問題点を解決するために、我々が研究している IEEE802.15.4 による周波数分割多重 [84], [85] の技術を用い、精度の高い位置確認システムを目指す。さらに、本システムが小学校での通学児童の位置確認において有効であるか、実際に小学校で実働実験を行いシステムの検証を行う。

本研究では、IEEE802.15.4 を用いた通学児童の位置検出を行うシステムを構築し、小学校での実働実験を行った。本システムは、位置検出にあたって周波数分割多重を用い、AP 間、AP-端末間の電波干渉を低減することで位置検出の精度をあげた。周波数分割多重の有効性を検証する基礎実験では、無線 LAN の影響を受ける周波数チャンネル 1 つの場合に比べて、約 2 倍の端末取得台数率となった。ま

た、400 台のダミー端末情報をシステムに流し、端末の位置情報が取得可能であることを確認した。さらに、これらの基礎実験から得られた結果をもとに、実際の小学校で本システムを構築し、実働実験を行った。実働実験の結果、400 台近くの端末が存在していても、AP 経路の上流であるコーディネータは、約 100%の捕捉率で端末を捕らえていた。また、通学路上の AP の端末捕捉率は約 85%の捕捉率を実現でき、児童の位置を把握するにあたって有効な範囲内であると実証できた。

2.7.2 画像マルチホップ転送ネットワーク上での周波数分割を用いた干渉低減手法

大量の端末がネットワークに接続されるユビキタスネットワーク社会では目的に合わせて個々の機器の設定をその都度手動で変更するのは不可能に近く、人、モノの状況やそれらの周辺環境等、様々な状況や環境を自動認識し自律的な情報流通に基づいて最適な動作を実現する技術が必要となる。現在、広く普及してきている電子タグなどの、静的な情報や属性情報のやり取りを目的とした技術から、人やモノの周囲の状況などの情報を認識し、動的な情報を発信するための高度なセンシングや映像認識とネットワークが結びついた“ユビキタスセンサネットワーク技術”が必要になる。周囲の状況を認識する方法の1つとして、周囲の状況をカメラで撮影し、その画像を転送するワイヤレスセンサネットワークが考えられる。そこで、ZigBee を基にしたマルチホップネットワークによる画像転送のシステムを構築する。マルチホップネットワークでは、狭い範囲に複数の端末が通信を行う場合がある。その場合、電波干渉の影響や ZigBee のアクセス制御により、スループットが低下する。その低下を防ぐために、周波数分割多重方式 [84] を適用した画像伝送マルチホップネットワークを提案する。提案方式を用いた IEEE 802.15.4 MAC 上のプロトコルスタックを実装した実機実験を行う。その実験において、提案方式を適用した場合のスループットの向上度を評価し、提案方式の有用性を検討する。

提案方式を組み込んだ実験により、提案方式の有用性を確認した。提案方式により、1 ホップあたり 6[msec] のスループットの改善を確認した。また、離れた場所にある無線 LAN が IEEE802.15.4 の CSMA/CA にも影響を及ぼすことを確認した。さらに、IEEE 802.15.4 の通信において、約 2[kByte] の画像データを約 0.55[sec] で転送できることを確認した。この転送時間において、提案方式を用いることにより、7 ホップ時で 25[msec] の改善は有用であるといえる。

2.7.3 ワイヤレスセルラネットワークのバレーボール動作検知システムへの適応

近年、スポーツ分野においても、サッカー選手の位置検出などスポーツ選手を支援するための研究が世界中で行われている。中でもバレーボール競技は、データ分析ソフトウェアの開発、利用が盛ん

なスポーツで、ナショナルチームや強豪チームなどでは必需品となっている。そこで、我々は、サーブやスパイクなどの“イベント情報”や攻撃位置やレシーブ位置などの“位置情報”を入力し、統計やボールの軌跡表示を PC 上で行う、バレーボールのデータ分析ソフトウェアに注目した。現在、既存するバレーボール用データ分析ソフトウェアは、キーボードを使用した入力のため、入力遅延や人為的なミスなどが非常に起こりやすい。また、タッチパネル付き PC を使用したソフトウェア [89],[90]も提案されている。しかし、入力の簡易化は行えるものの人為的なミスの危険性は以前高い。

そこで我々は、人の位置検出を自動取得することで、入力操作を省くことが可能となり、既存ソフトウェアが抱える問題点を解決できると考えた。スポーツを対象とした位置検出に関する先行研究として、サッカー競技を対象とした研究が挙げられる [91]。これは、カメラで取得した画像からサッカーボールの位置検出を行うものであるが、選手が重なった場合位置検出ができていないなどの問題や処理分解能の問題からリアルタイムで処理するには限界がある。

そこで、無線通信を使った位置検出を行う。まず、AP 数による位置精度の評価を行ったところ、3 箇所 1m メッシュの正解率は 40%、8 箇所 1m メッシュの正解率は 95%という結果が得られた。AP の数が多いほど、正解率が上がることが確認でき、また 8 基の AP を配置することで、バレーボールのデータ分析ソフトウェアに適用できる精度で位置検出可能なことが分かった。次に、バレーボールの競技人数である 6 人に対応できるかを調査するための実験を行った。その結果、リアルタイムで 6 人計測しても位置精度の劣化がみられなかった。また位置検出にかかる時間も、データ分析ソフトウェアが要求する時間 (1 秒) 間隔以下であったので、選手全員に適用可能である。さらに、人体に装着した状態でも、一人に 1 台とりつけた場合と 2 台とりつけた場合では、後者の方が 20%から 30%ほど良くなっていることを確認した。これは、人の前と後ろにつけることで、人による干渉を低減できたためである。これらの実験により、位置検出システムにより取得した位置情報を、バレーボールデータ分析ソフトに適用することは十分に可能であることが分かった。

2.7.4 IEEE802.15.4 センサ端末の有線による伝送

搬送車は工場の中で材料や製品などを運ぶために使用されている。この搬送車は無人で動くものが多く、レールや地面などに敷設した線に沿って移動する。レール上を移動する搬送車には、離れた場所から操作するために専用の通信回線を設けているものもある。しかし、これでは駆動電圧がかかるレールの他にも、操作するための専用回線を敷設する必要があり、設置コストが発生する。そこで、電力線通信 (PLC:Power Line Communication) を使用して搬送車を操作する試みがある。しかし、レー

ルの湾曲部などで通信が遮断されることがある。この原因は搬送車がレールから僅かに離れるためと考えられる。本研究では無線通信規格である IEEE802.15.4 を利用して、通信信号をレール上の電圧に重畳させ電力線通信を行う。これにより、搬送車とレールが離れてもレールから出る電波を用いて通信が可能になると考えた。この手法が有効であることを確認するために電力線を切断し、その距離を変化させて通信の可否を確認する。

電力線を切断した通信では、0.675[mm] から PER (Packet Error Rate) が高くなり、1mm を超えるとまったく通信ができなくなった。また、0.540[mm] までは有線による通信と比べて PER に大きな差は出していない。この結果より、0.675[mm] までは PER が 5.0%以下で通信可能であることが確認できた。また、PLC は有線で通信することを前提としているため、非接触の通信を考慮していない。そのため伝送路から離れた場合、通信不能になる可能性がある。対して、IEEE802.15.4 は無線通信規格であるため非接触で通信が可能である。結果より、IEEE802.15.4 を使用することにより、0.675[mm] まで非接触の通信が不具合なく可能であることが確認できた。

2.8 本論の原理

画像処理によるオブジェクト認識では、端末の様々なコストに課題がある。そこで、センサネットワークにおいて環境を認識しようという試みがなされている。本論では、センサ端末を細胞として捉え、動作する機能の少ない細胞が集まることによって、複雑なシステムを形成し、自律的であり柔軟に接続可能な環境認識を行うワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用手法の提案を行う。この手法は、高精度な入出力系を持つことがなく、簡易な通信手法とコストの低い端末を使用することで、端末同士の相互作用により、複雑に変化する環境を柔軟に測定しようという試みである。また、端末同士のデータのやり取りだけでなく、そのデータがどのような状態にあるのかといった通信路の情報や、これまでシステムには必要がないだろうといった理由で捨てられてきたデータを繋ぐことで、既存のデータに新たな価値を見出すことを目標としている。これまでの提案手法は、システムの内部で動作が完結していた。そのため、他のシステムとの共存と言う視点にはなかなかいたらなかったと言える。しかし本論では、システムは独立しているわけではなく他のシステムと共存しているという視点を導入することにより、情報の価値を見直しシステム自体が環境を認識することによって自律的に最適な形へと変化していくシステムを目指す。

ワイヤレスセルラネットワークを実現する上で、端末の設置が必要になる。しかしながら、設置する端末の数が少なすぎる場合、精度の粗い測定になってしまう。また、端末の数が多すぎる場合、様々な問題が発生してしまう。例えば、データ伝送経路の時に発生してしまうようなブロードキャストストーム問題などである。それらの解決手法として様々なルーティング手法が提案されている。また、効率的なルーティングのために、端末間の位置を測定する研究が盛んに行われている。しかしながら、それらの研究の多くは、固定ノードを利用することで位置の測定を行なっている。これでは、本論で目指す柔軟なネットワークの構築が行えない。そこで、ワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用例として、渋滞環境という特殊な環境における、渋滞距離の推定を行う手法を提案する。渋滞距離推定を行うことは、ITSの分野や距離推定の分野、ルーティングプロトコルの分野など多岐にわたって使用可能な技術の開発につながる。そこで、本論で提案するワイヤレスセルラネットワークを適応することで、それらの分野への貢献を行う。

また、ネットワークに参加する端末の数が増えた場合、現在使用されているCSMA/CAによる衝突回避では、無駄な待ち時間が発生してしまう。そこで、本論では端末を時間ごとのグループに分割し、CSMA/CAを併用することによる干渉低減手法の一つとしてTGD (Timing Group Division)を提案する。さらに、ワイヤレスセルラネットワークに応用するために、RSSI(Received Signal Strength

Indicator) を利用した自律分散システムへの応用手法を提案する。ほとんどのアドホックネットワークやセンサネットワークでは無線通信システムを使用しており、CSMA/CA は基盤的な技術の一つである。しかしながら、センサネットワークに普及に伴い CSMA/CA では対処しきれない数のパケットを処理する必要性が出てきた。本論で提案する TGD は、それらの分野へ多大な貢献が行えるものである。また、既存の手法は、サーバなどの中心端末を必要とするものであるが、本論の提案は、自律分散システムへの適応が可能である。このことは、アドホックネットワーク技術、センサネットワーク技術全般に有用な成果であると言える。

第3章 渋滞環境推定システム

3.1 Introduction

近年、様々な高度道路情報システム (ITS: Intelligent Transport Systems) が提案されている [92]~[95]. その中でも、渋滞をとり扱う分野の研究がある [96]. 既存の様々な渋滞距離推定の手法は、ネットワークに接続できる端末数の制限や、道路などのインフラに頼ったシステムになってしまい、コストや保守点検等の面から実現が困難になるなどといった問題点がある.

そこで、Probe Car[80],[81],[97]が注目を集めている。Probe Car System は走行中の車をセンサ端末としてとらえる。Probe Car 同士をネットワークで結ぶことによって道路上のインフラに依存しないシステムの開発が可能になる。しかしながら、多くの Probe Car System はサーバによる集中管理方式をとっている。これは Probe 情報が増大していくにつれ、通信コストの増大が問題になってくる [80].

そこで我々は、道路に端末を設置する必要のない構築の容易で通信コストの増大を抑えられるような渋滞距離推定システムを提案する。

そのような通信として、我々は IEEE802.15.4 [98]~[100] に着目した。IEEE802.15.4 はセンサネットワークを構築するための近距離無線通信規格として策定された。そのため我々は Probe Car System と IEEE802.15.4 の親和性は高いと考えた。

IEEE802.15.4 は一つのネットワークに接続できる端末数が多い。しかし、IEEE802.15.4 の通信による直接的な距離測定は精度が粗く実用的ではない [101].

また通信において、干渉低減や通信速度の向上を目指す方法として、分割多重化が研究されてきた。IEEE802.15.4 は、M-ary 拡散系列を用いた直接拡散を各チャネルで行っている。しかしこの手法では、端末数が増加した場合、端末間干渉や他の無線通信により、通信スループットが低下する恐れがある [99]. そこで我々は、これまで提案されている IEEE802.15.4 の周波数分割多重による多重化を行い干渉低減や通信スループットの低下を抑える手法を本システムに採用する。我々は、IEEE802.15.4 が 2.4GHz の周波数帯域を 5MHz ごと 16 チャネルに分けて使用していることに着目し、IEEE802.15.4 を拡張した周波数分割多重を提案する。

本研究では IEEE802.15.4 の通信と周波数分割多重による通信を併用することで、干渉低減を実現

した通信方式を採用する。さらに、その通信方式を用い、ワイヤレスネットワーク全体で渋滞距離の推定を実現する。

我々は渋滞を想定したシミュレーション実験と、実際の端末の局所的な動作を検証する実験を行った。シミュレーションにはモンテカルロ法を用いた。また、端末の局所的な動作を検証する実験は、実際に端末を配置し周波数分割の特性を測る実験を行った。

3.2 原理

3.2.1 IEEE802.15.4

一般に渋滞は不特定で膨大な数の端末によって構成される。接続できる端末数が多いネットワークを構築するために、我々は近距離無線通信規格 IEEE802.15.4[98] を使用する。IEEE802.15.4 は、 2^{16} のネットワークアドレス容量を確保しているため約 65000 台の端末を一つのネットワークに接続することが可能である。

しかし、IEEE802.15.4 の通信をそのまま渋滞ネットワークに応用しようとした場合、多数の端末が同時に通信する場合があります、端末間干渉が問題となる。

そこで端末間干渉を低減し、スループットの低下を避けるために我々は周波数分割多重化手法を IEEE802.15.4 に応用する。

3.2.2 Traffic congestion

一般に渋滞は、何らかの原因で道路の容量が満たされ交通が停滞または停止することにより、発生する [102]。一般の道路において、キャパシティが限界である場合に、一台の車が停車または減速することで、後続車にその情報が伝わり、それによって渋滞が発生する場合がある。つまり、渋滞とは、後続車が存在し、前方からの停車または減速といった情報が次々と伝播されることによって確立される、単方向のネットワークと捉えることができる。そこで我々は渋滞を、前方よりの停車または減速を後方に伝えることで確立されるネットワークであると定義する。また、一般に交差点での待ち行列の発生は渋滞とはみなされない。従って、本方式でも車列の n 番目からを渋滞とするといったフィルタリングで対応することが可能となっている。しかしながら、例えば VICS では道路に設置してある端末の下に車が停車していた場合等、たとえ渋滞していなくとも渋滞と判断され情報が伝送される。また、何 km からが渋滞で何 km までが渋滞でないかという指標は判断をする対象によりまちまちで定義としては存在しない。したがって、渋滞を判定するシステムの多くは情報を受け取る側に最終的な判断を任せている。本方式でも、その点の自由度を持たせるため、渋滞の定義のなかに行列の長さなどは含まない。

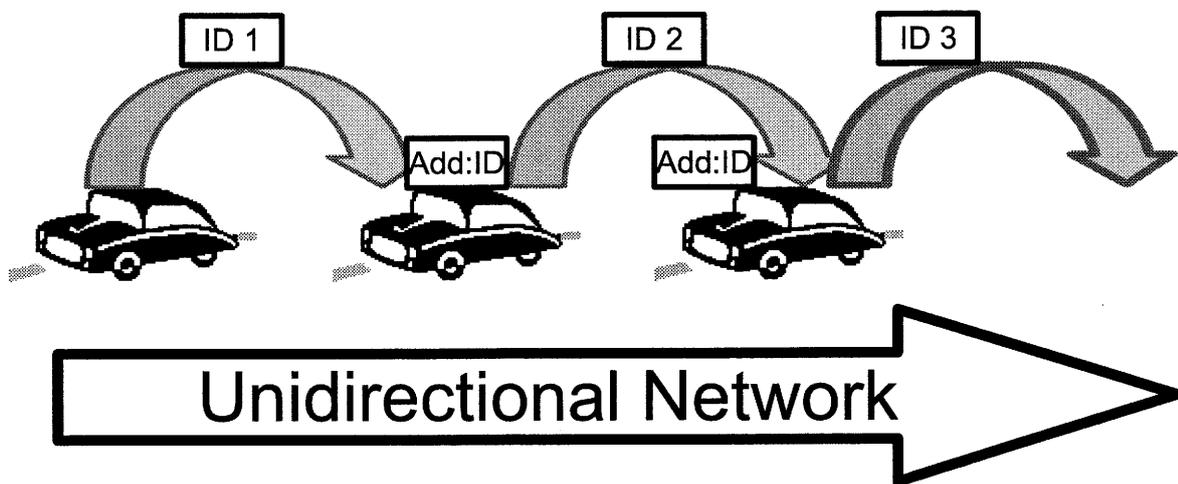


図 3.1: 渋滞距離推定システムモデル図
Fig. 3.1 Estimated Traffic Congestion Model

3.3 システムの概要

本節では、本研究で用いる渋滞距離推定手法について説明する。3.2.2 節で述べたように、渋滞とは前方の車輛からの停車または減速といった情報を伝播し確立される一方向のネットワークであると言える。

提案する推定システムは、前方の車から後方の車に停車や減速といった情報以外にも、ネットワークを構成する各端末のノード番号を送信し、ネットワーク内で各端末が何番目なのかを知ることで、渋滞距離推定を実現する。この手法により、渋滞に参加した端末はサーバ等を経由せずにネットワークを構築出来る。さらに、我々の手法は、ID の小さい場合は渋滞ではない等といったように、渋滞かどうかを ID 番号によるフィルタリングによって判定することが可能である。Fig.3.1 は本方式の提案モデルを示している。Fig.3.1 に示すように、上流の端末は下流の端末に自身の番号を送信する。受け取った端末は自身の番号を書き換えさらに下流の端末へと伝達させる。渋滞は単方向のネットワークであるため、このようにして渋滞内のすべての車に番号付けが行える。この番号は、渋滞の先頭からの番号を示している。従って、番号を受け取った端末は自身が渋滞の先頭からどの位置にいるかを推定することが可能となる。また、この情報の伝播は、道路の分岐や交差点を超えるような渋滞の場合でも行われる。従って、そのような大規模な渋滞においても渋滞の先頭から現在地までの渋滞の長さを知ることが可能になる。

本システムは、単純なデータのやり取りで構築できる。そのため、ネットワーク負荷を抑えることができる。

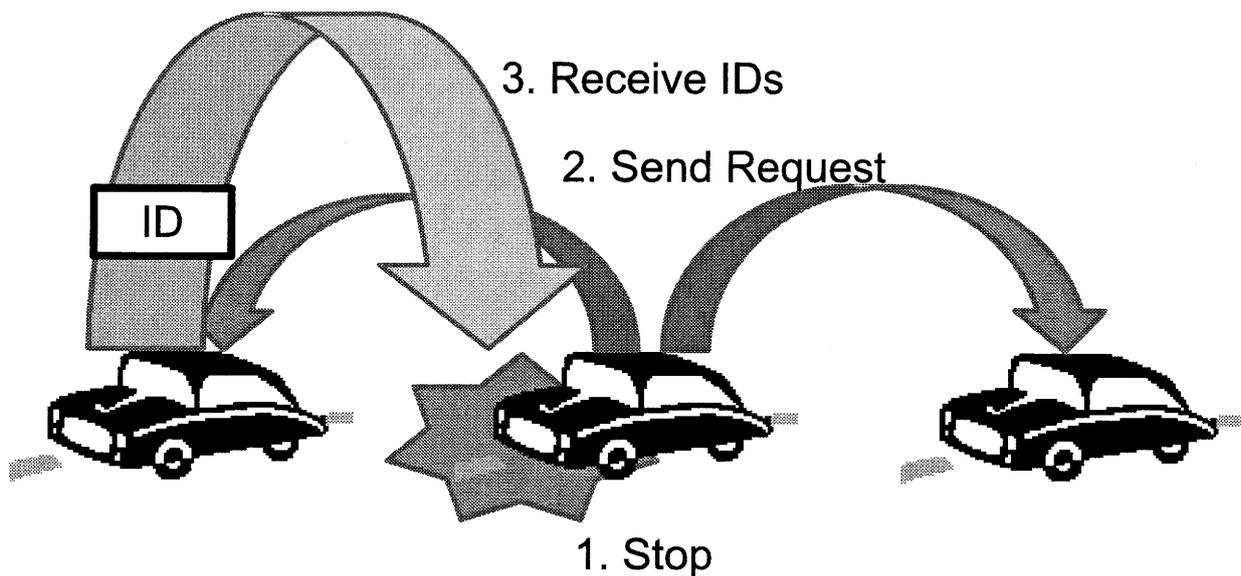


図 3.2: 提案システムモデル図
Fig. 3.2 Proposal System Model

3.3.1 Proposal system

Fig.3.2 は提案するシステムのモデル図を表す。本論において、我々は渋滞に巻き込まれた車両は停止しているものと定義する。また、搭載車両は IEEE802.15.4 端末を搭載しているものとする。我々のシステムは、ID リクエストパケットと ID パケットのみで実現することが可能である。

停車した車は、まずリクエスト要求を出す。リクエスト要求を受けた車が、停車していれば自分の ID を送信する。リクエスト要求を受けた車が、移動していれば ID の送信は行わない。この動作により、渋滞が構成されるのと同時に、システム内でネットワークの上流と下流が構成できる。

リクエスト要求を出した車は、受け取った ID を記録する。リクエスト要求を出した車は、受け取った ID の中で一番大きいものに+1 した値を自分の ID にする。何も受け取らなければ自分の ID を 1 として記録する。これは、自身が渋滞の先頭であることを意味している。どのような場合でも、渋滞の先頭の車両の ID は必ず 1 とする。この動作を渋滞に接続する度に車両が続けることによって、渋滞長を知ることが可能となる。

以上のように、本システムは渋滞が単方向のネットワークであるという性質を利用して、渋滞内の番号付けを実現している。

3.3.2 Estimation length

提案システムは、普及率と自車番号の関係により渋滞の先頭からの距離を推定する。普及率や車間距離などにより変化する平均搭載端末間距離を求められれば、自車番号と平均搭載端末間距離との積により渋滞の距離を推定することが出来る。そこで、自車番号から渋滞の距離を推定するためのパラメータとして平均搭載端末間距離を求める。

最初に、搭載端末の普及率を求める。ある端末が ID を受信し終わった時点での搭載端末の推定普及率 ρ は以下の式で求められる。

$$\rho = \frac{d_{car}}{D_c/V_R} \quad (3.1)$$

ここで、 d_{car} は搭載非搭載にかかわらず一般的な車輛がとる平均の車輛長と車間距離の合計を表す。また、 D_c は IEEE802.15.4 の通信距離を表し、 V_R は受信した ID の数を表す。式 3.1 内の D_c/V_R は通信距離に対して搭載端末がいた割合を表す。平均車間距離 d_{car} を搭載端末の割合で割ることによって普及率 ρ を推定することができる。

次に、普及率 ρ を用いて、推定距離 D を以下のように求める。

$$D = \frac{d_{car}}{\rho} \times N_{ID} \quad (3.2)$$

平均車間距離 d_{car} を普及率 ρ で割ることによって搭載端末間の平均距離を求める。搭載端末間の平均距離に、自車番号 N_{ID} を掛けることで距離の推定を行う。この推定距離 D により各搭載端末は、渋滞の先頭から自車までの距離を知ることが出来る。

次に渋滞が複数車線に及ぶ場合の距離推定について説明する。何車線で渋滞が起こっているかは既知であるとする。推定普及率 ρ は式 3.1 を拡張して以下のように求められる。

$$\rho = \frac{d_{car}}{D_c/(V_R/L)} \quad (3.3)$$

L は車線数を表している。通信距離が同じ場合、受け取る ID の数は車線数によって変わってくる。そこで受け取った ID の数 V_R を車線数 L で割ることによって、一車線の場合のときと近似して普及率

ρ を推定する。このように、我々のシステムにおいて、ID 情報の伝播はネットワークが構成されていくと同時にされる。従って、我々のシステムは渋滞の先頭から自車の位置までを推定することが可能になる。

また、同じように推定距離 D は式 3.2 を拡張して、以下のように求められる。

$$D = \frac{d_{car}}{\rho} \times (N_{ID}/L) \quad (3.4)$$

自車番号 N_{ID} は車線数 L が増えるにつれ多くなる。そこで自車番号 N_{ID} を車線数 L で割ることによって、一車線の場合に近似して距離 D を推定する。

このような単純な計算を各端末が行うことにより、負荷の軽い渋滞距離推定を実現する。

3.3.3 周波数分割多重を利用した渋滞距離推定手法

3.3.1 節で説明したシステムでは、通信は一度しか行わない。情報を送信して、情報の応答信号を受信して終了する 1 回の通信では、通信路環境の良し悪しで通信が出来ない可能性が出てくる。そのような可能性を少なくするために、複数回の通信を行う。

しかし、通信の回数が増えるほどにパケットの衝突が増えることが予想される。IEEE 802.15.4 はパケットの衝突を回避する手法として CSMA/CA が用いられている。CSMA/CA は確率的にパケット衝突を回避する手法である。しかし、この手法の場合、端末の数が多くなるにつれて CSMA/CA 自体の遅延により高速な通信が妨げられる。また、この手法は乱数によって衝突を回避する手法であるため、端末の数が増加するほど衝突する確率も増えていく。さらに伝送するパケットサイズが大きくなった場合、通信にかかる時間も増す。そのため、CSMA/CA による待ち時間に対して通信にかかる時間が増すことによって CSMA/CA の効果が出にくくなることが考えられる。

我々は、周波数分割と CSMA/CA を併用する手法を用いることで複数回通信時の干渉低減手法を提案する。各端末が異なる周波数を使用することにより、通信エリアを周波数成分で仮想化しパケット衝突の可能性を下げ CSMA/CA による遅延を回避する手法を提案する。

Fig.3.3 は我々の使用する周波数分割のモデル図を表している。Fig.3.3 の左側は従来手法の CSMA/CA のみを用いる場合をあらわしている。右側は、我々の提案手法を表している。従来は同じエリアで通信を行っていたため、パケットの衝突が発生しやすかった。しかし、我々の提案する手法は同じエリアには居るものの、周波数的には複数のエリアを使用できるようになりそれによって、パケットの衝

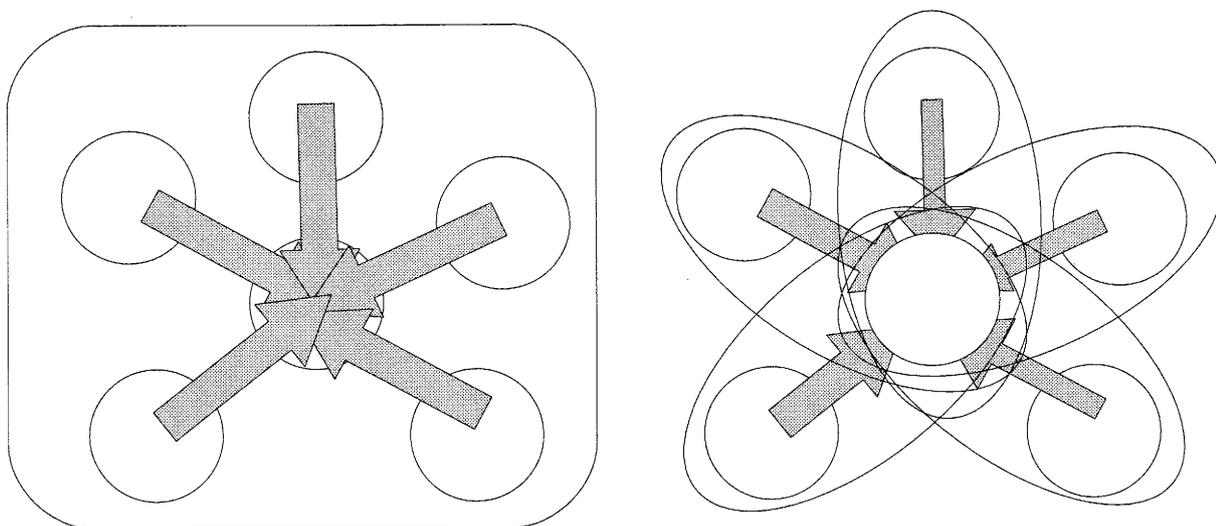


図 3.3: 周波数分割多重概要図
Fig. 3.3 Frequency Division model

突を回避することが可能になる。

さらに、通信周波数を変えた通信を複数回行うことで、ある周波数帯の通信路が劣悪な環境であったとしても、別の周波数帯域を選んで通信することが可能となり、通信品質の向上が期待できる。

本システムにおいて、IDを要求した端末がコーディネータのように振る舞い、IDの送受信が終わったところでそのネットワークを破棄する。その繰り返しによって渋滞全体のネットワークが形成される。また、周波数は、IDに伴ない16chを振り分ける手法によって決定する。

3.4 シミュレーション実験

システムの有効性を検証するために、実験を行った。膨大な数の端末を使用して実験を行うのは現段階では困難であるため、コンピュータシミュレーションを用いた。シミュレーションはモンテカルロ法を用いたシミュレーションを行い、提案システムが実際に使用可能であるかを調査した。また、使用可能であればどのような条件を満たせば使用できるのかを、普及率などの観点から調査した。モンテカルロ法は複雑な系のシミュレーションに多く用いられている。

また、モンテカルロ法は乱数を使用したシミュレーションであるため、使用する乱数には、より精度の良い乱数を選択する必要がある。そこで、本論では使用する乱数に Matsumoto と Nishinaga が作成した MT(Mersenne Twister)[103] を用いる。MT は通常のプログラミング言語で提供される標準の擬似乱数系よりも長い周期を持つため、乱数を繰り返し発生させるモンテカルロ法において非常に有効な疑似乱数発生器である。乱数周期が短い場合、同じ値が入ってしまうことで、同じ実験結果が得られやすくなり、いいシミュレーションとはならない。また、正規乱数を生成するアルゴリズムには、Box と Muller が 1958 年に発表した、一様乱数の二つの要素 α, β から作成される Box-Muller 法 [104] を用いる。Box-Muller 法ではまず、 $N(0, 1)$ の正規乱数 N を以下のように求める。

$$N = \sqrt{-2 \ln \alpha} \cdot \sin(2\pi\beta) \quad (3.5)$$

正規乱数は平均 μ と分散 σ^2 によって決定されるので、先ほど求めた N から以下の n が使用する正規乱数である。

$$n = N \cdot \sigma + \mu \quad (3.6)$$

図 3.4 に上の式と MT によって、平均を 50 とし、分散を変化させ、1000000 回出力した結果を示す。図 3.4 に示すように、この結果は正規分布に従っている。

シミュレーションは 1000 台の端末によって行う。IEEE802.15.4 を端末する端末と搭載しない端末を普及率によって決定する。普及率が 60% であれば、搭載端末数は 600 台とする。普通車と大型車の車輻長をそれぞれ 3m と 6m とし、その割合が 8:2[105] になるように一様乱数によって設定する。

また、それぞれの端末は乱数で与えられた車間距離を持つ。車間距離は、平均 5m の正規乱数で与えられる。ただし、車間距離の下限は 1m、上限は 9m とする。その範囲を超えるような場合は、範囲内に収まるまで正規乱数による割り当てを繰り返す。端末は車線数と渋滞の距離からなる 2次元の平面に設置する。

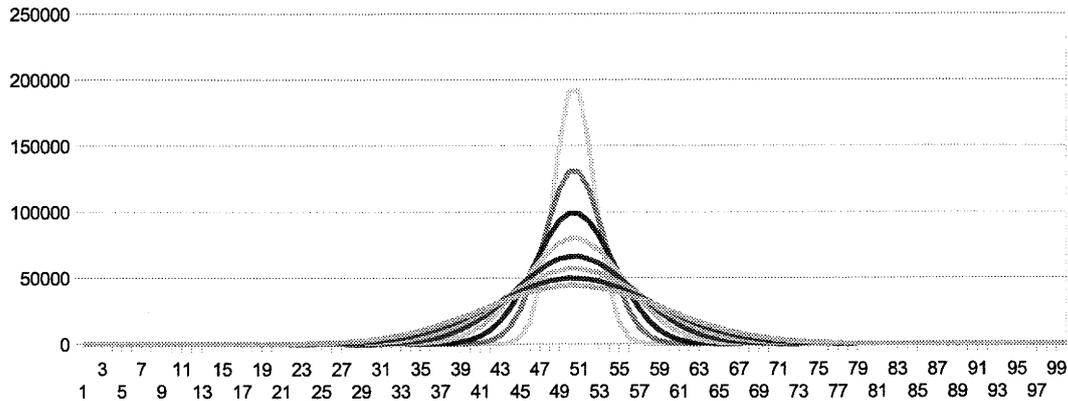


図 3.4: Box-Muller 法による出力結果
Fig. 3.4 output of Box-Muller

次に前述の端末を、場にランダムに配置する。端末はシミュレーションが 1 step ずつ進むたびに 1m 前進する。場の先端に到達した端末は、停車する。また、前方の端末との距離が自車の車間距離に達した場合、端末は停車する。

停車した端末は、section 3.3.1 に示す動作を行う。このとき、受信端末は-78dB よりも高い電界強度のときにリクエストパケットを受信する。受信端末は ID 情報をリクエスト端末まで送信する。この時、受信端末からリクエスト端末への伝送は必ず成功するものとする。受信端末の受け取るパケットの電界強度はフリスの伝達公式と自由空間伝搬損、平均 5dB の AWGN (Additive White Gaussian Noise) によって与えられる。これは IEEE802.15.4 が想定する平均通信距離 70m に合わせるためである。また、停車した端末とその前の端末との距離が、車間距離よりも大きくなる場合、停車した端末は再び移動を始める。尚、各端末は、渋滞の先頭からの距離を真値として持っている。シミュレーションは普及率ごとに 1000 台の端末で 100 回行う。

3.4.1 複数回通信実験

渋滞距離を推定するシミュレーション実験を行い、推定値との誤差率を求めた。推定システムの動作は前述した通りである。ここで誤差率は、各端末で、推定距離を真値で割った値である。また、複数回通信の効果を調べるために実験は、1 回通信のシミュレーションと複数回通信のシミュレーションの 2 パターン行った。1 回通信のシミュレーション動作は前述の通りである。2 回以降の通信のシミュレーションは、停車した端末がリクエストを送信する処理を複数回行う。本論では、最大 3 回の通信を行う。リクエスト要求の電界強度はそのつど変化する。したがって、複数回の通信によって通

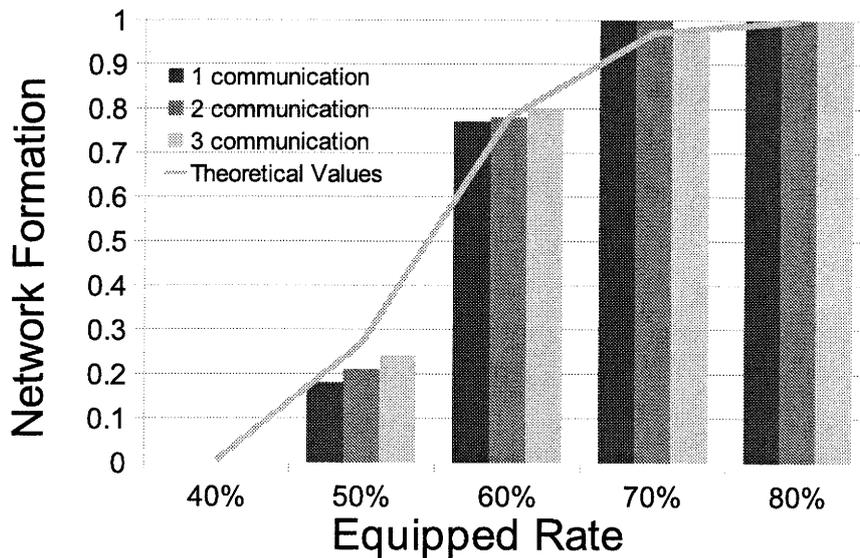


図 3.5: シミュレーション実験によるネットワーク形成率
Fig. 3.5 Rate of formation simulation

信が届く距離が変動する。複数回通信では、それまでの通信で届いた ID 数より多くなった場合、受信 ID 数と自車番号を更新する。以上のようなシミュレーションを行った。

Fig.3.5 はシミュレーションによるネットワーク形成率を求めた結果を表す。ここで我々は、ネットワーク形成率を全ての搭載端末が一つのネットワークとして途切れなくつながった割合と定義する。Fig.3.5 の横軸は普及率を表し、縦軸はネットワーク形成率を表している。渋滞の先頭にいる搭載端末から再後方の搭載端末までデータを受け取った場合ネットワークは形成できたものとする。結果は普及率ごとに何回ネットワークの形成に成功したかを表している。

また、グラフの要素は 1 回通信の場合、2 回通信の場合、3 回通信の場合と理論値で構成されている。80%を超える普及率においてはどの場合でも形成率は 1 であったため割愛する。

このとき理論値は、以下の様に求める。まず、3.4 節より、平均の端末間距離は平均の車輛長と平均車間距離より 8.6m とする。求めるネットワーク形成率 P_f は以下の式で表せる。

$$P_f = \left(1 - \left((1 - \rho)^{(N-1)} + (1 - \rho)^N\right)\right)^{D_a} \quad (3.7)$$

ここで 70m の平均通信距離内にいる端末数 N を $N = 70/8.6$ と表せる。ここで、 $(1 - \rho)^N$ は通信距離内にいる端末が全て通信できない端末である確率を表している。また、 $(1 - \rho)^{(N-1)}$ は通信距離内にいる端末が一台しかいない確率を表している。通信距離に少なくとも 2 台以上の端末が存在しなければネットワークは形成出来ない。従って、この二つのパターンを除いたものが通信距離内でのネットワーク

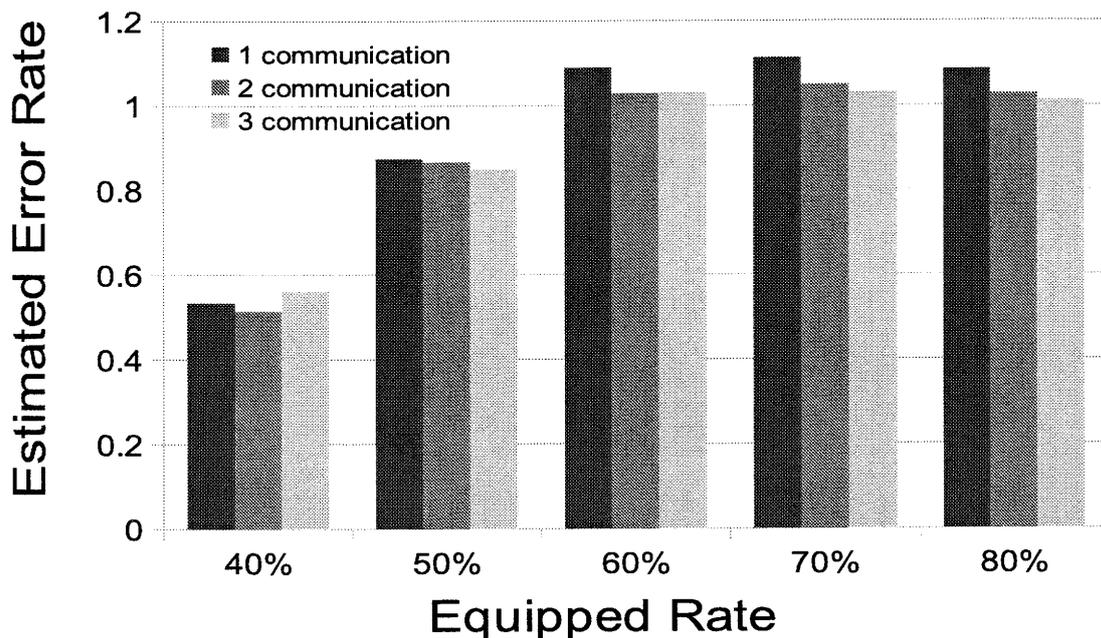


図 3.6: 渋滞距離推定シミュレーション結果
Fig. 3.6 Estimated distance simulation

形成率である。ネットワーク全体の形成率は、ネットワークの全長を先ほどパターン化した平均通信距離で割った値により求められる。1000 台の端末により形成されるネットワークの全長を通信距離で割った値 D_a は $D_a = (8.6 \times 1000)/70$ のようにあらわせる。

Fig.3.5 の理論値は式 3.7 によって求めた結果を表す。ネットワーク形成率の実験結果より、シミュレーション結果と理論値はほぼ同程度の値であり、この結果が妥当であることがわかった。この結果より、普及率が 50% を切ると急激にネットワーク形成率が低下することが分かった。しかし、普及率が 60% あれば、8 割近いネットワーク形成率が得られることが分かった。また、普及率が悪いほど複数回通信の効果が出てくるということが分かった。これは、複数回の通信により通信できる距離が伸びたためと考えられる。

Fig.3.6 はシミュレーションによる距離推定実験の結果を表す。グラフの横軸は普及率を表し、縦軸は誤差率の平均を表している。ここで、誤差率 V_p は各端末が推定した推定値 V_e と真値 V_t より $V_p = V_e/V_t$ で表す。結果は、その誤差率 V_p の平均である。1 に近いほど、推定が正しいことが言える。また、 V_p, V_e, V_t はそれぞれのシミュレーション中に計算される。

結果より、普及率が 60% あれば、精度のよい距離推定が可能であることがいえる。また、普及率が上がって行くにつれて推定の精度も向上していく。これは、搭載している端末数が増えたためである。さらに、通信回数を増やすことによって推定の精度が向上していることが分かる。これは通信回数

表 3.1: V_e の標準偏差Tab. 3.1 Standard deviation of V_e

Equiped Rate	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1 communication	0.18844	0.24993	0.14315	0.02981	0.02148	0.01529	0.07308
2 communications	0.17929	0.22796	0.12796	0.01958	0.01958	0.01387	0.05828

が増えることによって、通信距離が想定した平均距離に近づいたためである。受信数の多い場合のデータを正しいデータとして書き換えているため、通信の回数を増やすことによって、通信距離も伸びていく。平均の通信距離を 70m として扱ってきたが、5dB の AWGN によって、シミュレーション内では通信距離が変動している。実際の環境でも同じことが起こる。本方式により複数回の通信を行うことによって、適正な通信距離に最適化が行える。そのため、推定の精度が向上したと考えられる。

また、 V_e の 2 回通信までの標準偏差を表 3.1 に表す。この結果より、標準偏差は 2 回通信のほうが 1 回通信の場合に比べ、どの普及率においても低くなることが分かった。これは複数回の通信により誤差の修正が行えていることを示している。

このように、複数回の通信を行うことによって精度の高い通信が行えた。

3.4.2 複数車線シミュレーション

複数車線における本システムの動作を知るためにシミュレーションを行った。

3.4.1 項において有効であった 2 回通信でシミュレーションを行った。各端末は渋滞が何車線で起こっているかを既知とする。1 車線の幅は 3.5m とする。[105] シミュレーションは各普及率、各車線数において 100 回試行した。

Fig.3.7 は複数車線におけるネットワーク形成率の結果を表す。横軸は普及率、縦軸はネットワーク形成率を表す。グラフの要素は各車線の数を表している。また、普及率 80% 以上においては、どの結果も形成率が 1 になっているため割愛する。

結果より、複数車線にすることで普及率が少なくとも、ネットワークが形成しやすくなる。これは、一つの車線でネットワークが途切れた場合でも、別の車線に搭載端末がいることによってネットワークが途切れずに形成できる場合がある。そのような確率が車線数が増えるごとに増加するため、普及率が少ない場合でもネットワーク形成率が増加する。例えば、5 車線の場合、20% の普及率においても、ネットワークが形成可能であることが分かった。

次に、複数車線のシミュレーション実験における距離推定の結果を Fig.3.8 に示す。横軸は普及率、縦軸は誤差率の平均を表す。

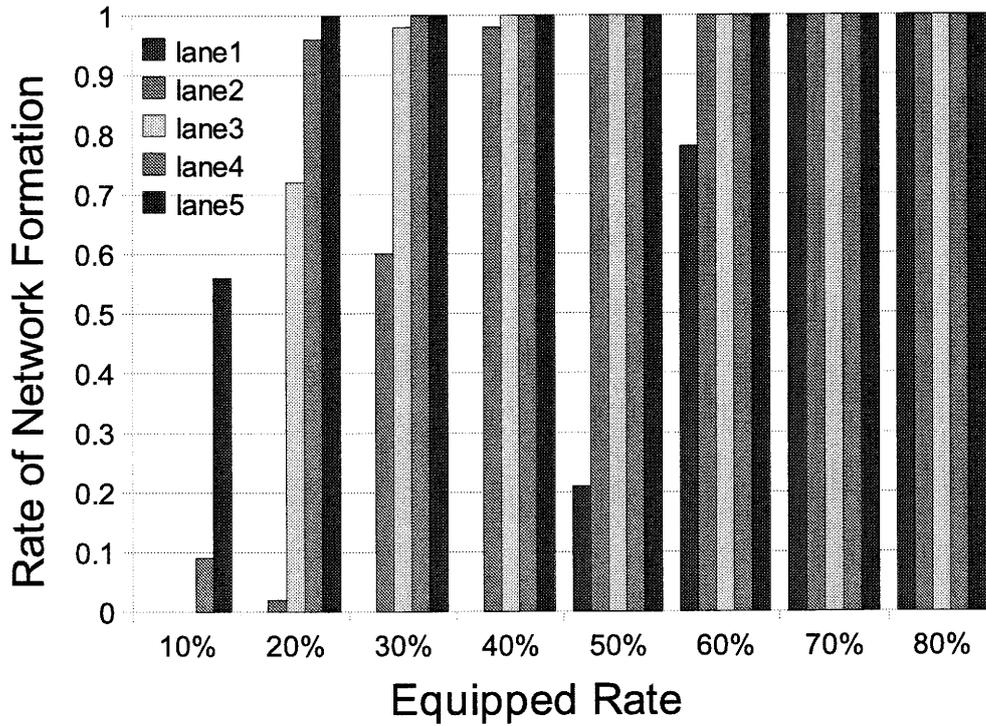


図 3.7: 複数車線時のネットワーク形成率実験結果
 Fig. 3.7 multi-lane simulation (rate of formation)

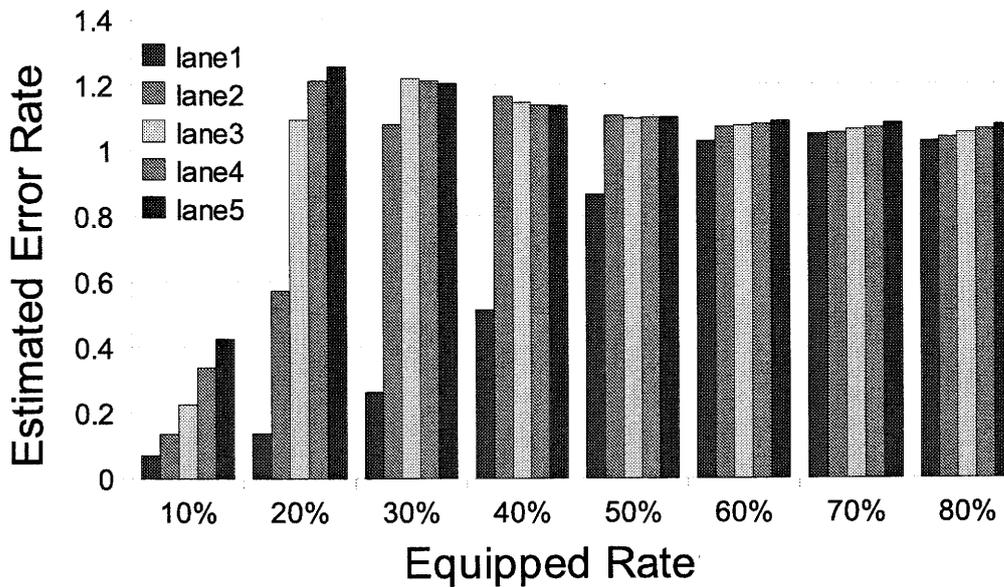


図 3.8: 複数車線時の渋滞距離推定シミュレーション結果
 Fig. 3.8 multi-lane simulation (estimated distance)

この結果からも、普及率が少なくとも車線が増えるにつれ、正確な距離の推定ができていくことが分かる。また、同じ普及率でみた場合、車線数の少ない方が推定の精度が良い結果になっている。これは、通信距離は同心円状に広がっているため車線数が増えるにつれ想定していた推定式では誤差が

生じてしまうためであると考えられる。しかし、全ての車線数において、普及率が上がるほど距離推定の結果が良くなっていることがわかる。これは、一車線のときと同じ理由によるものと考えられる。

結果として、普及率が20%のときでも車線数が5車線あれば、ネットワークが形成できることが分かった。また、同じ状況で2割の誤差はあるものの距離の推定が可能であることが分かった。さらに50%以上の普及率において、我々の提案手法は10%を切る誤差率で推定が可能であることが分かった。

3.4.3 実機実験

実際に用いる端末の動作を調べシステムの有効性を検証するために、ZigBee 評価キットを使用し、システムを作成した。評価キットには Texas Instruments 社の CC2420 チップを用いる。端末は、IEEE802.15.4 MAC 準拠のものを使用した。

実機実験は、本論が提案する周波数分割多重の特性を知るために、周波数分割多重を用いた伝送速度を調べる周波数分割多重実験を行った。提案システムが動作を行うために、複数の端末間の送受信がどの程度の指標であるかを実際に測定する必要がある。そこで、周波数分割の影響を調査するため、スループットをフィールド実験によって計測する。実験は、1台の端末(測定端末)が16台の端末からパケットを測定端末が受信するまでの時間を計った。すべてのパケットのペイロードは10[Byte]とする。

Fig.3.9は、周波数分割のフィールド実験のモデル図を表している。この実験モデルは、16台の端末から1台の端末へ情報が送信された場合を想定している。また、この実験は、周波数分割を使用した場合と、使用しなかった場合の二つのスループットを計測する。このモデルは、3.3.1節の提案システムを再現したものである。

測定は、周波数分割多重を行わなかった場合と行った場合の二つの場合において行った。その結果により、我々の提案する周波数分割多重の特性を明らかにする。実験は、16台の端末からの受信が30回成功するまで行い、通信に成功した一回当たりの平均時間を求める。周波数分割多重を行った実験も同様に、各端末から返信されたパケットを測定端末が受信するまでの時間を測定する。ただし、各端末は周波数をそれぞれが1ch~16chのいずれかのチャンネルに切り替えて返信する。また測定端末は、1chで待機し、受信した場合はchを加算して次のチャンネルで待機する。それを繰り返すことで、16台の端末と16chに周波数を分割した通信を行う。

なお、通信のタイミングが実際にはわからないため、16台の端末は各周波数で送信し続ける。周波数分割多重を行わなかった実験と同様に、受信が30回成功するまで行い、通信成功時、一回当た

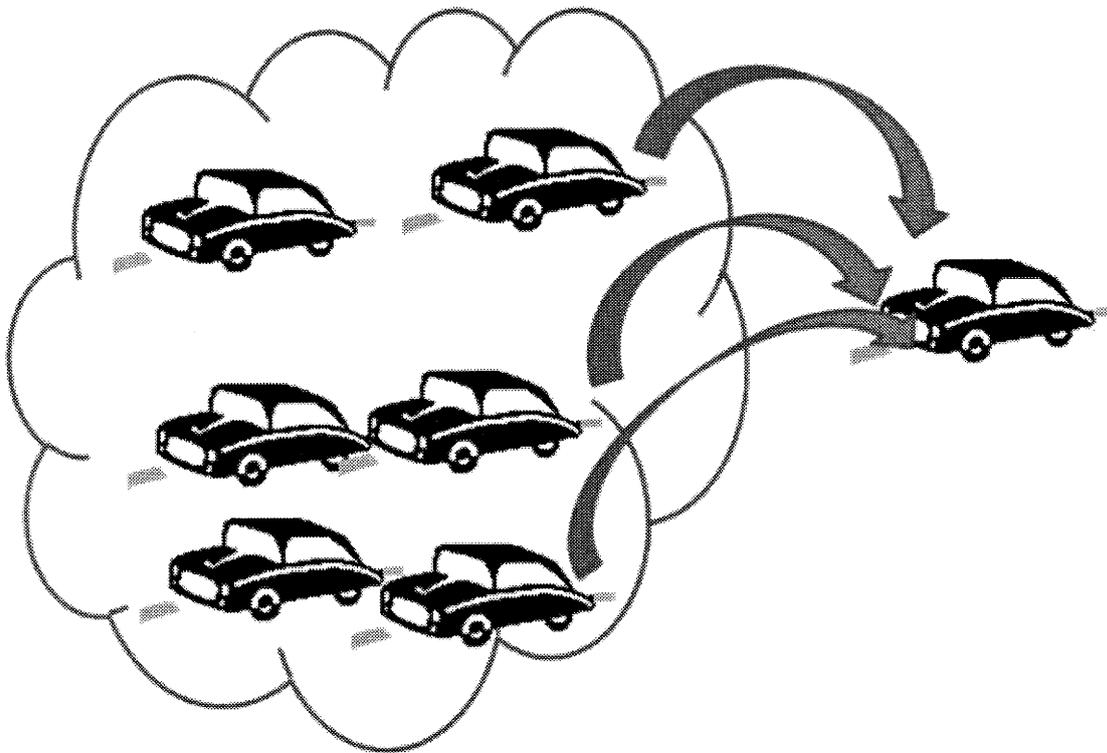


図 3.9: 周波数分割のフィールド実験概要
Fig. 3.9 16 terminals actual equipment

りの平均時間を求める。実験は縦 3m 横 1m20cm の空間に端末を均等に配置し、試行回数は 30 回で行った。結果はその平均時間を示す。

実機実験による周波数分割多重実験の結果を Fig.3.10 に示す。横軸は、受信端末数を表す。縦軸は通信時間を [msec] 単位で表している。棒グラフは実験結果を表す。塗りつぶしてある棒グラフは CSMA/CA のみの実験結果を、それ以外の棒グラフは、周波数分割と CSMA/CA を併用した場合の実験結果を表す。

以上の実機実験の結果より、周波数分割による通信は 8 台以上の端末において、従来手法よりも約 3 倍高速化できることが分かった。この実験結果は、4 台から 8 台に変化するところから、通信時間が少なくなっていることを意味している。この結果より、8 台以上の端末を使用する場合 CSMA/CA のみを使用するよりも、周波数分割を使用したほうが、通信が高速化することが明らかになった。この結果は、IEEE802.15.4 の CSMA/CA は 8 台程度で限界を迎えることを意味している。それ以上の端末があった場合、我々の使用した周波数分割システムの効果が発揮されやすくなることが分かった。

また、この結果より、端末数が少ない場合、周波数分割多重の方が同一チャネルでの通信よりも時間を要している。これは、周波数分割多重の場合、周波数を変える度にネットワークへの参加と脱退を繰り返すために生じる損失と考えられる。しかしながら、8 台以上の端末においては速度の大幅な

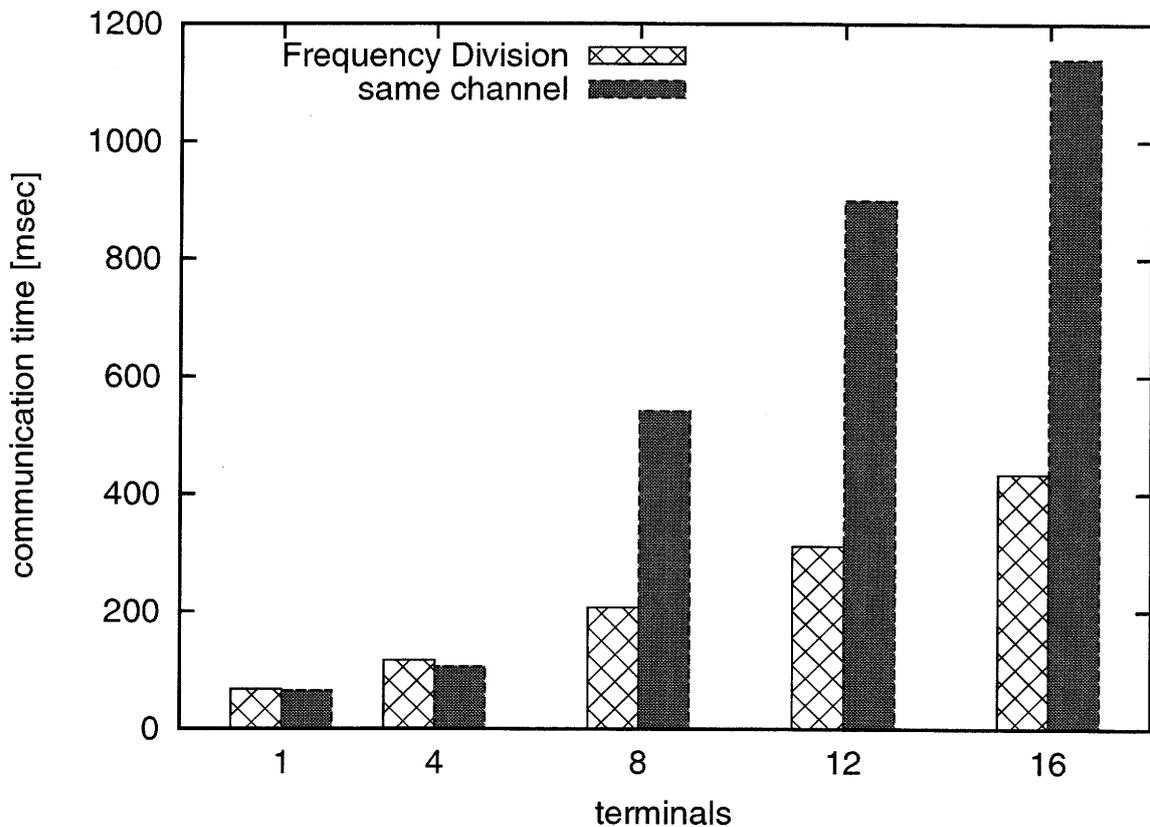


図 3.10: フィールド実験結果
Fig. 3.10 Real machine communication time

向上がみられる。これは、我々の提案する手法による結果である。また、本論で提案している周波数分割多重を使用した渋滞距離推定システムにおいては、許容範囲内である人間が知覚しづらい約 400msec という時間ですべてのチャンネルと通信が出来ているため、この指標は十分に実現に耐えられるものと考えることが出来る。

実際にサービスが提供されている VICS (Vehicle Information and COmmunication System) の伝送時間は、高速道路での受信に理論値で 1 秒必要となる。従って、本手法でも受信に必要な時間を 1 秒と設定すると 16 台の端末からの情報を受信する場合、周波数分割を使用しない時でも VICS と同程度の受信速度が保証される。また、周波数分割を使用することで、それよりも高速に受信することが可能となる。現在商用で利用されているカーナビゲーションシステムを利用したプローブカーシステムの場合、メインの情報は VICS を利用しているため、本方式は十分に使用に耐えられるものだと考えられる。

また、今回の実験環境は限定的なものである。実際にこのシステムを適用する場合、渋滞環境によってはパケットが増大し送受信のタイミングが非常にタイトなものとなることが予想される。その結果、上手くホッピングが行えなくなる可能性が存在する。そこで、さらに多数の端末を使用し、送

受信のタイミングの限界値を実機実験により検証する必要がある。

3.5 まとめ

本論では、IEEE802.15.4 を応用した周波数分割多重型ネットワークによる渋滞距離推定システムの提案と作成を行った。様々なシミュレーション実験や実機実験の結果、周波数分割多重を使用した場合、単車線ではシステムは普及率 60% 程度で動作することが分かった。また、その時の距離推定の誤差率は提案するマルチハンドシェイクを使用した場合、約 0.2 以内であることが分かった。

首都高速道路を管轄する首都高速道路株式会社によれば、首都高速道路の ETC 利用率は 70% を超えているので、普及率 60% は決して高い数字とは言えないため、本システムは実現可能である。本システムはプローブカーシステムでは行えないサーバを介しない通信を実現した。また普及率が 50% の場合でも距離推定の精度は 90% 程あり、十分に実用に耐えうる数字であると考えられる。また、プローブカーシステムに必要なインフラストラクチャの設置を行わず、簡易に渋滞情報を取得することが出来た。

さらに、普及率が 20% 程度でも 5 車線あれば、ネットワーク形成に成功することが分かった。さらに、すべての車線で我々の手法の精度は普及率が増えるに連れ、向上していくことが分かった。さらに、我々の手法は 50% の普及率を超えると 10% を切る誤差率で推定することが可能であることが分かった。

さらに、本研究では 16 台の端末を使用した実機実験を行った。また、実際の環境において、8 台以上の端末がある場合、我々の提案手法を用いることで大幅な高速化が行えることが分かった。16 台以上の端末を用いた場合、約 3 倍の高速化に成功している。

本研究で作成したシステムは、周波数分割多重を用い複数回通信を行うことで、通信の品質と推定の精度を向上させることに成功した。このことは、センサネットワークにおける多重化手法の一つの指標になるだろう。

現在、我々のシステムは対向車線からの情報や誤り訂正などを考慮していない。今後の課題として、このシステムを実装するためには、それらの誤り訂正を検討する必要がある。しかしながら、我々のシステムは、単純な情報による渋滞距離推定を実現した。今後は、実際に車両に端末を搭載し本システムが有効に動作するかを確認する必要がある。また、複数方向からの渋滞が同一の環境で起こった場合や、渋滞長を ID 番号で区別したい場合等に ID によるフィルタリングは重要である。そこで、効率的な ID フィルタリング手法を開発する必要がある。また、交差点や分岐していく渋滞の考慮を行うために、受信パケット数を考慮した普及率の推定方法を検討する必要がある。

第4章 ワイヤレスセルラネットワークの干渉低減

4.1 緒言

近年、社会のユビキタスネットワーク化が進んでいる。その中で、センサネットワークへの期待が高まっている。近距離無線通信規格 IEEE 802.15.4[98] (ZigBee[106],[107]) は、センサネットワークを設計するために低コスト、低消費電力を目指して策定された規格であり、年々注目度が増している。また、センサネットワークの普及に伴い、通信端末の増加が予想される。近距離に通信端末が増えた場合、端末間干渉が問題になる。端末間の干渉が起こった場合、通信の遅延や品質の低下は避けられない。そのため、近距離無線通信規格では端末間干渉の回避手法として、様々な手法が提案されている [84]。なかでもパケットの衝突回避手法として、M.Metcalf が提案した CSMA[83],[108] (Carrier Sense Multiple Access) や改良型の CSMA/CA (CSMA/ Collision Avoidance) が使用されている [109],[110]。IEEE802.15.4 の衝突回避の手法としても CSMA/CA が使用されている [99]。しかし、端末数が増加するにつれ、CSMA/CA のオーバーヘッドが問題になる。

そこで我々は、時間グループ分割制御 (Timing Group Division:TGD) と呼ぶ手法を提案し、TGD と CSMA/CA を併用した IEEE802.15.4 の高速化を検討する。ここで、高速化とはネットワークに参加した全端末の通信時間の総量を最小化することとする。我々が提案する TGD とは、端末群をグループ分けし、各グループごとに待ち時間をもたせ、送信時間をずらすことにより、一回の CSMA/CA に参加する端末数を制御することで遅延を回避する方法である。IEEE802.15.4 では CAP(Contention Access Period) や CFP(Contention-Free Period) を使用した、スーパーフレームによる通信の優先度を決定する手法が提案されている [111]。しかし、それらの手法ではトポロジの制限や端末間の同期が必要になり、分散環境では使用できない。我々は、分散環境や CAP 内で動作可能な手法を提案する。本論では、実機実験を通して TGD の待ち時間のしきい値を検証し、最適値に付いて検討する。

さらに、我々は TGD のグループ分けの指標として、RSSI (Received Signal Strength Indication) を用いる手法を提案し、分散制御を行うような場合においても本手法が有効に動作することを確認する。

また、多数の端末が同時に通信を行おうとした場合 IEEE802.15.4 の ACK プロトコルでは対応しきれない場合が存在する。そこで、我々は多数の端末が通信を行う場合にも動作可能な ACK プロトコ

ルの提案を行い、実機に搭載することによって動作を確認する。

これまで、シミュレーションによって通信遅延を回避する提案 [100] は行われているが、実際の環境において同一空間で遅延を回避した例はない。さらに、我々はシミュレーションによる理想的な環境下よりも、実際的な実機実験による検証に重点をおいて実験を行う。また、ACK を使わずに高速化を目指す例もあるが、本論では通信の品質を確保するために、我々の提案する ACK プロトコルを使用した上での高速化を目指す。

4.2 原理

多くの通信においてデータ転送の成否を確かめるために ACK (ACKnowledgement) が使われている。IEEE 802.15.4 においても ACK が規定されている。しかし、IEEE802.15.4 ACK は多数の端末が同時に通信するような場合に不具合が起きてしまう危険性がある。また、複数の端末が通信を行う場合、パケットの衝突による通信の遅延や通信品質の低下が問題となる。IEEE802.15.4 においては、衝突回避手法として、CSMA/CA が用いられている。

本章では、それらの問題点と、その問題点を改善するための提案手法の説明を行う。

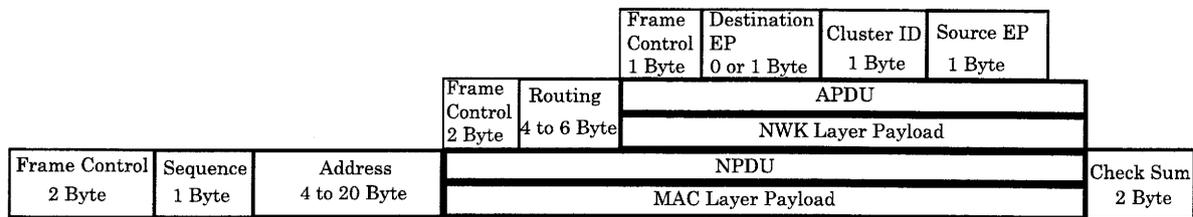
4.2.1 ACKnowledgement

通信の成否を確かめるために、IEEE802.15.4 では ACK が規定されている。IEEE802.15.4 は低消費電力を考慮した規格である。そのため IEEE802.15.4ACK のパケット長は 5Byte と短く設定されている。この ACK は主に 1Byte のシーケンシャル番号によって構成されている。IEEE802.15.4 は受信したパケットのシーケンシャル番号から ACK を作成している。この ACK は該当するシーケンシャル番号のパケットに対しての ACK 信号となる。また、IEEE802.15.4ACK はブロードキャストで送られる。このプロトコルにより少ないパケット長で ACK が実装されているため低消費電力が実現できる。しかし、このプロトコルには複数端末の送信時に正しく動作しなくなる可能性が含まれている。

複数の端末が同時に通信を行う場合、この手法では高々256のパケットしか識別できず、複数端末からシーケンシャル番号の同じパケットが送信される可能性がある。そのような場合、シーケンシャル番号が同じパケットを送信した複数の端末は一つの ACK のみを受信することで自身の通信が成功したと判断してしまう。その結果、通信の成否を正しく判断することができなくなる。この問題は、例えばポーリングにより複数の端末が ACK 要求のついたパケットを同時に送信する場合や、混雑した環境下で多数の端末が ACK を要求する通信を行う場合等、頻繁に発生する。

そこで、IEEE802.15.4 より上位層を規定している ZigBee では IEEE802.15.4ACK とは別に APS 層 ACK を規定している。IEEE802.15.4ACK が ACK 用の特別なパケット構成を使用しているのに対し、APS 層 ACK は、MAC 層のヘッダ部分が一般的なパケットであるため、ユニキャストで ACK の送信が可能であり、ブロードキャストによる前述のような問題を防ぐことができる。しかし、この APS 層 ACK はマルチホップ転送に対応しているなど、様々なプロトコルに対応するため処理に時間がかかる。

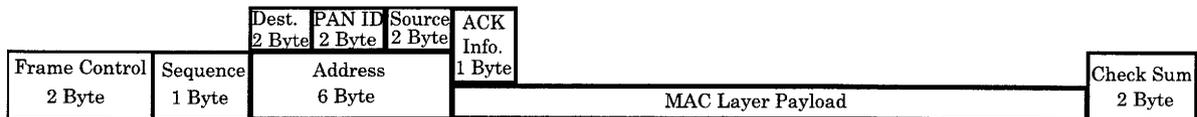
そこで、我々は IEEE802.15.4ACK を拡張し、単純な処理でブロードキャストではない ACK プロト



(a) APS Layer ACK



(b) IEEE802.15.4 (MAC Layer) ACK



(c) Our proposal ACK

図 4.1: 各プロトコルの ACK フレーム

Fig. 4.1 ACK Frame

コルを提案する。我々の提案する ACK プロトコルは、IEEE802.15.4 の一般的なパケットを用いて、ペイロードに ACK 情報を書き込む方式を採用する。これにより、IEEE802.15.4ACK のブロードキャストによる問題を解決する。さらに我々の提案する ACK は IEEE802.15.4 上で動作可能であるため、ZigBee のプロトコルを搭載せずに実現可能である。また、我々の提案する ACK のペイロードは固定長とし、受信したパケット長によって ACK パケットであるかどうかの判定を行う。この工夫により、提案する ACK は複雑な処理等を行わない分、APS 層 ACK よりも少ないパケット長で実装することが可能であり、処理の高速化が行える。4.3 節においてその評価を行う。

図 4.1 に APS 層 ACK, IEEE802.15.4ACK と我々の提案する ACK, それぞれのフレームを示す。(a) は APS 層 ACK, (b) は IEEE802.15.4ACK, (c) は我々の提案する ACK を示す。図中の NPDU(Network layer Protocol Data Unit), APDU(Application support sub-layer Protocol Data Unit) はそれぞれネットワーク層, APS 層のパケットフレームを示す。APS 層 ACK はそれぞれの層で用いるフレームコントロール, ネットワーク層で用いるルーティング, APS 層で用いるエンドポイントのアドレス等で構成されている。対して, IEEE802.15.4ACK はシーケンシャル番号を中心に構成されている。我々は IEEE802.15.4ACK にはないアドレスによる処理を, MAC 層のプロトコルを用いることによって実現した。我々の提案手法は, IEEE802.15.4ACK にアドレスを付け足す拡張を行うことで, 複数の端末が同時に通信を行う場合でも端末個別の ACK を使用することが可能となり, 正常な通信を保証する。また, 我々の提案手法は APS 層 ACK のようなネットワーク層のフレームを搭載していない。そのためルーティング等を用いることはできない。しかし, 1 ホップの通信の場合, 我々の提案手法は

フレームサイズを小さくすることができるため、APS 層 ACK よりも速い通信が可能である。また、我々の手法は IEEE802.15.4 上で動作可能であるため、ZigBee のプロトコルを搭載する必要がなく、IEEE802.15.4 規格との後方互換性も保証される。

4.2.2 Timing Group Division

CSMA/CA は乱数によって衝突を回避する手法である。そのため、送信する端末数が増えるほど遅延が発生する。そこで我々は、ネットワークに参加する端末をグループ分けし、全ての端末が同時に CSMA/CA を行わない期間を設ければ遅延が少なくなると考えた。我々は、端末群を優先度等でグループ分けし、各グループに CSMA/CA 以外の待ち時間を持たせアクセスコントロールを行う手法を提案する。この手法を時間グループ分割制御 (TGD) と呼ぶ。

この手法は、端末群をグループ分けして CSMA/CA 以外の待ち時間を与えることで、CSMA/CA によって競合する端末数を一時的に減らすことができる。結果、CSMA/CA の競合が少なくなる場合において、CSMA/CA による過剰な待ち時間が減ることにより通信を高速化できる。

TGD を行う端末は、自身の所属するグループ番号によって待ち時間が決定される。端末の待ち時間 t_w を以下の式で表す。

$$t_w = (G_{ID} - 1) * slot + t_d$$

このとき G_{ID} は、端末の所属するグループ番号を表している。slot は CSMA/CA の Backoff period である $320\mu sec$ を 1 slot としたスロット幅を表している。 t_d は CSMA/CA による待ち時間を表している。

図 4.2 に、時間グループ分割制御を使用した場合の packet 通信の例を示す。円形の印は端末、長方形は packet を表し、左図はグループ分けしなかった場合を示し、右図は TGD によるグループ分けを行った場合を示す。図 4.2 右図の点線で区切られた区間のように、TGD はその待ち時間によって競合する端末数を一時的に減らすことができる。TGD を行わない場合の端末の競合確率を 1 とした場合、この区間における競合確率は最も低い場合で $1 / (\text{Group 数})$ となり、CSMA/CA に参加する端末数を減らせる効果がある。この区間は、通信端末数が少ないため過剰な待ち時間は発生せず、CSMA/CA の効果が発揮されやすく通信が行いやすい。また、TGD による待ち時間以外の区間 (図中の Competition Period) においては、グループ分けを行わなかった場合と同様の通信時間になってしまうが、TGD の効果によってネットワーク全体の通信時間は高速になる。

本提案の類似の既存手法として山尾らが提案した TSGA[112] がある。既存手法は、ビーコンモード

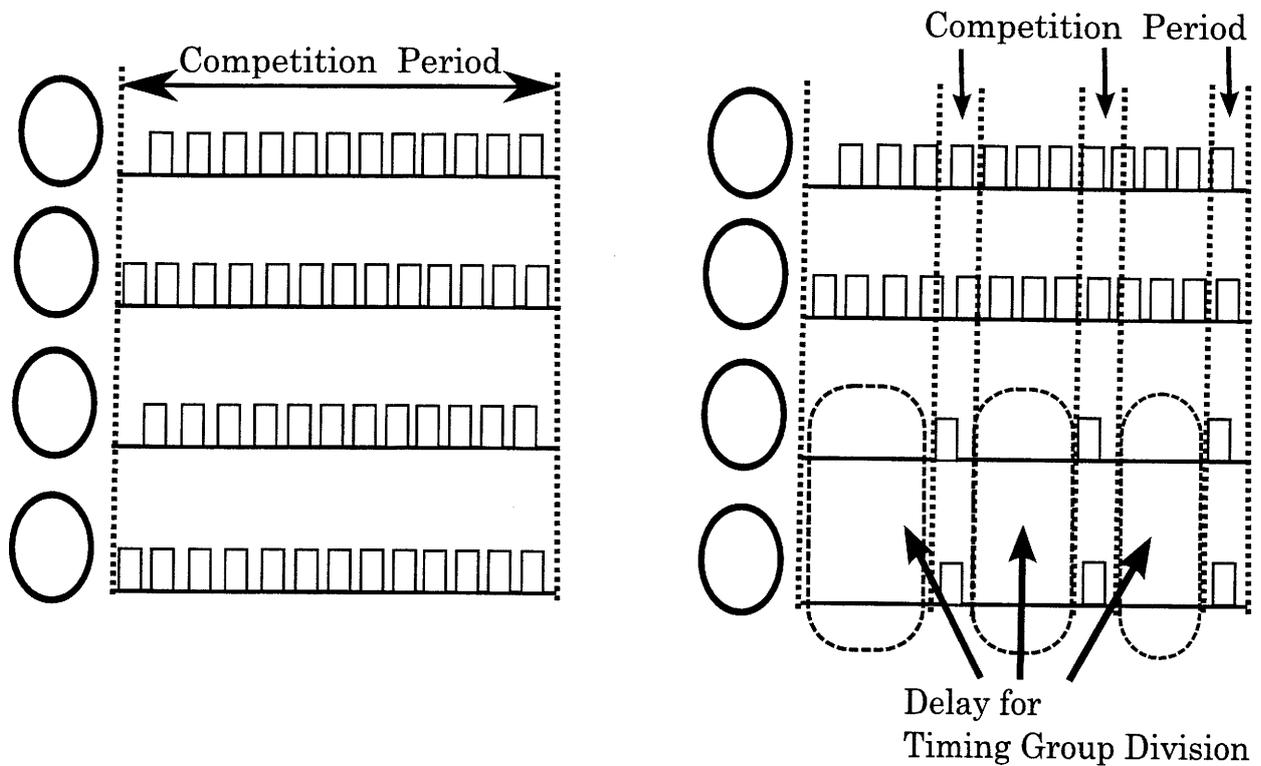


図 4.2: 時間グループ分割制御モデル
 Fig. 4.2 Timing Group Division Model

によるツリー型のネットワークにおいて、端末群を2つに分け、各グループでアクセスする時間をずらすことで、PAN コーディネータ付近でのボトルネックの回避を目的としていた。また、グループ化の手法として、トラフィック量による均等分配を用いていた。この手法では、グループ分けにコーディネータが必要となり分散システムに応用することが出来ない。そこで我々は、ノンビーコンモードを使用しネットワークトポロジに依存せず、自律分散システムにも応用可能な手法を提案する。また、2つ以上のグループ分けの効果を検証する。さらに、既存研究はシミュレーション実験を主に実験を行っていたが、我々はより実際のシステムに近づけるため、実機実験による検証を行っていく。

4.2.3 RSSI を用いた TGD

TGD を自律分散型のネットワークに使用する場合、自律的なグループ分け手法が必要になる。そこで我々は、グループ分け手法の一例として TGD のグループ分けに RSSI を用いる拡張を行う。

IEEE802.15.4 は CSMA/CA を使用するために、RSSI を用いて使用チャネル内の周波数を検知している。また、RSSI は距離や端末の置かれた環境によって変化することが知られている。つまり、RSSI によるグループ分けを行うことによって端末間の距離や環境による自律的なグループ分けが可能となる。

具体的なグループ分けの方法を以下に説明する。まず端末は自分宛の packets を受信する。受信した packets の RSSI を記録し、しきい値と RSSI を比較することによってその端末の所属するグループを決定する。しきい値の数を増やすことでグループ数の調整が可能になる。この手法で端末間の関係性により自律的にグループ分けが可能となるため、自律分散型のネットワークでも動作が可能となる。

本論では、異なった RSSI を用いてグループ分けを行うために、利得の異なるアンテナを用いる。受信した RSSI 値を元に予め測定しておいたしきい値を用いて、各端末が所属するグループを決定し、自律的にグループ分けを行う。

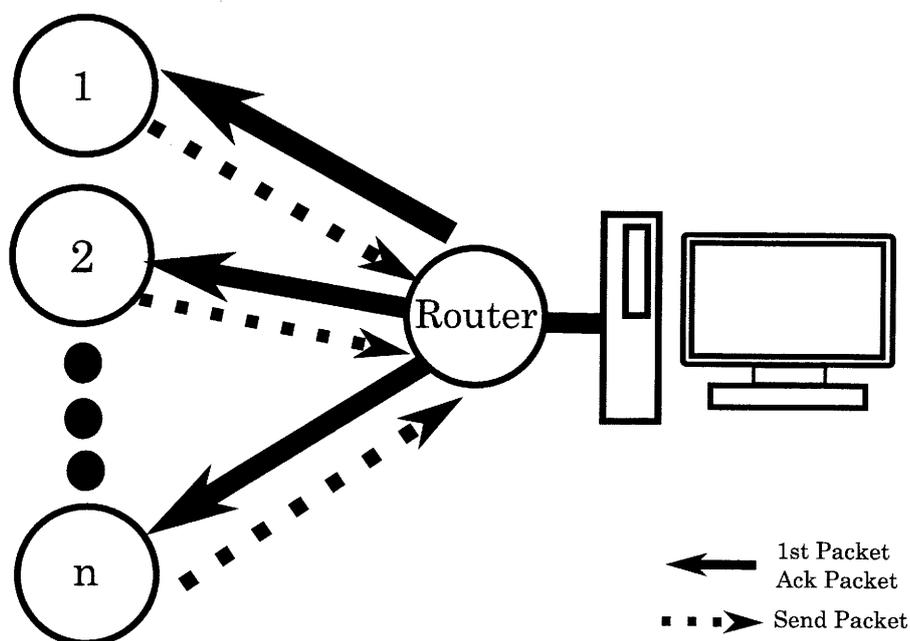


図 4.3: ZigBee ACK と提案手法 ACK の評価
 Fig. 4.3 Experiment of proposal ACK v.s. ZigBee ACK

4.3 提案方式 ACK と ZigBee ACK の比較

提案手法である TGD を実装するにあたり、予備実験として、IEEE802.15.4 と ZigBee との性能を実機実験によって比較した。

ここで、端末はデータを送信し続け、自身の送ったパケットに対して ACK パケットが返ってきたときに送信を止めるモデルを考える。前述の通り IEEE802.15.4 では、複数の端末が送受信を行う環境において ACK を誤認する問題が発生する。また、ZigBee には APS 層において、送信元アドレス等をパケットに印加した APS 層 ACK が規定されている。しかし ZigBee の ACK では処理に時間がかかる可能性がある。そこで、4.2.1 節で提案した ACK プロトコルを用い、提案手法の有効性を ZigBee との比較により検証する。

4.3.1 ACK 方式比較実験

図 4.3 は実験の様子を表している。PC と RS-232C で接続した端末を Router とする。まず、PC から Router へ 1Byte のデータを送信する。PC からデータを受け取った Router は 1st パケットをブロードキャストで送信する。1st パケットを受信した End Device は Send パケットを送信し続ける。Router が Send パケットを受信した場合、その Send パケットを発した End Device に対し ACK パケットを送信する。ACK パケットを受け取った End Device は送信を停止する。Router は、受信したパケットの

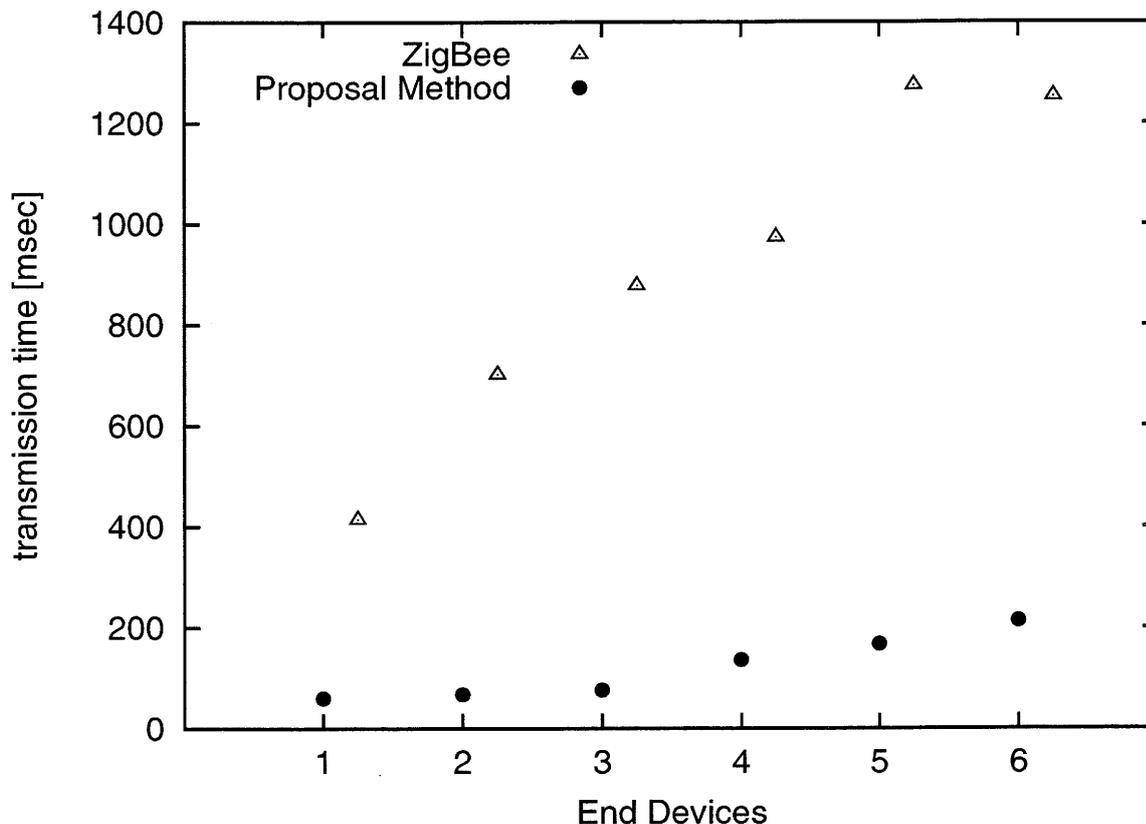


図 4.4: ZigBee ACK と提案方式 ACK の実験結果
 Fig. 4.4 Communication Time of proposal ACK vs ZigBee ACK

ID を記録する。Router は、記録した ID が全て揃ったときに PC に 1Byte のデータを送信する。このモデルはポーリングの動作を模している。PC は Router にデータを送信してから、データを受信するまでの時間を計測する。実験は End Device の数を 1 から 6 台まで変化させ、それぞれ 30 回行った。

なお、ZigBee の通信には KVP(Key Value Pair) フレームを使用している。ZigBee の通信に合わせるため、IEEE802.15.4 上に作成した提案手法のペイロード長を 1st パケットと send パケットは 21Byte とする。また、APS 層 ACK に合わせるため各 ACK パケットの大きさを 20Byte とする。

4.3.2 ACK 方式比較実験結果

図 4.4 は実験結果を表している。横軸は End Device の数を表し、縦軸は計測した時間の平均値を表している。IEEE802.15.4ACK を使用した場合、End Device が 2 つ以上あると ACK の誤認識が発生し、End Device がパケットを送信しなくなり、実験が行えなくなった。そのため IEEE802.15.4ACK を用いた実験は行えなかった。

実験結果より、IEEE802.15.4 上で提案プロトコルを使用した方が速い通信ができることが分かった。また、ZigBee を使用した場合、端末数が増えるにしたがってデータの分散が大きくなっていった。最

も分散の差が大きい6台の場合、IEEE802.15.4とZigBeeとの分散の間には100倍以上の差があった。

この結果から、ZigBeeはIEEE 802.15.4上で動作するためプロトコルスタックの処理に時間がかかっているという事が言える。また、ZigBeeはIEEE802.15.4に比べデータの分散が大きく、提案手法を評価するうえで正確なデータを取りにくいことも示唆している。

以上の結果より、本論では以降、提案したACKを使用しIEEE802.15.4上で実験を行っていく。

表 4.1: シミュレーション諸元
Table. 4.1 Simulation Parameter.

Speed	250[kbps]
Send Packets Size	127[Byte]
Ack Packets Size	12[Byte]
Trial	100[times]

4.4 TGD の評価実験

本提案手法の有効性を調べるために、実機実験を行う。実機実験によって、本提案手法が実際に動作するのかを確認する。また、本実験のネットワークトポロジは 4.3 章のように単純なものとする。これは、単純なモデルを用いることで、複雑なトポロジの場合も類推できるためである。

4.4.1 マルチエージェントシミュレーション

提案手法の効果を確認するために、シミュレーション実験を行った。シミュレーションは、CSMA/CA による複雑な系を扱うため、モンテカルロ法によるマルチエージェントシミュレーションを用いる。

シミュレーションには、Router を中心とし End Device を周囲に配置したスター型のネットワークトポロジを用いる。また、すべての端末はすべてのパケットを検出可能であるとする。パケットが送信された場合、必ず通信に成功するものとする。ただし、パケット衝突が起こった場合、衝突したパケットは消失する。End Device の数を 2,4,8,16,32,64 と変化させて実験を行なう。各 End Device は同時に送信を試み始め、CSMA/CA と TGD による待ち時間が最初に終わった端末がパケットを送信する。以降、各 End Device の送信開始時間は、CSMA/CA と TGD の待ち時間並びに通信時間によって変化していく。また、グループ分割数は 2 とする。パケットを受信した Router は CSMA/CA を行い ACK の送信を試みる。Router がすべての End Device からのパケットを受信し Ack を返すまでの時間を計測する。シミュレーションパラメータを表 4.1 に示す。実験は、slot0(既存手法)のときの平均スループットを 1 とした場合の平均スループット比を求める。ここで、スループットは最小必要パケットサイズを通信時間で割ったものとする。

実験結果を図 4.5 に示す。横軸は TGD のスロット数、縦軸はスループット比を表す。シミュレーション実験の結果、我々の提案手法を使用することで、スループットを高める効果があることがわかった。また、端末数が多くなりスループットが低くなる場合、スループットを高めるには TGD の待ち時間を多くすればよい傾向にあることがわかった。以上のことから、シミュレーション実験によって我々

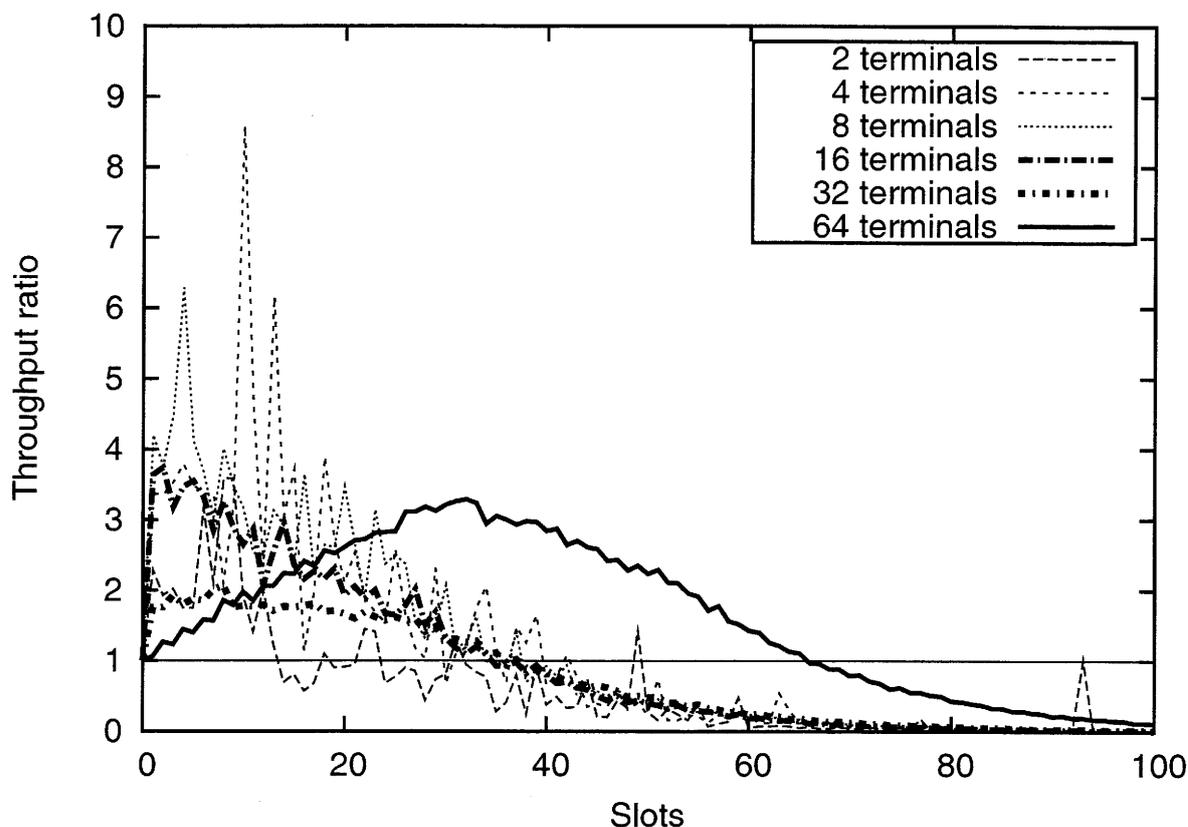


図 4.5: シミュレーション実験結果
Fig. 4.5 Simulation results

の提案手法の効果があることが分かった。

4.4.2 実機実験

提案手法が実際に動作するかどうかを確認するために実機実験を行った。実験は End Device の数を 8 台と 16 台の 2 種類について行った。

まず、PC に接続した Router を中心に半径 30cm の円周上に端末群を配置する。これは、RSSI に差をなくすための措置である。図 4.6 に実際の実験での端末は位置の様子を示す。また、4.3 節の実験結果より、本実験は複数台の端末が動作するため我々の提案する ACK を使用する。次に、PC は接続した Router にデータを送信する。Router はペイロードサイズ 21Byte のデータをブロードキャスト送信する。ブロードキャストパケットを受け取った End Device は、ペイロードサイズ 1Byte の ACK パケットが返ってくるまでペイロードサイズ 21Byte のデータを送信し続ける。ACK パケットを受信した場合、送信をやめる。このとき、End Device は送信するタイミングを CSMA/CA と TGD による待ち時間によって制御されている。Router は、End Device からのデータを受け取るたびに End Device の ID を記録する。また、Router は受信したパケットへの ACK を送信し終わるまで、他のパケットは

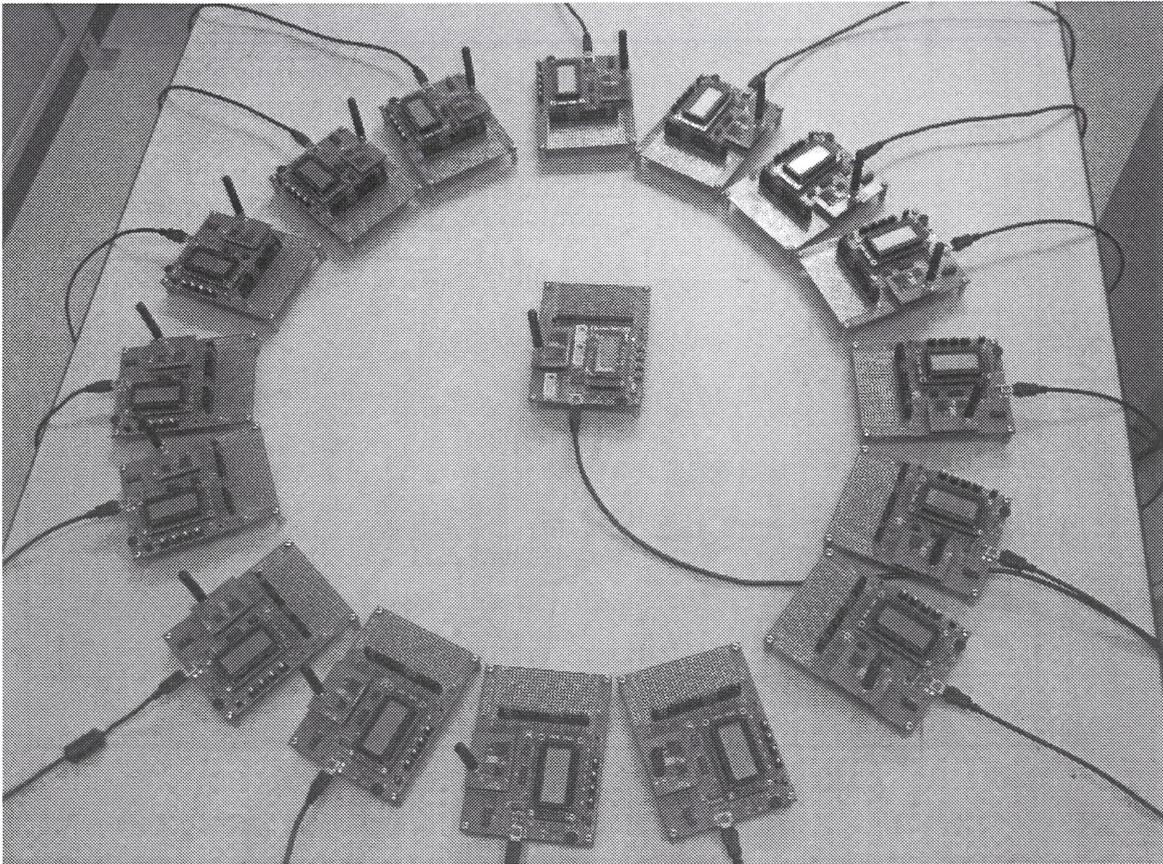


図 4.6: 実機実験端末配置
Fig. 4.6 experiment terminals on the field

受け取らない。16 台すべての端末の ID を記録したところで、Router は PC にデータを送信する。PC はデータを送信してから受信するまでの時間を計測する。実験はスロット数とグループ数を変え、それぞれ 100 回試行した。

TGD を実装するうえで、どの程度のスロット数の待ち時間が最適な値であるかを知る必要がある。そこで、まず、TGD のスロット数の変化が、グループ分けにどのような効果をもたらすのかを実機実験によって確認した。実験は、16 台の端末でグループ数を 2 つとしスロット数を変化させて測定した。

実験結果を図 4.7 に示す。横軸はスロット数を表し、縦軸は通信にかかった平均の時間を [msec] 単位で表している。ここで、スロット数 0 とは TGD の待ち時間が無い場合を意味している。この結果より、実機実験においてグループ数を 2 つにした場合、TGD の効果により、高速化が可能なことが確認できた。また、この結果はシミュレーション実験の結果とも合致する。具体的には、16 台の実験の場合、スロット数が 0 のときに全ての通信が終わるまで約 830[msec] かかっているのに対し、スロット数が 88 の場合に約 610[msec] となり、約 25% の高速化に成功している。同じく 8 台の端末の場合、スロット数が 0 の時に約 311[msec] かかっているのに対し、スロット数が 44 の場合に約 260[msec] と

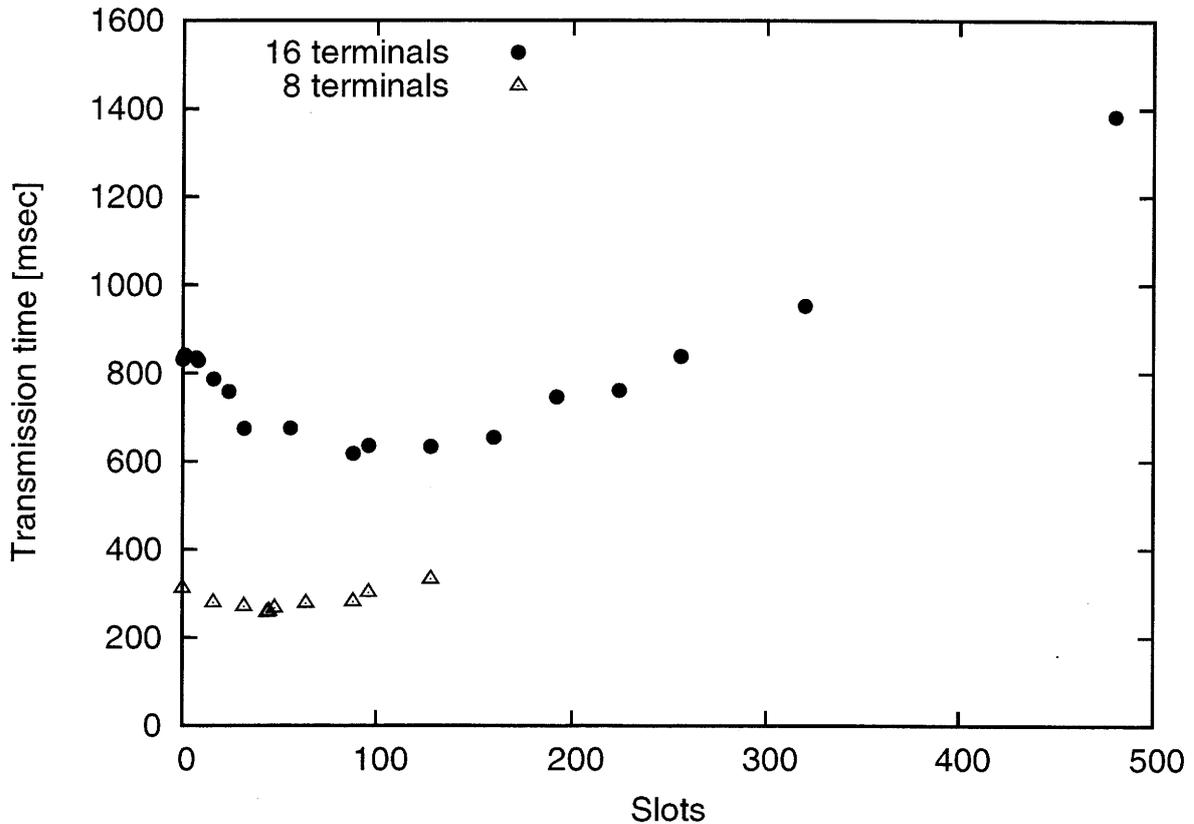


図 4.7: スロット数変化実験結果
Fig. 4.7 Change Slot Experiment Result

なり、約 16%の高速化に成功している。

また、16 台の場合、8slot までは僅かな減少であるのに対し、16slot から減少の幅は大きくなり始める。最終的に 88slot が一番速くなり安定し、その後時間は増加傾向に転じる。16 台の場合、実験結果より 1つのパケットを送信するのに平均で 2.3 回分の CSMA/CA による待ち時間が必要になる。TGD のウェイトが短すぎる場合、送信ができずに CSMA/CA による遅延が発生する。また、TGD のウェイトが長すぎる場合、本実験は送信端末数が時間の経過に従い減っていくため、時間の経過と共に TGD による遅延が発生する。従って、2 回分の CSMA/CA の待ち時間 ($2 * 44slot = 88slot$) を TGD として与えた値が本実験の最適値となる。また最適な待ち時間の場合、Router は 1 目目のパケットの受信直後に、CSMA/CA を行い ACK の送信が可能になる。そのため Router は ACK の送信に最も遅延が発生しない通信によってデータ伝送が可能となる。

8 台の場合も同様のことが言え、1 回分の CSMA/CA の待ち時間が TGD の最適値となる。従って本実験の結果を一般化すると以下の式によってグループ化の最適スロットが求められる。

$$f_{int} \left(\frac{Size/Speed}{t_{ave}} \right) * t_{ave} \quad (4.1)$$

ここで、 $Size$ は伝送するパケット長、 $Speed$ は伝送に掛かる実際の速度、 t_{ave} は CSMA/CA の平均時間を表す。また関数 $f_{int}()$ は小数点以下の切り捨てを意味する。パケット長が増えた場合、あるいは伝送速度が遅くなった場合、最適なスロット数は増加する。

この実験結果より、端末数が増えるほど伝送速度が遅くなるが、効率的なスロット数が設定できれば我々のグループ化手法により高速化が可能になることがわかった。さらに、高々16台の端末で、単純なネットワークポロジでも本提案手法の効果を確認することが出来た。このことは、ネットワークポロジが複雑になる場合や、端末数が増加した場合に我々の手法が効果を発揮することを示唆している。

TGD の待ち時間の最適値が実機実験により求まった。次は最適なグループ数を知る必要がある。そこで、グループ数を変化させる実機実験を行った。

実験はこれまでと同様に16台の端末群で行った。グループ数は1,2,4,8,16で行った。グループ数1とはグループ分けを行わなかったことを意味する。また、各実験のグループ1に属する端末はCSMA/CA以外の待ち時間を持たないものとする。

それぞれのグループの待ちスロットを88slot単位(最大で88*15 slot)で変化させた場合と一番待ち時間の多いグループの待ちスロットを約90slot付近にし均等に分割する場合の二種類の実験を行った。さらに、一番待ち時間の多いグループの待ちスロットを約45slot付近にする場合の端末群8台の実験も行った。端末群8台の実験は、グループ数を1,2,4,8とする。

実験結果を図4.8に示す。横軸はグループ数、縦軸は通信にかかった平均の時間を[msec]単位で表している。グループの待ちスロットを88slotずつにする場合、グループ数によっては通信時間が増加していることがわかる。対して、一番待ち時間の多いグループの待ちスロットを約90slotにする場合はグループ数が増えるにつれ、通信時間が速くなっていくことが分かった。これは、前述の実機実験の場合と同じようにTGDの待ち時間自体が遅延の原因になってしまうためだと考えられる。従って、TGDの待ち時間の最適値は16台の端末の場合、最大約90slotであることが分かった。

最終的に、グループ分けを行わなかった場合は約800[msec]だった通信時間が、16グループに分けた場合は約470[msec]となり、約41%の高速化に成功していることが分かった。また、グループ数が2のときグループ数1の場合よりも大幅に高速化している。さらに、グループ数を4つ以上にした場合、2つのときと比べて大きな差は見られない。Tukey HSD (Honestly Significant Difference) 法による多重比較によって、有意水準 $p < .001$ でグループ数1とグループ数2の平均値は、その他の平均値に対してそれぞれ有意に差があることが分かった。

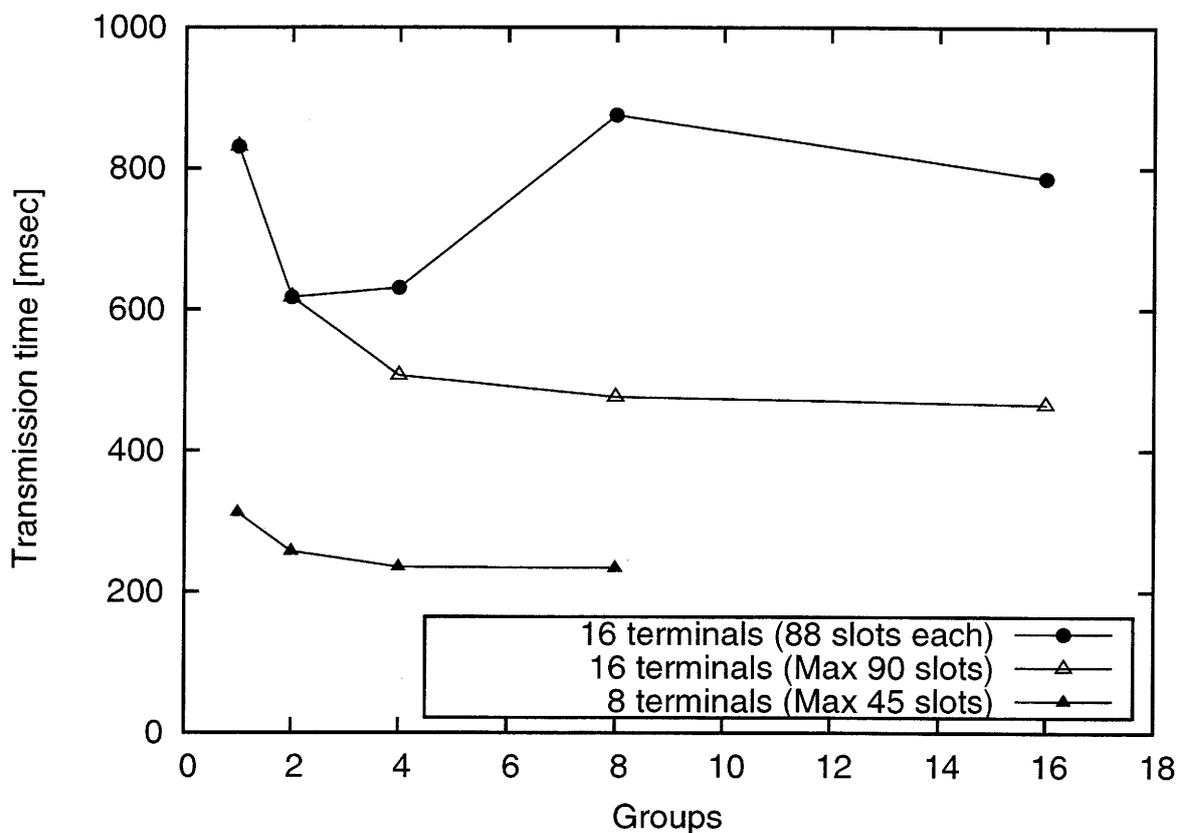


図 4.8: グループ数変化実験結果
Fig. 4.8 Change Groups Experiment Result

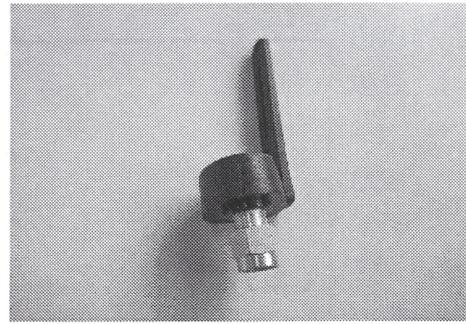
端末群の数を 8 台にした実験の場合でも、同様の結果を得ることができた。端末群が 8 台の場合は、グループ分けを行わなかった場合、約 310[msec] だった通信時間が、最速で約 230[msec] と約 26% の高速化に成功していることが分かった。

以上のことから、実機において、端末数が少ない場合グループ数を 4 つ以上に増やしたとしても、提案手法の効果は強く現れないことが分かった。しかし、提案手法を用いることで 16 台の端末を用いた場合、40% 以上の通信の高速化に成功した。また、最適なスロット数の場合、グループ数を増やすほど高速化ができることが分かった。さらに、端末群の台数を変えた場合でも提案手法による高速化が行えた。

従来の IEEE802.15.4 の CSMA/CA では各端末が同時に近い値の時間待機を行うこと手法であるため、CSMA/CA による遅延が発生しやすくなる。本手法はこの実験の結果により TGD の待機時間をグループ毎にずらすことによって CSMA/CA をより効率的に行えることがわかった。また、スロット数変化実験により 16 台を 2 グループに分けた今回の実験では、88slot が最適値となることが示された。本実験は、時間経過と共に送信する端末数が減り、トラフィックが減っていくため、88slot の時間内でより細かく待ち時間を分割して与えた場合、伝送速度の向上が行える。



(a)



(b)

図 4.9: 実験に使用したアンテナ

Fig. 4.9 Antenna

4.5 RSSI を用いた TGD の拡張

自律分散型のネットワークに我々の提案する手法を適用させる場合、グループ分けの自動化が必要になる。その様な自動化手法の一つとして、我々は RSSI を用いた TGD の拡張を行う。RSSI は距離や環境といった端末間の関係性によって変化する。そのような RSSI をグループ分けの指標として用いることで、我々は自律的なグループ分けを実現する。

距離の変化によって RSSI を制御する場合、マルチパスの影響等を考慮する必要があり、再現性のある実験を行うことは難しい。そこで、電力利得の異なるアンテナを使用し RSSI を変化させて実験を行う。

また、前述までの実験により、2 グループに分割することで TGD の効果が期待できる。そこでアンテナゲインの異なる 2 種類のアンテナを使用して実験を行う。図 4.9 に本実験で使用するアンテナを示す。図 4.9 の (a) は指向性のないアンテナ、(b) は指向性のあるアンテナである。以降それぞれをゲインの低いアンテナをアンテナ A、ゲインの高いアンテナをアンテナ B と呼ぶ。アンテナ B はアンテナ A と比べ、アンテナの向きにより、同じ出力電圧、同程度の距離にある場合、送受信ともに RSSI の値は大きくなる。

実験は手動でグループ分けを行う実験と自律的にグループ分けを行う実験の二種類行う。まず、アンテナを換えたことでグループ分けにどのような変化が出るかを知るためにアンテナを二種類使って手動でグループを二種類に分けた実験を行う。次に、アンテナの RSSI 特性を測って、グループ分けの指標を確認し自律的なグループ分けを行い効果を測定する。

実験は、4.4 章の実験の環境と同じ環境で行う。また、16 台の端末を半分に分けそれぞれにアンテナ

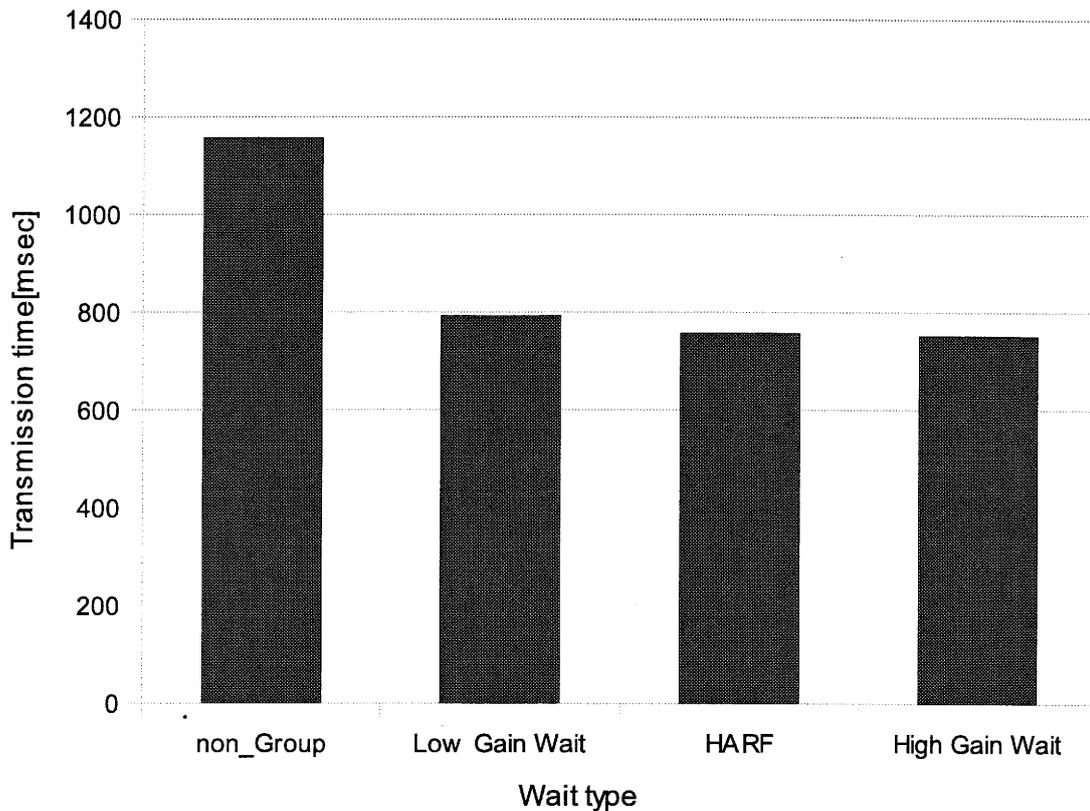


図 4.10: 手動グループ分け実験
Fig. 4.10 non-Automatic group divide using RSSI

A, B を装着し実験を行う。Router にはアンテナ A を使用する。前述の実機実験と同じように Router が周囲の 16 台の End Device に対して 1st パケットを送り、1st パケットを受け取った End Device が Router にパケットを送信し、すべての端末からのパケットを受信した時間を PC を用いて測定する。実験は各 100 回行い、平均値を求めた。

4.5.1 手動グループ分け

アンテナの種類を増やすことでグループ分けにどのような効果をもたらすのかを知るために、手動でグループ分けを行い、16 台の端末からの応答時間を計測する実験を行う。実験は、グループ分けを行わなかった“non-Group”，RSSI 値の小さいアンテナ A を装着した端末群に待ち時間を与えた“Low Gain Wait”，RSSI 値の大きいアンテナ B を装着した端末群に待ち時間を与えた“High Gain Wait”，アンテナの種類に依存せず端末群を半分に分けた“HARF”の 4 種類について行った。

図 4.10 に手動グループ分け実験の結果を示す。横軸は待ち時間の種類、縦軸は通信時間の平均を表している。

図 4.10 より、これまでの実験に比べ全体的に 200[msec] ほど遅延が発生している。これは、アン

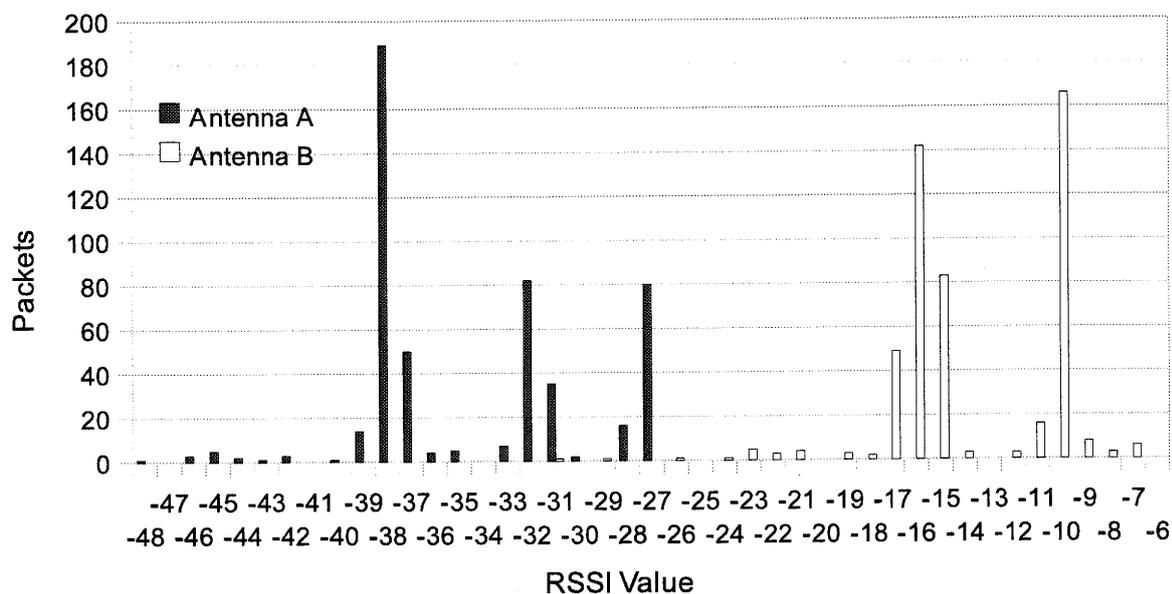


図 4.11: RSSI 測定実験
Fig. 4.11 Measured RSSI for each antenna

テナ B は受信感度、送信電力ともにアンテナ A に比べ高くなるため、CSMA/CA の遅延時間が発生しやすくなったためである。しかしながら、グループ分けを行った場合約 400[msec] の高速化に成功している。このことから、グループ分けの効果は RSSI を変えた場合にも変わらずに存在することが分かった。また、Low Gain Wait に比べ High Gain Wait の方が速い通信が可能な傾向にあることが分かった。さらに HARF は Low Gain Wait と High Gain Wait の間の値になっているため、アンテナを変えたことによる RSSI の変化が通信時間に影響を与えることが分かった。

2 種類のアンテナを使用することで、通信時間に影響が出ることが分かった。そこで、RSSI の差による自律的なグループ分けを行いその特性を知る必要がある。そのために、自律的グループ分けの実験を行う。

自律的グループ分けを実現するうえで、各アンテナの特性を知る必要がある。そこで、各アンテナにおける RSSI の値を測定する。次に、その測定した値を元に RSSI のしきい値を決め、自律的グループ分けのパラメタとして利用する。最後に自律的グループ分けを行った TGD の拡張を用いて、その特性を知る実験を行う。そこで、アンテナを変え、端末間距離を 30cm とし任意の位置に配置した Router と End Device を使用し RSSI 値を計測した。実験はアンテナ毎に 500 回行った。

図 4.11 に測定した RSSI の結果を示す。横軸は受信したパケットの RSSI 値、縦軸はパケット数を表している。

2 つのアンテナで -30[dB]~ -25[dB] の間で RSSI 値が重なって計測されている箇所がある。これは、

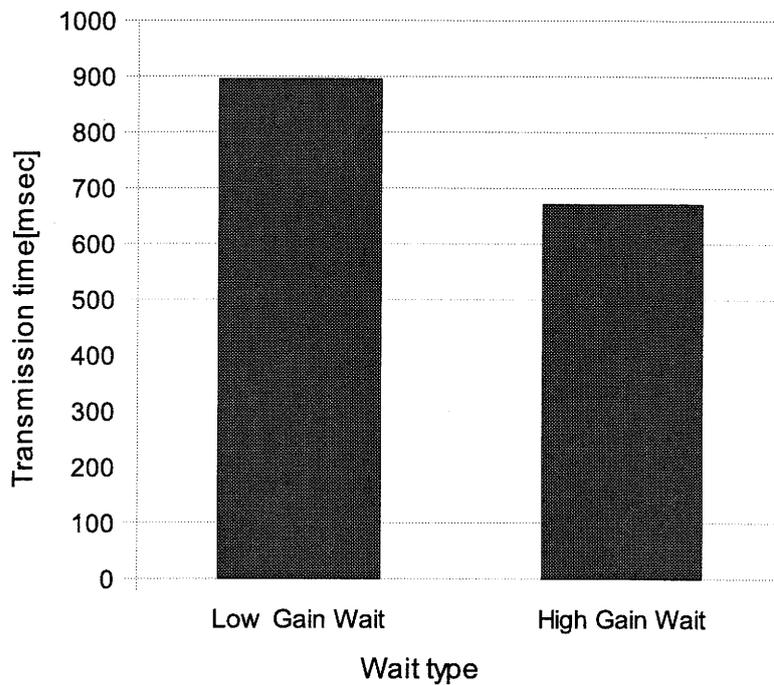


図 4.12: 自動グループ分け結果
Fig. 4.12 Automatic group divide using RSSI

アンテナ毎に正確な棲み分けができないことを意味している。しかし、-24[dB]で区切れば、若干重なっていても500個中十数個程度なので、グループ分けへの影響は少ないことが分かった。従って、本論では自律的なグループ分けのRSSIのしきい値を-24[dB]とし、それによってグループ分けを行うこととする。

RSSIの値をグループ分けの指標に用いて、自律的グループ分けを実現する。本実験では、End Deviceは1stパケットを受信した場合、そのRSSIを記録し自身のグループを決定する。RSSIの値が-24[dB]以下の端末に待ち時間を与えた群を“Low Gain Wait”，RSSIの値が-24[dB]よりも大きい端末に待ち時間を与えた群を“High Gain Wait”として実験を行った。実験は、他の実験と同じように100回の測定値の平均を求めた。

図 4.12 に自律的グループ分け実験の結果を示す。横軸は待ち時間の種類、縦軸は平均の通信時間を表している。図 4.12 より、RSSIの小さいものに待ち時間を与えるよりも大きいものに待ち時間を与えた方が伝送速度が約25%速くなることが分かった。

さらに Tukey HSD 法により有意水準 $p < .001$ で有意な差があることが分かった。これは RSSI の大きいものが頻繁に送信を行うことで、通信路全体に負荷を与え、CSMA/CA による待ち時間増加の原因になっているため、RSSI の強いものの送信確率を減らすことにより通信路全体の負荷が抑えられるためである。また、RSSI の受信感度が強いアンテナはそれだけ CCA によるチャネルアセスメン

トの感度も高くなり、CSMA/CA の待ち時間による遅延も発生しやすい。そのため RSSI の大きい端末の通信に待ち時間を持たせることにより、感度の高い端末の CSMA/CA による無駄な待ち時間を減らすことが可能になった。距離と RSSI の関係によるグループ分けを行おうとした場合、後者の理由は該当しなくなるが、前者の理由により高速化が可能である。

また手動グループ分けと自律的グループ分けの実験結果より、RSSI を使用したグループ分けが可能であることが分かった。これにより、本手法は RSSI を使用して自律分散的に動作可能であることが示された。また、手動グループ分け実験よりも、Low Gain Wait と High Gain Wait の差が大きくなっているのが分かる。これは、RSSI を利用し自律的にグループ分けを実現したため、受信感度や送信電力が弱い端末が最適化され通信を行いやすくなったためである。

4.6 結言

本論では、IEEE802.15.4 が複数の端末で同時に通信を行う場合の様々な問題を提起した。また解決策として、簡易な ACK プロトコルと CSMA/CA の効果を高める TGD という手法を提案した。

実験の結果、本論で提案した ACK プロトコルによって IEEE 802.15.4 ACK のブロードキャストによる問題を解決することができた。さらに、実機実験を通して、TGD を使用した場合約 41% の高速化が行えた。

さらに、我々は自律分散環境でも動作する TGD の拡張として RSSI を用いた手法を一例として提案した。実機実験より RSSI の小さいものに待ち時間を与えるよりも大きいものに待ち時間を与えた方が伝送速度が約 25% 速くなることが分かった。

以上のことから、本論では IEEE 802.15.4 の高速化や干渉低減の対策にアプリケーションレベルで有効な手法を確立することができた。また、通信時間が減るということは、省電力にもつながる。近距離無線通信をセンサネットワークに使用する場合、低消費電力化は重要な課題となっている。我々の提案手法は IEEE802.15.4 のさらなる低消費電力化に貢献できる。また、RSSI 値は距離との相関が高いことから、この結果は端末間距離によるグループ分けが実現可能であることを示唆している。

今後の課題として、実際のセンサネットワークに TGD を適用させ高速かつ低消費電力なセンサネットワークを作成することが挙げられる。さらに、距離によるグループ分けの実現や端末が置かれた環境によるグループ分け等、TGD を使用したネットワークの最適化を行っていくことが挙げられる。

第5章 まとめ

5.1 本論のまとめ

高性能なカメラなどによる入力系や、高精度なパーソナルコンピュータなどの処理による画像のオブジェクト認識が行われている。しかし、簡易な画像入力系や高圧縮符号化を適用した場合、従来の認識手法では性能が極端に低下してしまう。本論では簡易な入力系を搭載した多数の端末をワイヤレスネットワークでつなぎ、一つの認識システムとして活用するワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用を提案した。本論では、単純な情報処理と簡単な情報通信しかできない多数の端末が寄り集まることで、高度な知的処理を行い、環境認識を効率的に行う手法を提案した。各端末の情報伝達は簡易なものであるが、それらの関連性から相互作用が生まれ、ネットワークの持つ知識や経験をもとにネットワーク自体が知的に環境を認識する。そのことによって、環境認識を実現している。

本論ではワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用例として、渋滞に巻き込まれたときに渋滞の先頭から自車までの位置を推定する渋滞距離推定システムを提案した。様々なシミュレーション実験や実機実験の結果、周波数分割多重を使用した場合、単車線ではシステムは普及率 60% 程度で動作することが分かった。また、その時の距離推定の誤差率は提案するマルチハンドシェイクを使用した場合、約 0.2 以内であることが分かった。また、本システムはプローブカーシステムでは行えないサーバを介しない通信を実現した。さらに、普及率が 50% の場合でも距離推定の精度は 90% 程度あり、十分に実用に耐えうる数字であると考えられる。また、プローブカーシステムで必要な集中管理機構やインフラストラクチャの設置を行わず、簡易に渋滞情報を取得することが出来た。さらに、普及率が 20% 程度でも 5 車線あれば、ネットワーク形成に成功することが分かった。さらに、すべての車線で我々の手法の精度は普及率が増えるに連れ、向上していくことが分かった。さらに、我々の手法は 50% の普及率を超えると 10% を切る誤差率で推定することが可能であることが分かった。

さらに本論では、IEEE802.15.4 が複数の端末で同時に通信を行う場合の様々な問題を提起した。また解決策として、簡易な ACK プロトコルと CSMA/CA の効果を高める TGD という手法を提案した。

実験の結果、本論で提案した ACK プロトコルによって IEEE 802.15.4 ACK のブロードキャストによる問題を解決することができた。さらに、実機実験を通して、TGD を使用した場合約 41% の高速

化が行えた。さらに、我々は自律分散環境でも動作する TGD の拡張として RSSI を用いた手法を一例として提案した。実機実験より RSSI の小さいものに待ち時間を与えるよりも大きいものに待ち時間を与えた方が伝送速度が約 25%速くなることが分かった。以上のことから、本論では IEEE 802.15.4 の高速化や干渉低減の対策にアプリケーションレベルで有効な手法を確立することができた。また、通信時間が減るということは、省電力にもつながる。近距離無線通信をセンサネットワークに使用する場合、低消費電力化は重要な課題となっている。我々の提案手法は IEEE802.15.4 のさらなる低消費電力化に貢献できる。また、RSSI 値は距離との相関が高いことから、この結果は端末間距離によるグループ分けが実現可能であることを示唆している。

5.2 今後の展望

本論では、簡易な入力系が複数集まることによって実現されるワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用と効率化を行った。

ワイヤレスセルラネットワークの環境認識への応用の一例として、渋滞環境の認識への適応に成功した。しかしながら、ワイヤレスセルラネットワークは渋滞環境認識へ特化した認識手法ではない。今後は、この認識手法を害獣検知システムの実現 [113] などに応用していく予定である。

また、本論で提案したワイヤレスセルラネットワークの干渉低減手法は、センサネットワークやアドホックネットワークにおける課題の解決手法として大変有用である。CSMA/CA が考え出されたとき、今日のような、接続端末数の大規模化は予想されていなかったのではないかと考えられる。様々な微細加工技術の発展やコストの低下がもたらしたネットワークの転換点とも言える時代において、本論で示した TGD や ACK プロトコルはさらなる効率化により一層の貢献ができるものである。今後は、CSMA/CA に変わる、大規模な端末群を想定した効率的な多重化手法の研究を続けていきたい。

近年、センサネットワークの応用分野としてコンテキストウェアネスの研究が行われている。環境からの情報の認識を計算機上で実現しようとする場合、刻一刻と変化する観測対象の状態を逐一計算機に入力しなければならない。その入力をユーザが意識しないで行う手法がコンテキストウェアネスであり、人間と人間のすぐ側の物の状態を認識することにより、新たな情報の価値を見出そうとしている。コンテキストウェアネスの利用にセンサネットワークは大変有用である。例えば、Beigl らは、コーヒーカップの底に傾きセンサと温度センサを取り付け、それらの情報を通信することによって、コーヒーカップを使用しているユーザの状態を認識するシステムである MediaCup [114] を作成した。本論で提案した、ワイヤレスセルラネットワークは環境認識への応用性が高い。そこで、今後はこのようなコンテキストウェアネスへ展開していく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始有益なご指導とご助言を下された静岡大学創造科学技術大学院情報科学専攻教授杉浦彰彦先生に深く心から感謝いたします。

また，本論を書く上で貴重なお時間を頂戴し，様々な助言をくださった静岡大学創造科学技術大学院情報科学専攻教授渡辺尚先生，静岡大学創造科学技術大学院ナノビジョン工学専攻教授廣本宣久先生，静岡大学創造科学技術大学院情報科学専攻峰野博史先生に感謝の意を表したいと思います。

また，学位取得に協力していただいた仙台高等専門学校情報通信工学科学科長兼副校長藤木なほみ先生，仙台高等専門学校情報通信工学学科教授兼副校長高橋薫先生をはじめ，仙台高等専門学校の先生方に深く感謝いたします。

また，研究に協力してくださった杉浦研究室の皆様に心からの感謝を捧げます。

参考文献

- [1] F. Campagne, S. Neves, C. wenChang, L. Skrabanek, P.T. Ram, R. Iyengar, and H. Weinstein, “Quantitative Information Management for the Biochemical Computation of Cellular Networks,” *Science The Signal Transduction knowledge Environment*, vol.2004, no.248, p.pl11, 2004.
- [2] 呂 建明, 藤本 稔, 谷萩隆嗣, “ニューラルネットワークを用いたカラー劣化画像の雑音除去の一方法,” *電子情報通信学会論文誌 A*, vol.J86-A, no.5, pp.529–539, May 2003.
- [3] 武田有志, 川原英哉, 菊池之裕, 村越英樹, 舟久保登, “論理型推論のニューラルネットワークによる実現,” *電子情報通信学会論文誌 D-II*, vol.J84-D-II, no.7, pp.1456–1463, Sep. 2001.
- [4] 加藤浩介, 坂和正敏, 池亀敏則, “ファジー目標を考慮した大規模多目的多次元 0-1 ナップサック問題に対する分解手続きを含む遺伝的アルゴリズムの改良,” *電子情報通信学会論文誌 A*, vol.J82-A, no.3, pp.386–393, Mar. 1999.
- [5] 金久保正明, 萩原将文, “擬似シンプレクス法併用型パラメータフリー遺伝的アルゴリズム,” *電子情報通信学会論文誌 D-I*, vol.J87-D-I, no.6, pp.721–729, Jun. 2004.
- [6] 木津左千夫, 澤井秀文, 足立 進, “可変な局所集団の適応的探索を用いたパラメータフリー遺伝的アルゴリズムとその並列分散処理への拡張,” *電子情報通信学会論文誌 D-II*, vol.J82-D-II, no.3, pp.512–521, Mar. 1999.
- [7] 村川正宏, 野田芳弘, 樋口哲也, “遺伝的アルゴリズムを用いた光ファイバの自動調芯システム,” *電子情報通信学会論文誌 D-I*, vol.J84-D-I, no.6, pp.878–887, Jun. 2001.
- [8] 奥原浩之, 田中稔次朗, 石井博昭, “フローモデルにおける遺伝的アルゴリズムを用いた適応的なルーチングとフロー制御,” *電子情報通信学会論文誌 D-1*, vol.J84-D-I, no.11, pp.1563–1572, Nov. 2001.
- [9] 石田好輝, “複雑系としての免疫システム-免疫系に学んだ情報システムに向けて,” *システム制御情報学会誌*, vol.42, no.9, pp.487–494, 1998.

- [10] 田村宏樹, 唐 政, 山口貴之, 石井雅博, “あいまいさを考慮した免疫ネットワークとそのパターン認識システムへの応用,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J86-A, no.6, pp.703–712, Jun. 2003.
- [11] 石田好輝, “自律分散診断アルゴリズム - 免疫ネットワークモデル -,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol.J75-D-II, no.3, pp.646–651, Mar. 1992.
- [12] M.W. Jorgensen, E.H. Ostergaard, and H.H. Lund, “Modular ATRON: Modules for a self-reconfigurable robot,” Proc. of the Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004), vol.2, pp.2068–2073, Oct. 2004.
- [13] 波田尚哉, 三宅哲夫, “アクティブビジョンシステムによる遮へいを伴う移動物体の追跡,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J84-D2, no.1, pp.93–101, 2001.
- [14] 川瀬徹也, 鶴之園秀志, 江原直樹, 笹瀬 巖, “旋回加速度推定を行うカルマンフィルタ,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J82-B, no.11, pp.2170–2180, 1999.
- [15] 川本大輔, 柱尾正敬, 川瀬徹也, 佐藤玲司, 笹瀬 巖, “2方向の角速度による等速・等角速度予測を行うカルマンフィルタ,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J86-B, no.2, pp.255–267, 2003.
- [16] 海老根巧, 浜田 望, “観測系の運動を考慮したオプティカルフロー推定に基づく運動物体検出,” 電子情報通信学会論文誌 D-2, vol.J83-D-II, no.6, pp.1498–1506, 2000.
- [17] 高橋祐介, 佐藤貴美, 平田恭二, “車載カメラ映像中のオブジェクト認識方式と認識結果に基づく自動要約への応用,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J88-A, no.2, pp.110–121, 2005.
- [18] 内村圭一, 木村英雄, 脇山慎也, “道路情景カラー画像における円形道路標識の抽出及び認識,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J81-A, no.4, pp.546–553, 1998.
- [19] K. Hirata, E. Kasutani, and Y. Hara, “On Image Segmentation for Object-based Image Retrieval,” Proc. ICPR, vol.3, pp.1031–1034, 2002.
- [20] A. Mohan, C. Papageorgiou, and T. Poggio, “Example-Based Object Detection in Images by Components,” IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, vol.23, no.4, pp.349–361, April 2001.

- [21] S. Geman and D. Geman, "Stochastic Relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian Restoration of Images," IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol.6, no.6, pp.721–741, 1984.
- [22] Y. Wang and S.-C. Zhu, "Analysis and Synthesis of Textured Motion: Particles and Waves," IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, vol.26, no.10, pp.1348–1363, Oct. 2004.
- [23] 渡部秀一, 工藤博幸, 斉藤恒雄, "ベイズ推定を用いた投影方向数制限下でのCT画像再構成," 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol.J75-D-II, no.8, pp.1440–1446, Aug. 1992.
- [24] 廣安知之, 三木光範, 小倉真貴, 岡本祐幸, "遺伝的交叉を用いた並列シミュレーテッドアニーリングの検討," 情報処理学会論文誌, vol.43, no.SIG7(TOM6), pp.70–79, Sep. 2002.
- [25] 古賀久志, 杉山英行, 杉内崇浩, 渡辺俊典, "近傍集合表現を利用した画像からのオブジェクト自動抽出," 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J91-D, no.5, pp.1418–1433, 2008.
- [26] 高橋謙輔, 栗原 聡, 唐津登志夫, 菅原俊治, "フェロモンモデルを用いたセンサネットワークトポロジーの自動推定," 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J92-D, no.11, pp.1851–1860, 2009.
- [27] J.M. Kahn, R.H. Katz, and K.S.J. Pister, "Next century challenges: Mobile networking for SMart Dust," Proc. 5th Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom), pp.271–278, 1999.
- [28] 藤田博之, "MEMS と次世代ナノテクノロジー," 電子情報通信学会論文誌 C, vol.J90-C, no.1, pp.25–33, 2007.
- [29] シルビアニッテル, グァンジン, 白石 陽, "センサネットワークにおけるネットワーク内空間推定," 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J88-A, no.12, pp.1413–1421, 2005.
- [30] S. Madden, M.J. Franklin, J. Hellerstein, and W. Hong, "TAG: Tiny AGgregate Queries in Ad-Hoc Sensor Networks," Proceedings of the 5th symposium on Operating systems design and implementation, vol.36, pp.131–146, 2002.
- [31] M.A. Oliver and R. Webster, "Kriging: a method of interpolation for geographical information systems," International Journal of Geographical Information Science, vol.4, no.3, pp.313–332, 1990.

- [32] J. Jubin and J.D. Tornow, "The DARPA Packet Radio Network Protocols," Proceedings of the IEEE, vol.75, no.1, pp.21–32, Jan. 1987.
- [33] D.B. Johnson and D.A. Maltz, "Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks," The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, vol.353, pp.153–181, 1996.
- [34] 阪田史郎, 青木秀憲, 間瀬憲一, "アドホックネットワークと無線 LAN メッシュネットワーク," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J89-B, no.6, pp.811–823, 2006.
- [35] J.P. Macker and M.S. Corson, "Mobile ad hoc networking and the IETF," Mobile Computing and Communications Review, vol.2, no.1, pp.99–114, 1998.
- [36] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, IETF, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>, Jul. 2003. Request for Comments: 3561.
- [37] 青野智之, 樋口啓介, 大平 孝, 小宮山牧兒, 笹岡秀一, "エスパアンテナを用いた IEEE802.15.4 無線秘密鍵共有システム," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J88-B, no.9, pp.1801–1812, 2005.
- [38] 大平 孝, 飯草恭一, "電子走査導波器アレーアンテナ," 電子情報通信学会論文誌 C, vol.J87-C, no.1, pp.12–31, 2004.
- [39] 山田真太郎, 高山潤也, 大山真司, "非計量多次元尺度法による受信電波強度の大小関係に着目した無線端末の位置計測," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J90-B, no.12, pp.1314–1325, 2007.
- [40] 朴 在赫, 中村康弘, "周辺ノードの相互監視情報に基づく AODV における不正ノードの検出と対策," 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J92-A, no.3, pp.150–162, 2009.
- [41] T. Clausen and P. Jacquet, Optimized Link State Routing Protocol(OLSR), IETF, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>, Oct. 2003. Request for Comments: 3626.
- [42] Z.J. Haas and M.R. Pearlman, "The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks," Proceedings of 6th IEEE International Conference on Universal Personal Communications, IEEE ICUPC'97, pp.562–566, Oct. 1997.
- [43] S.-Y. Ni, Y.-C. Tseng, Y.-S. Chen, and J.-P. Sheu, "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network," MobiCom '99 Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, pp.151–162, 1999.

- [44] 宇津圭祐, 石井啓之, “アドホックネットワークにおけるストリーミング配信向き負荷感応フ
ラッキング,” 電気学会論文誌, vol.130, no.8, pp.1367–1378, 2010.
- [45] 洞井晋一, 松浦知史, 藤川和利, 砂原秀樹, “時間と位置を考慮したセンサオーバーレイネット
ワークの提案と評価,” 情報処理学会論文誌, vol.49, no.2, pp.590–602, 2008.
- [46] 小川将克, 服部 武, 加山英俊, 梅田成視, “アドホックネットワークにおける動的な移動端末の
状態変化を用いたMACプロトコル,” 電子情報通信学会論文誌B, vol.J88-B, no.3, pp.643–655,
2005.
- [47] 峰野博史, 肥田一生, 水谷美穂, 宮内直人, 楠 和浩, 水野忠則, “移動機器連携ロケーション
トラッキング方式の提案,” 情報処理学会研究報告, pp.1–6, 2004.
- [48] S. Akihiko, B. Ryoichi, and K. Hideyuki, “An IEEE802.15.4-Based System for Locating Children
on Their School Commutes,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications
and Computer Sciences, vol.93, no.5, pp.950–957, 2010.
- [49] 佐藤弘和, 河口信夫, 稲垣康善, “指向性アンテナを用いた無線LANアクセスポイントの位置
推定,” 情報処理学会研究報告, pp.15–20, Nov. 2004.
- [50] 佐藤弘和, 伊藤誠悟, 河口信夫, “指向性アンテナを用いた無線LANアクセスポイントの位置
推定手法,” 電子情報通信学会論文誌 D-I, vol.J88-D-I, pp.1634–1647, Nov. 2005.
- [51] 小島一允, 檜原 茂, 横山輝明, 奥田 剛, 山口 英, “ユーザとの近接関係に基づいた最近
傍センサノード検知とデータ取得手法の提案,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J92-B, no.1,
pp.140–149, 2009.
- [52] 高島雅弘, 趙 大鵬, 柳原健太郎, 福井 潔, 福永 茂, 原 晋介, 北山研一, “センサネット
ワークにおける受信電力と最ゆう法を用いた位置推定,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J89-B,
no.5, pp.742–750, 2006.
- [53] A. Savvides, C.-C. Han, and M.B. Strivastava, “Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc net-
works of sensors,” Proceeding MobiCom '01 Proceedings of the 7th annual international conference
on Mobile computing and networking, pp.166–179, Apr. 2001.

- [54] 徳永雄一, 伊戸靖則, 平岡精一, 横田裕介, 大久保英嗣, “無線センサネットワークにおける Multilateration 位置推定方法の精度向上手法,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J91-B, no.9, pp.1113–1124, 2008.
- [55] N.B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, “The cricket location-support system,” Proceeding MobiCom '00 Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking, pp.32–43, 2000.
- [56] A. Harter, A. Hopper, P. Steggle, A. Ward, and P. Webster, “The Anatomy of a Context-Aware Application,” WIRELESS NETWORKS, vol.8, pp.187–197, 2002.
- [57] K. Whitehouse, C. Karlof, and D. Culler, “A practical evaluation of radio signal strength for ranging-based localization,” ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, vol.11, pp.41–52, Jan. 2007.
- [58] 川端 学, 朝生雅人, 斎川貴彦, 服部 武, “セルラーシステムにおける最ゆう推定法に基づく TDOA システムの位置検出性能評価,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J87-B, no.2, pp.285–291, Feb. 2004.
- [59] 谷口健太郎, 河野隆二, “TDOA 型センサネットワークにおける階層型粒子フィルタを用いた位置推定法,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J89-A, no.12, pp.1068–1078, 2006.
- [60] S.J. Godsill, A. Doucet, and M. West, “Monte Carlo Smoothing for Nonlinear Time Series,” Journal of the American Statistical Association, vol.99, no.465, pp.156–168, Mar. 2004.
- [61] 志村隆一郎, 笹瀬 巖, “受信パイロット信号の相関値と背景雑音の比に応じてテイラー級数推定法の重みを制御する tdoa を用いた移動端末測位,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J90-B, no.2, pp.178–189, 2007.
- [62] 徳永雄一, 小島泰三, 平岡精一, 横田裕介, 大久保英嗣, “無線ネットワークの時刻同期における中継スケジューリング手法,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J91-B, no.10, pp.1267–1278, 2008.
- [63] 古賀 禎, 田嶋裕久, 小瀬木滋, “ACAS 受動型測位における時刻検出方式の検討,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J89-B, no.7, pp.1198–1206, 2006.

- [64] 群 武治, 服部 武, “最尤選択合成を用いた群伝送アドホック通信,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J89-B, no.6, pp.935–945, 2006.
- [65] 藤井治樹, “ITS への期待とその発展基盤,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J91-A, no.1, pp.2–10, 2008.
- [66] “ISO/TC204,” 1992. <http://www.iso.org/>
- [67] 齊藤研次, 蕨野貴之, 杉山敬三, 西田知弘, “インターネット ITS における車両間 p2p 通信のための通信メディア切替評価装置の開発と評価,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J88-A, no.2, pp.196–207, 2005.
- [68] 金 帝演, 長谷川孝明, “高速道路と一般道路交差点での M 系列レーンマーカの配列方法と再位置特定について,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J88-A, no.2, pp.257–268, 2005.
- [69] T. Hasegawa, “The 21st century’s road platform Dot ITS and its applications-driving assistance system, software ETC, IP applications,” Intelligent Transportation Systems, 2002. Proceedings. The IEEE 5th International Conference on, pp.392–395, Sep. 2002.
- [70] 金 帝演, 長谷川孝明, “M-CubITS を用いた車両測位実験,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J89-A, no.11, pp.993–1003, 2006.
- [71] 久保人土, 杉浦彰彦, “楽譜情報の 3 次元コード化と携帯電話を利用した再生手法,” 電気学会論文誌 C, vol.128, no.10, pp.1582–1588, Oct. 2008.
- [72] 武富貴史, 佐藤智和, 横矢直和, “拡張現実感のための優先度情報を付加した自然特徴点ランドマークデータベースを用いた実時間カメラ位置・姿勢推定,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J92-D, no.8, pp.1440–1451, 2009.
- [73] 安永守利, 高見知親, 吉原郁夫, “FPGA を用いたナノ秒オーダ画像認識ハードウェア,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol.J84-D-II, no.10, pp.2280–2292, Oct. 2001.
- [74] A. Widodo, 長谷川孝明, “車々間通信ネットワークを含めた高度交通システムの評価のための自律走行交通流シミュレータ,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J82-B, no.11, pp.2002–2009, 1999.

- [75] A. Widodo, 長谷川孝明, “車々間通信ネットワークの交通流に与える効果について,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J82-B, no.11, pp.2010–2017, 1999.
- [76] M. Brackstone, G. Fisher, and M. McDonald, “THE USE OF PROBE VEHICLES ON MOTORWAYS, SOME EMPIRICAL OBSERVATIONS,” Proc. of the World Congress on ITS, Sydney, Australia, pp.1–12, 2001.
- [77] L. Zou, J.-M. Xu, and L.-X. Zhu, “Arterial speed studies with taxi equipped with global positioning receivers as probe vehicle,” Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2005. Proceedings. 2005 International Conference on, pp.1343–1347, 2005.
- [78] 砂原秀樹, 佐藤雅明, 植原啓介, 青木邦友, 村井 純, “IPCar : インターネットを利用した自動車プローブ情報システムの構築,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J85-B, no.4, pp.431–437, Apr. 2002.
- [79] 時津直樹, 高橋邦彦, “インターネット ITS プロジェクト (実験編),” 情報処理学会論文誌, vol.43, no.4, pp.376–385, 2002.
- [80] K. WAKAYAMA, T. TAJIMA, T. SATO, N. TOKITSU, and A. IWATA, “Evaluation Environment of Probe Car Data Reduction Method for Internet ITS,” IPSJ, vol.47 No.12, pp.2936–2946, Dec. 2003.
- [81] M. KUMAGAI, T. FUSHIKI, T. YOKOTA, and K. KIMITA, “Realtime Interpolation Method for Probe Car System Based on Feature Space Projection,” IPSJ, vol.47 No.7, pp.2133–2140, July 2006.
- [82] 高山 毅, 元田良孝, 千葉力也, 村田康之, 恵津森真仁, 村田嘉利, 池田哲夫, 佐藤永欣, 佐野嘉彦, “プローブパーソンによる集合知を用いた路面凍結情報提供方式の提案と評価,” 情報処理学会論文誌, vol.47, no.7, pp.2549–2573, Jul. 2007.
- [83] R.M. Metcalfe and D.R. Boggs, “Ethernet : Distributed Packet Switching for Local Computer Networks,” CACM, vol.19, no.5, pp.395–404, July 1976.
- [84] Y. NOMURA, C. Dermawan, and A. SUGIURA, “Construction of Information Delivery System using ZigBee,” IEICE, vol.105, no.620(WBS2005 64-73), pp.37–42, Feb. 2006.
- [85] K. INUI, H. KOBAYASHI, and A. SUGIURA, “Image Transfer Frequency Division Muiltplex Multi-hop Network Using IEEE802.15.4,” IEEJ, vol.130, no.1, pp.116–122, 2010.

- [86] S. Kajiwara, H. Kobayashi, A. Sugiura, and N. Ezaki, "Detection of Location for sensor nodes using ZigBee in the gymnasium," ICWN'08 The 2008 International Conference on Wireless Networks, pp.645–649, July 2008.
- [87] S. Kajiwara, H. Kobayashi, A. Sugiura, and N. Ezaki, "Localization using ZigBee in the communication the person influences," The 10th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium and the 5th International Symposium on NaNovision Science, pp.105–106, Nov. 2008.
- [88] 加納正章, 小林秀幸, 杉浦彰彦, "ZigBee を用いた搬送車用電力線通信," 電気学会論文誌, vol.129, no.8, pp.1611–1612, 2009.
- [89] T. Shigenaga, N. Ezaki, N. Hirotsu, and C. Miyaji, "Development of TOUCH VOLLEY - volleyball tactical support system," The 5th International Conference on the Engineering of Sport, vol.2, pp.589–595, 2004.
- [90] 梶原修平, 江崎修央, 重永貴博, 宮地 力, "バレーボールのスカウティングシステム Touch Volley における web ページによるデータ分析機能の実装," バレーボール研究, vol.9, no.1, pp.25–30, 2007.
- [91] N. Ishii, I. Kitahara, Y. Kameda, and Y. Ohta, "3D Tracking of a Soccer Ball Using Two Synchronized Cameras," PCM'07 Proceedings of the multimedia 8th Pacific Rim conference on Advances in multimedia information processing, pp.196–205, 2007.
- [92] T. KOIKE, M. TANAKA, and S. YOSHIDA, "Capacity Improvement of Multihop Inter-Vehicle Communication Networks by STBC Cooperative Relaying," IEE TRANS.COMMUN., vol.E88-B, no.9, pp.3546–3553, sep 2005.
- [93] K. SATO, M. FUJISE, S. SHIMIZU, and S. NISHI, "Millimeter-Wave High-Speed Spot Communication System Using Radio-Over-Fiber Technology," IEICE TRANS.ELECTRON, vol.E88-C, no.10, pp.1932–1938, Oct. 2005.
- [94] M. HIRAIWA, H. ASAKURA, T. NARITA, T. YASHIRO, H. SHIGENO, K. OKADA, "Dynamic Communication Zone Control Method on Autonomous Decentralized Based Roadside Network Infrastructure," IEICE TRANS.FUNDAMENTALS, vol.E88-A, no.7, pp.1786–1798, July 2005.

- [95] L.B. MICHAEL and M. NAKAGAWA, "Spread Spectrum Inter-Vehicle Communication Using Sector Antennas," *IEICE TRANS. FUNDAMENTALS.*, vol.E82-A, no.12, pp.2627–2633, Dec. 1999.
- [96] H. KUBOYAMA and S. OZAWA, "Measurement of Heavy Traffic in a Tunnel from Image Sequences," *IEICE D*, vol.J85-D-II, no.2, pp.210–218, 2002.
- [97] H. YAMAUCHI, F. OKA, and H. TAKAHASHI, "Unification of Road Map Informations Generated by Multiple Probe Cars," *IEICE Technical Report*, vol.ITS2006-62, pp.109–114, Feb. 2007.
- [98] "IEEE Standard for Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low - Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," 2003. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>
- [99] K.-J. MYOUNG, S.-Y. SHIN, H.-S. PARK, and W.-H. KWON, "IEEE 802.11b performance analysis in the presence of IEEE 802.15.4 interference," *IEICE TRANS. COMMUN*, vol.E90-B, pp.176–179, Jan. 2007.
- [100] E.-J. Kim, M. Kim, S.-K. Youm, S. Choi, and C.-H. Kang, "Priority-based service differentiation scheme for IEEE 802.15.4 sensor networks," *International Journal of Electronic and Communications*, pp.69–81, Nov. 2005.
- [101] T. Yusuke, S. Yuichiro, and S. Yukitoshi, "Examination of Antenna Combinations for UWB Ranging System," *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol.54, no.4, pp.1858–1864, April 2006.
- [102] K. OHARA, Y. NOJIMA, and H. ISHIBUCHI, "Comparision between Global and Local Optimization Routing Method for Alleviation of Traffic Congestion," *Japan Society for Fuzzy Theory and intelligent informatics*, vol.18, no.6, pp.867–873, Dec. 2006.
- [103] M. Matsumoto and T. Nishimura, "Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator," *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*, vol.8, no.1, pp.3–30, Jan. 1998.
- [104] G.E.P. Box and M.E. Muller, "A Note on the Generation of Random Normal Deviates," *Annals of Mathematical Statistics*, vol.29, no.2, pp.610–611, 1958.
- [105] T. Ministry of Land, Infrastructure and Tourism, *Road Construction Ordinance*, vol.321, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, July 2003.

- [106] “ZigBee Alliance,” <http://www.zigbee.org/>, 2004.
- [107] G. Ding, Z. Sahinoglu, P. Orlik, J. Zhang, and B. Bhargava, “Tree-Based Data Broadcast in IEEE 802.15.4 and ZigBee Networks,” *IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING*, vol.5, no.11, pp.1561–1574, Nov. 2006.
- [108] L. KLEINROCK and F.A. TOBAGI, “Packet Switching in Radio Channels: Part I-Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics,” *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, vol.COM-23, no.12, pp.1400–2633, Dec. 1975.
- [109] T. SHIGEYASU, H. MATSUNO, and N. MORINAGA, “Performance Evaluation Media Access Control Protocols Using an Algorithm Generating Graphs for Effect Estimation of Hidden Terminals,” *IEICE TRANS. B*, vol.J89-B, no.3, pp.351–360, March 2006.
- [110] A. CHAYABEJARA, S.M.S. ZABIR, and N. SHIRATORI, “Ensuring Better Channel Utilization with IEEE 802.11 for MANET,” *IEICE Technical Report*, pp.33–38, sep 2003.
- [111] Y.-K. Huang, A.-C. Pang, and H.-N. Hung, “An adaptive GTS allocation scheme for IEEE802.15.4,” *IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEM*, vol.19, no.5, pp.641–651, May 2008.
- [112] Y. Yamao and S. Takagishi, “Time Shift Grouping Access in IEEE802.15.4 MAC Beacon Mode for Layered-Tree Networks,” *Proc. IEEE CCNC2008*, pp.338–342, Feb. 2008.
- [113] 柴田頼紀, 小林秀幸, 杉浦彰彦, “獣害検知システムへの知的環境ネットワーク利用の検討,” *情報処理学会全国大会講演論文集*, vol.3, pp.507–508, 2010.
- [114] M. Beigl, H.-W. Gellersen, and A. Schmidt, “Mediacups: experience with design and use of computer-augmented everyday artefacts,” *Computer Networks*, vol.35, no.4, pp.401–409, Mar. 2001.

著者発表論文

論文誌への発表

- [1] 小林秀幸, 杉浦彰彦, “RSSI を用いたグループ単位の待ち時間分割制御を伴う CSMA/CA による IEEE802.15.4 の拡張,” 電気学会論文誌. C, vol.131, no.7, pp.1-10, Jul. 2011.
- [2] H. KOBAYASHI, A. SUGIURA, “Estimation of traffic congestion distance using frequency division multiplexing based on IEEE802.15.4,” IEEJ, Vol. 7, No. 4, 2012.

国際会議への発表

- [1] H. KOBAYASHI, A. SUGIURA, “Basic consideration of estimated congestion distance system using ZigBee,” The 9th International Conference on Advanced Communication Technology, IEEE07 EX1671C, pp.1469-1473, 2007
- [2] H. KOBAYASHI, A. SUGIURA, “Estimated traffic congestion length by using Vehicle-to-Vehicle communication based on ZigBee,” Int’l Conf. Wireless Networks ICWN’08, pp.650-656, 2008

その他の発表

- [1] A. SUGIURA, R. BABA, H. KOBAYASHI, “An IEEE802.15.4-Based System for Locating Children on Their School Commutes,” IEICE, vol.93-A no.5 pp.950-957, 2010
- [2] 乾一博, 杉浦彰彦, 小林秀幸, “IEEE802.15.4 を用いた周波数分割多重型マルチホップネットワークによる画像転送,” 電気学会論文誌 C, vol.130 no.1 pp.116-122, 2011
- [3] S. Kajiwara, H. Kobayashi, A. Sugiura, and N. Ezaki, “Detection of Location for sensor nodes using ZigBee in the gymnasium,” ICWN ’08 The 2008 International Conference on Wireless Networks, pp.645-649, jul 2008.

- [4] S. Kajiwara, H. Kobayashi, A. Sugiura, and N. Ezaki, "Localization using ZigBee in the communication the person influences," The 10th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium and the 5th International Symposium on Nanovision Science, pp.105-106, nov 2008.
- [5] 加納正章, 小林秀幸, 杉浦彰彦, "Zigbee を用いた搬送車用電力線通信," 電気学会論文誌, vol.129, no.8, pp.1611-1612, 2009.
- [6] 馬場遼一, 小林秀幸, 杉浦彰彦, "ZigBee による交通渋滞距離推定システムの基礎検討," 2007 信学春季全大. B-7-106, 2007
- [7] 乾一博, 小林秀幸, 杉浦彰彦, "ZigBee を用いた画像転送ネットワークの基礎検討," 2007 信学春季全大. B-7-67, 2007
- [8] 柴田頼紀, 小林秀幸, 杉浦彰彦, "害獣検知システムへの知的環境認識ネットワーク利用の検討," 情報処理学会 2010 年全国大会. 2ZD-9, 2010
- [9] 石倉功規, 小林秀幸, 杉浦彰彦, "ISM 帯を使用する無線規格間における電波干渉時の通信品質保証," 情報処理学会 2010 年全国大会. 5Z-7, 2010
- [10] 小林秀幸, 杉浦彰彦, "グループ単位の待ち時間分割制御による IEEE802.15.4 の高速化," 2010 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会. B-8-24, pp.172, 2010