

特別研究報告

題目

アドホック無線センサネットワークによる
人間の行動・環境把握システムの構築

指導教官

宮原 秀夫 教授

報告者

Koveampairoj Decha

平成 14 年 2 月 19 日 (水)

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

アドホック無線センサネットワークによる人間の行為・環境把握システムの構築

Koveampairoj Decha

内容梗概

アドホック無線センサネットワークは、非常に小型かつ省電力の無線端末に、様々なセンサを組み合わせることで実現されるマルチホップネットワークである。このようなネットワークでは、無線端末同士が協調動作し、自律分散的に広範囲にわたるネットワークを構築する。そのため、単にセンサ端末を分散配置させるだけでシステムを構築でき、ネットワークの敷設や拡張が、有線ネットワークと比べ非常に簡単に行えるという利点がある。センサネットワーク評価製品である Crossbow Technology 社の MOTE/MICA は、温度・磁気・加速度などの種々のセンサを備えたアドホック無線センサネットワークである。本研究では、この MOTE/MICA を利用したアプリケーションとして、人間の行動や環境を把握し、生活を支援するためのシステムを提案し、その構築を行う。本提案システムでは、端末を人間が携帯することにより、センサネットワークの経路情報を利用して位置を特定することで、人間の行動を把握することができる。また、センサから得られる情報と位置情報とを組み合わせることで、さまざまな情報提供や警告を発信することができる。本報告では、まず、対象とするセンサネットワークにおいて、各種センサの精度や通信性能の確認を行なう。さらに、システムの目標に応じたセンサ情報の収集機能、収集データの管理機能、および情報伝達機能等の構築により、目的とするシステムを実現する。

主な用語

アドホック無線センサネットワーク, TinyOS (Tiny Operating System), TinyDB (Tiny DataBase), 位置検索, 警告・通知システム

目次

1	はじめに	5
2	MOTE/MICA によるセンサネットワーク	8
2.1	システムの構成	8
2.2	動作環境 TinyOS	12
2.3	MOTE/MICA により構築されるアドホックネットワークの仕組み	13
3	センサネットワークによる行動・環境把握システムの提案	17
3.1	提案システムの概略	17
3.2	位置検索の仕組み	18
3.3	警告・情報通知の仕組み	22
3.4	ユーザ・アプリケーションの詳細	24
4	MOTE/MICA の性能検証及びシステムの動作確認	27
4.1	通信距離	27
4.2	パケット損失率	27
4.3	開発システムの動作確認	29
5	おわりに	32
	謝辞	33

目 次

1	センサネットワークの概念	5
2	パソコン・基地局端末・センサ端末の関係	9
3	メイン基盤 MPR300 (MOTE Processor + Radio)	9
4	センササブ基盤 MTS310 (音/光/温度/加速度/磁気センサ付)	9
5	基地局基板 MIB300— (PC Interface for MOTe)	10
6	ルーティングメッセージのブロードキャスト	15
7	基地局へのパケット送信	16
8	人間の行動・環境把握システムの構成	19
9	位置検索パケットのブロードキャスト	20
10	位置検索パケットに対する応答パケットの送信	21
11	TinyOS パケット構造体 (TOS_Msg)	22
12	データ構造体 (SimpleCmdMsg)	23
13	応答パケットにおける args 構造体の構造	23
14	警告・情報通知の仕組み	24
15	1 ホップの 10 メートルの通信	28
16	1 ホップの実験結果のグラフ	28
17	2 ホップ (10 メートル, 7 メートル) のとき	28
18	2 ホップの実験結果のグラフ	29
19	動作確認する方法	31

表 目 次

1	MOTE の詳細仕様	11
2	MICA に備わっている各種センサの仕様	11
3	固定端末 ID と場所の関係データベース	22

1 はじめに

センサネットワークとは、音や光といった環境情報を感知するセンサがネットワークの一端となり、無線回線を通じてセンサ情報の送受信を行うシステムである。ネットワークを通して離れたセンサの情報を取得できるため、広範囲に分散した環境情報収集システムを容易に構築することが可能である。また、ネットワーク経由で種々のセンサ情報を収集し、それをデータベース化することで、さまざまなサービスを提供することも可能である。図1に示されるように、センサネットワークシステムの主要構成要素は、ネットワーク接続機能を持ったセンサと、多数のセンサ情報を収集し処理する管理端末、そしてインターネットのよ

うな有線ネットワークを介したセンサ情報の通信機能である。

センサネットワークでは、それぞれの無線端末はアドホック無線ネットワーク方式によってネットワークを構築している。これは端末自身が無線回線によって自律分散的にネットワークを構成するマルチホップネットワークである。そのため有線のインフラストラクチャを必要とせず、端末を分散配置するだけで容易にネットワークを構築することが可能である。無線通信技術の進歩により、非常に小型で省電力型の無線モジュールが実用化され、このよ

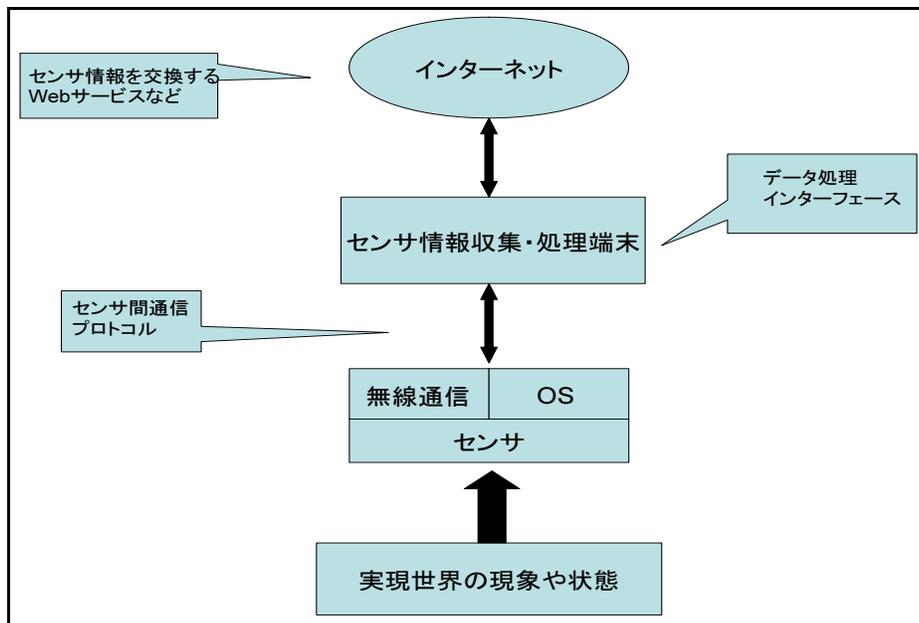


図 1: センサネットワークの概念

うなアドホック無線ネットワークの端末に各種のセンサを組み合わせることにより、センサネットワークを構築することが可能となっている。小型で低価格のセンサ端末を多数配置した環境測定システムなど、さまざまな分野への利用が考えられている [1]。またこのような無線センサネットワークは、あらゆるもののネットワーク化を目指すユビキタスネットワークの要素技術としても重要であり、また現実世界の情報をネットワークに取り込むための手段としても、現在さまざまな研究が行なわれつつある。例えば、生活空間内に分散配置したセンサによって、不正侵入等を防止するためのセキュリティシステム、および高齢者の転倒や疾病を検知し、直ちに対応できるような Aware Home [2, 3] などがある。

このようなセンサネットワークの研究プロジェクトのひとつとして、U. C. Berkeley で行なわれている SMART DUST がある。これは非常に小型の端末を多数分散して配置することで、それらの情報を収集することを目指したセンサネットワークである。例えば、農場にセンサをばら撒くことによって日照や降水量を観測したり、ビルのような建造物にセンサを埋め込み、その劣化を計測するような利用が考えられている。このプロジェクトの成果を実用化したものが、Crossbow Technology Inc. による MOTE/MICA である [4]。評価キットとして音・光・磁気などの各種のセンサを持った端末が入手できる。

そこで本報告では、MOTE/MICA を利用して、人間生活を支援するためのセンサネットワークを構築することを試みる。SMART DUST では、センサ自体は固定的に配置され、それらがアドホックネットワークを形成することでデータの収集を行なうことができる。しかしながら、本報告では、移動する人間側に端末を装着することで新たな利用形態を検討する。例えば、温度センサを人間に装着すれば、実際にその人が存在する環境の温度を知ることができ、効率の良い空調管理を行なうことができる。さらに、アドホックネットワークの機能によって端末の位置を知ることができれば、人間の行動を把握することが可能となる。例えば、老人ホームの利用者に端末を携帯してもらうことにより、利用者の位置を知ることができ、徘徊防止に役立つ。また、行動記録を残すことができれば、一日の活動量を知るとも可能となる。さらに MICA では、単にデータを収集するだけでなく、端末を指定してブザーを鳴らす機能も備わっている、これを位置情報と組み合わせることで、人間が危険な箇所に近づいた場合に警告を行なうことができる。また、温度センサのデータと組み合わ

せれば、心臓に負担がかかるような急激な温度変化を検知して、心不全などの疾病を予防するように注意を促すことが可能となる。

本報告では、このような人間の行動や環境を把握するためのセンサネットワークシステムを MOTE/MICA に実装し、実証実験を行う。その結果、無線アドホックネットワークを利用した本システムは、既存の施設やネットワークに容易に組み込むことが可能であり、動的なネットワークトポロジ変更により、移動体の状態を把握するのに有用であることが確かめられた。またネットワークやセンサから得られた情報に基づいて、ブザーによる警告やメールシステムと組み合わせた情報提示を行うことも可能であることを確かめた。

以下、本報告の構成は次のようになっている。まず、第 2 章において、対象としている MOTE/MICA システムの構成と主な仕様について述べる。また、第 3 章では、提案する人間の行動・環境を把握するシステムの機能と仕様について説明する。第 4 章では、まず、MICA に搭載された各種センサの精度や通信性能など、基本性能の測定結果を示す。次に実装したアプリケーションの実証を行い、その結果について述べる。5 章は、本報告のまとめと今後の課題について述べる。

2 MOTE/MICA によるセンサネットワーク

2.1 システムの構成

本報告では、Crossobow Technology Inc. から提供されている MOTE/MICA を用いて、人間の行動・環境把握のためのセンサネットワークを構築する。まず、対象とする MOTE/MICA の概略について説明する。

- メイン基板

プロセッサと無線通信機能を搭載している。センサ基板からのデータを受け取り、無線によって他の端末へ送信する。また他の端末からのデータ中継機能を持つ。

- センササブ基板

音・光・温度・加速度・磁気のセンサを備えており、これらに関するデータを収集することができる。またブザーを鳴らすことも可能である。それぞれのセンサの詳細を表 2 に示す [5]。

- 基地局基板

端末へのプログラムをダウンロードするためのパラレルポートと、センサネットワークと PC 間のデータ通信のためのシリアルポートを備えている。

MOTE/MICA によるセンサネットワークは、メイン基板とセンササブ基板を組み合わせた多数の端末と、メイン基板と基地局基板を組み合わせた 1 台の基地局によって構成される。基地局は上述のように PC とシリアルポートによって通信を行ない、センサとの通信を行なう。

MICA の特徴としては、隣接する複数の小型無線センサ端末がそれぞれパケット中継機能を持ち、無線通信環境を常時自動的に察知して自律的にネットワークを構成するようなアドホック無線ネットワーク機能が MICA に搭載されている。さらに、建物内などでは事前にネットワーク構成を考慮する手間が省ける。また、広い敷地では適宜にばらまけば自動的にセンサネットワークができているという特徴もある。

動作電力については、極めて少なく、3V 電池で 1 年間動作できる。無線センサ端末 MOTE の性能についての詳細 [6] を表 1 に示す。

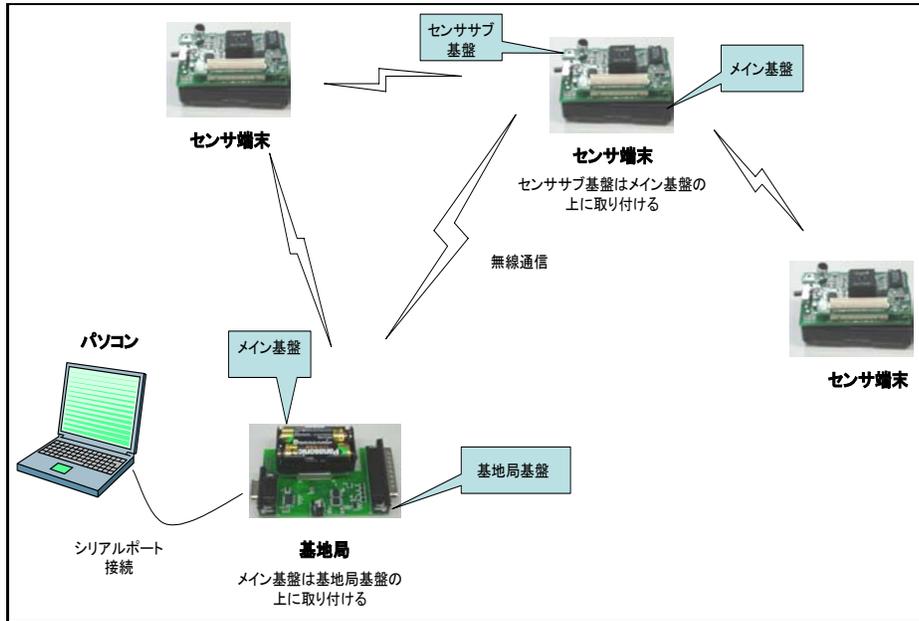


図 2: パソコン・基地局端末・センサ端末の関係

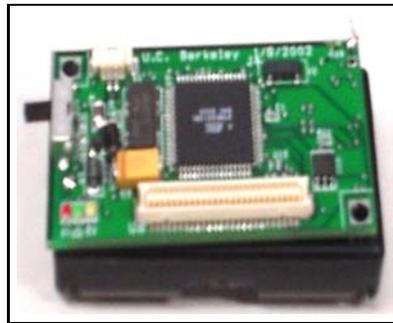


図 3: メイン基盤 MPR300 (MOTE Processor + Radio)

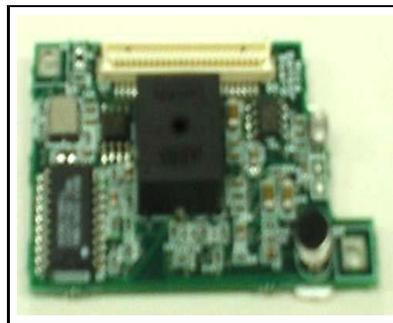


図 4: センササブ基盤 MTS310 (音/光/温度/加速度/磁気センサ付)



图 5: 基站局基板 MIB300— (PC Interface for MOTE)

表 1: MOTE の詳細仕様

CPU	4 MHz Atmel microprocessor
RAM	512 bytes with 8 kB コード・スペース
無線周波数	916 MHz
電源	DC 3 V
動作電流	待機中 $5 \mu\text{A}$ データ送信時 12 mA 受信時 1.8 mA
出力	約 1 mW

表 2: MICA に備わっている各種センサの仕様

センサの種類	メーカー	型番	備考
スピーカ	Sirius	PS14T40A	ブザー
加速度センサ	Analog Devices	ADXL202JE	2 軸 (X, Y) $\pm 2\text{G}$
温度センサ	Panasonic	ERT-J1VR103J	-40 to 125
光センサ	Clairex	CL9P4L	
磁気センサ	Honeywell	HMC1002	-2 +2 ガウス
音センサ	Panasonic	WM-62A	20 Hz ~ 16 kHz

2.2 動作環境 TinyOS

TinyOS [7] は、米国、カリフォルニア大学バークレイ校により開発された、センサネットワーク端末向けの動作環境である。TinyOS は C 言語に類似する NesC 言語で記述されている。TinyOS は上位層のアプリケーション層から、無線通信やセンサデータ取得のような物理層まで各層がコンポーネントとして構成されており、スタックのような形で相互接続されており、コンポーネントベースの構成となっている。つまり、各種のセンサや入出力インターフェースといったデバイスをコンポーネントとして扱うことができるので、ハードウェアの追加による機能増強が簡単に行えるという特徴がある。[7] において提供されている TinyOS のインストールパッケージには、MOTE センサ端末の動作制御アプリケーションやユーザ・インタフェースアプリケーション開発のためのライブラリとツールが含まれている。

TinyOS の特徴は以下のように挙げられる。

- コンポーネントの追加や削除が容易で、必要なもののみをインストールできる。そのため、ハードウェアに少量搭載されたメモリを有効利用することができる。
- 一つのタスクの実行が完了したら、次のタスクが実行されるという FIFO 順で処理される。それぞれのタスクはお互いに割り込み処理が生じないが、イベントによって割り込まれる。
- 一つの処理を複数のタスクに分割することによって、複数のアプリケーションが同時に実行できる。
- コンポーネントの呼び出しによってアプリケーションは非常に少ない容量で記述が可能である。
- スケジューリング階層はタスクとイベントの 2 つに分かれている。
タスクは長時間に要する作業に用いられる。それに対して、イベントでは、ハードウェア / ソフトウェアから通知されるイベントをトリガとして処理の実行を開始する。
- マルチスレッド機能を持つ。
- カーネル、プロセス管理、メモリ管理、仮想メモリ機構は無い。

2.3 MOTE/MICA により構築されるアドホックネットワークの仕組み

MICA センサネットワークシステムにおいては、基地局、および各 MOTE によって、アドホック無線ネットワークシステムによるマルチホップネットワークが自律的に構築される。一般にアドホック無線ネットワークにおけるルーティング手法は、各端末が周期的にルーティングメッセージをマルチキャストするテーブル駆動型手法 [8] や、パケット送信要求が発生した端末においてルート探索メッセージをブロードキャストするオンデマンド手法 [9] などが提案されている。これらの手法は、ネットワーク内のどの端末でも送受信端末となれることを前提とし、全ての端末に対するルート構築能力をもっている。しかしセンサネットワークにおいては、基本的に情報を収集する端末は一つであり、このような高機能なルーティングは冗長であると考えられる。また、MOTE センサ端末は、単三乾電池 2 本と、極めて少量のバッテリーにより駆動されるため、多数のルーティングパケットを送信するようなルーティング手法を採ると電力消費量が大きくなり、ネットワークの生存時間が短くなってしまふという問題が生ずる。

MICA センサネットワークシステムでは、図 6 に示すような、基地局からの一方向ルーティングを行っている。まず、基地局端末は自分自身の ID (ここでは 0 番) と、基地局に対するホップ数 (以下 Level と呼ぶ) の初期値 0 をルーティングメッセージに書き込み、ブロードキャストを行う。このルーティングメッセージを受け取った無線センサ端末の動作を、図 6 の端末 2 を例にとって説明する。端末 2 は、基地局からのルーティングメッセージを受け取ると、そのメッセージに書き込まれている ID (0) を親ノードとして自分自身に登録し、Level(0) に 1 を加えた値を自分自身の level として設定する。つまり、端末 2 から基地局にパケットを送信する場合は、端末 0 に対して 1 ホップの送信を行えばよいことになる。さらに端末 2 は、ルーティングメッセージの ID と Level を自分自身の持っている値に書き換え、ブロードキャストを行う。これを受信した端末 3 は同様の処理を行い、端末 2 を親ノードとし、自分自身の Level を 2 とする。その後端末 3 は、ルーティングメッセージをさらにブロードキャストするが、無線通信の特性上、端末 2 は端末 3 からブロードキャストされたルーティングメッセージを受け取ることになる。しかし、端末 2 は既にルーティング情報を所有しており、端末 3 を親ノードとして登録するとループが生じてしまふ。この問題を防ぐ

ため、端末 2 は自分自身の Level とルーティングパケットに書き込まれた Level の値を比較し、自分自身の Level の値のほうが小さい場合は、ルーティングパケットを無視するようになっている。このようにして、図 7 に示されるように、全ての端末から基地局に対しての経路が設定される。このようなルーティングメッセージは、一定時間ごとに基地局から発信される。

ある端末が基地局に対してパケットを送信する場合は、それぞれの端末で設定された親ノードに対して送信を行うだけで、各端末において適切にパケットが中継され、基地局へ到達する。しかし、ネットワークとしてはパケットの到達確認や再送といった機能は提供されていないため、無線ノイズやパケット衝突といった原因によりパケットロスが起こった場合、そのパケットは基地局へは届かない。現在 TinyOS 用に提供されているアプリケーションの多くは、センサから読みとった情報を 1 パケットに格納し、通信を行っているため、パケット損失が起こったとしても、そのパケットに含まれていた情報が 1 つ欠落するだけで、動作に支障をきたすことはない。しかし将来、1 パケットに収まらない情報を送信する（例えばファイル転送など）場合、パケットの欠落は大きな問題となるため、MOTE にインストールするアプリケーション側での到着確認、再送といった機能が必要になると考えられる。

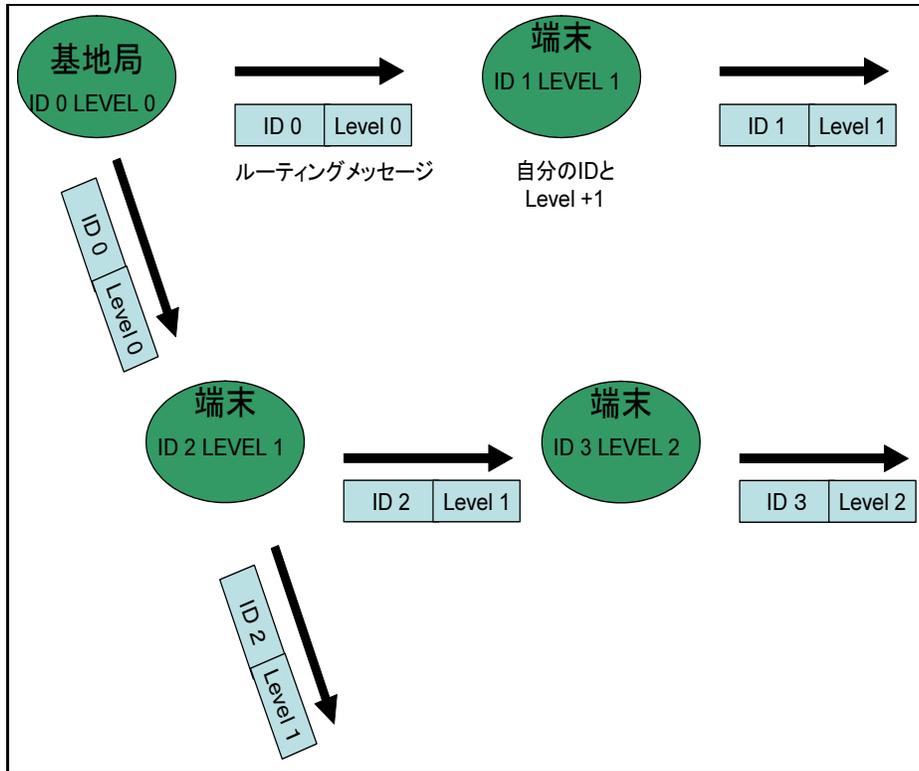


図 6: ルーティングメッセージのブロードキャスト

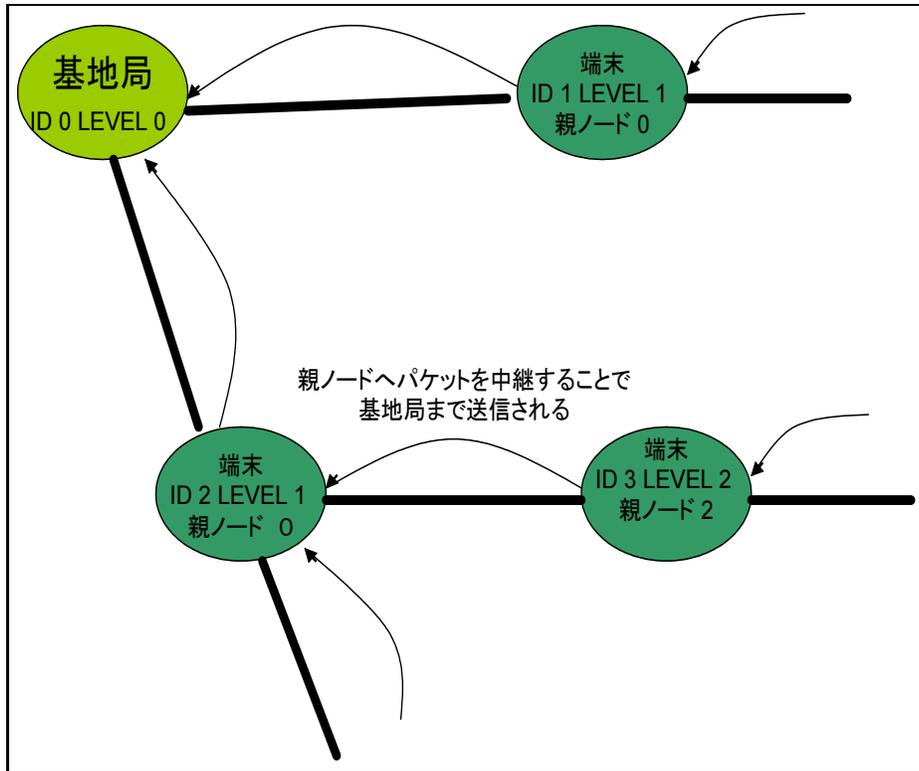


図 7: 基地局へのパケット送信

3 センサネットワークによる行動・環境把握システムの提案

3.1 提案システムの概略

本報告において提案するシステムの構成を図 8 に示す。本システムは、基地局、固定端末、移動端末から構成される。基地局は MOTE をシリアル接続した計算機を用いており、その OS には Microsoft Windows 2000 を搭載している。固定端末とは、位置の固定された MOTE を意味する。固定端末の設置されている位置は、あらかじめ端末固有の ID 番号と対応づけて、基地局の計算機端末において管理されている。また移動端末とは、移動する人間が所有する MOTE であり、本システムではこの移動端末を対象としたサービス提供を行う。

本研究では、図 8 に示したシステムを用い、移動する人間の位置を検索し、その結果に基づいた情報提供や警告などの通知を行なう機構の構築を行なう。この機構を利用することにより、例えば展示会場において現在位置近辺の展示品の情報を提供するためのシステムや、老人介護施設における老人の移動を追跡・監視するネットワークシステムの構築が可能である。また、現在のシステムでは実装されていないが、温度センサ等を利用することで、移動する人間のおかれた環境情報を取得することができる。このような環境情報と位置情報を組み合わせて利用することで、健康に害を及ぼすような急激な温度変化にさらされた場合に、外部の監視システムに通報するシステムを構築するといった利用例も実現可能である。

本システムの機能は、MOTE の動作を記述した TinyOS のコンポーネントと、パケットの送受信、処理を行う PC 上のアプリケーションという 2 つの部分に分け、実装している。以下それぞれの機能と実装の詳細について述べる。

2.2 節で述べたように、MICA センサネットワークシステムで利用されている動作環境 TinyOS は、コンポーネントベースの構造をしており、利用するコンポーネントのみを組み合わせることで端末 MOTE にインストールすることが可能である。今回開発を行ったアプリケーションは、TinyOS で用意されている基本コンポーネントのうち、以下に挙げるものを利用している。

- StdControl コンポーネント

タスク、イベントのスケジューリング、メモリ管理など基本システム

- Comm コンポーネント

無線，シリアルインターフェースを通じた通信のためのコンポーネント

- LedsC コンポーネント

MOTE 上の LED を操作するためのインターフェースを提供するコンポーネント

- Sounder コンポーネント

MOTE 上のスピーカを操作するためのインターフェースを提供するコンポーネント

- GenericBase コンポーネント

PC からシリアルインターフェースを通じて送信されたパケットを MICA ネットワークに送出するコンポーネント

GenericBase コンポーネントは，計算機端末とシリアル接続された基地局となる MOTE にインストールした．また上述したコンポーネントを組み合わせ，以下に挙げる二つのコンポーネントを実装し，固定端末と移動端末にインストールした．Bcast コンポーネントと SimpleCmd コンポーネントは相互に接続されており，これらのコンポーネントは組み合わせて 1 つの端末にインストールした．

- Bcast コンポーネント

ブロードキャストによるマルチホップパケット転送を行うコンポーネント

- SimpleCmd コンポーネント

パケットに含まれたデータを処理し，適切な動作を行うコンポーネント

次節からは，これらのシステムを利用し，人間の位置検索を行う仕組みや，その結果に応じて警告や情報通知を行う仕組みについての詳細について説明する．

3.2 位置検索の仕組み

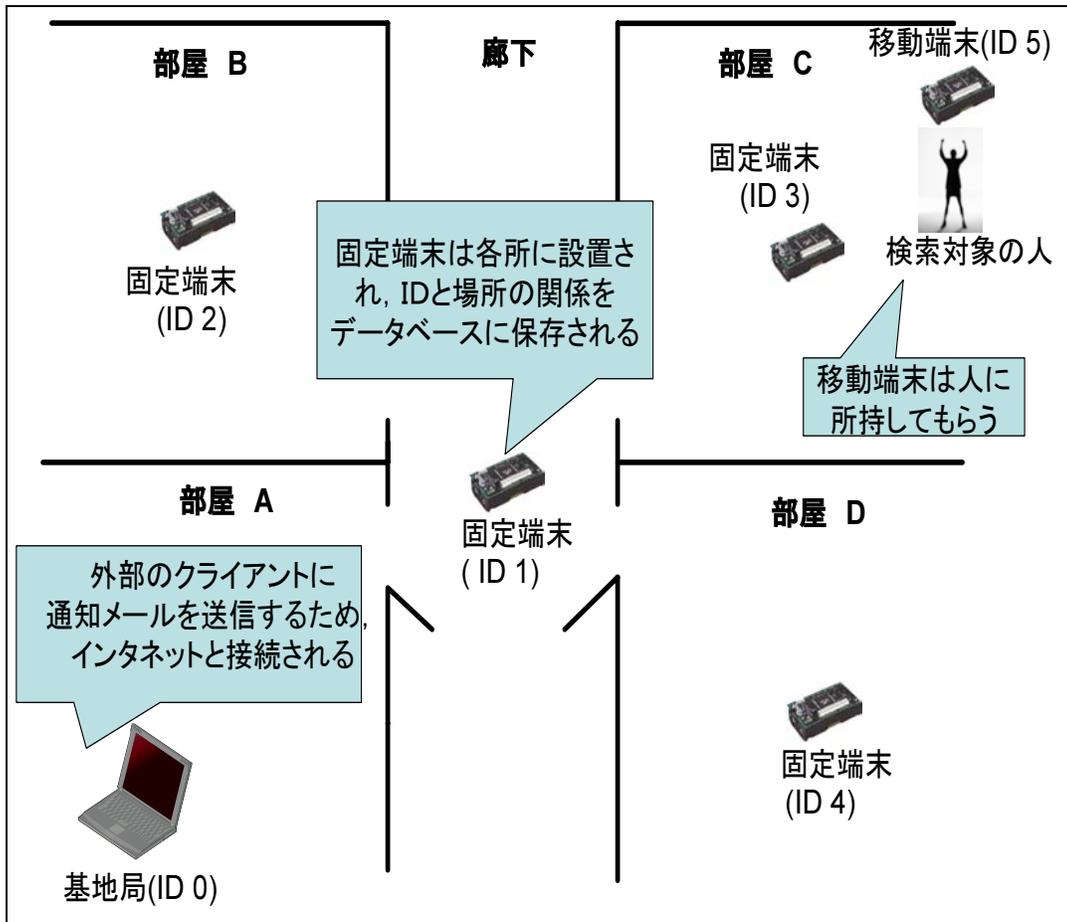


図 8: 人間の行動・環境把握システムの構成

本報告で提案しているシステムによる位置検索は、特定の端末を所有した人間がどこにいるか、その絶対位置を特定するためのものである。同様の機能を提供するものに GPS (Global Position System) がある。しかし、GPS は屋外においては数メートルの精度で端末位置を特定することができるシステムであるが、屋内においては衛星の信号を取得することが難しく、精度が悪くなるという問題がある。本システムによる位置検索は、無線端末を分散配置することによって屋内においても可能である。検索の精度は端末の無線出力、つまり電波が届く距離によって決まるが、本研究において利用している端末 MOTE にアンテナを接続し、標準の無線出力で通信した場合、見通しのよい屋内においては 15 メートル程度の距離となる。

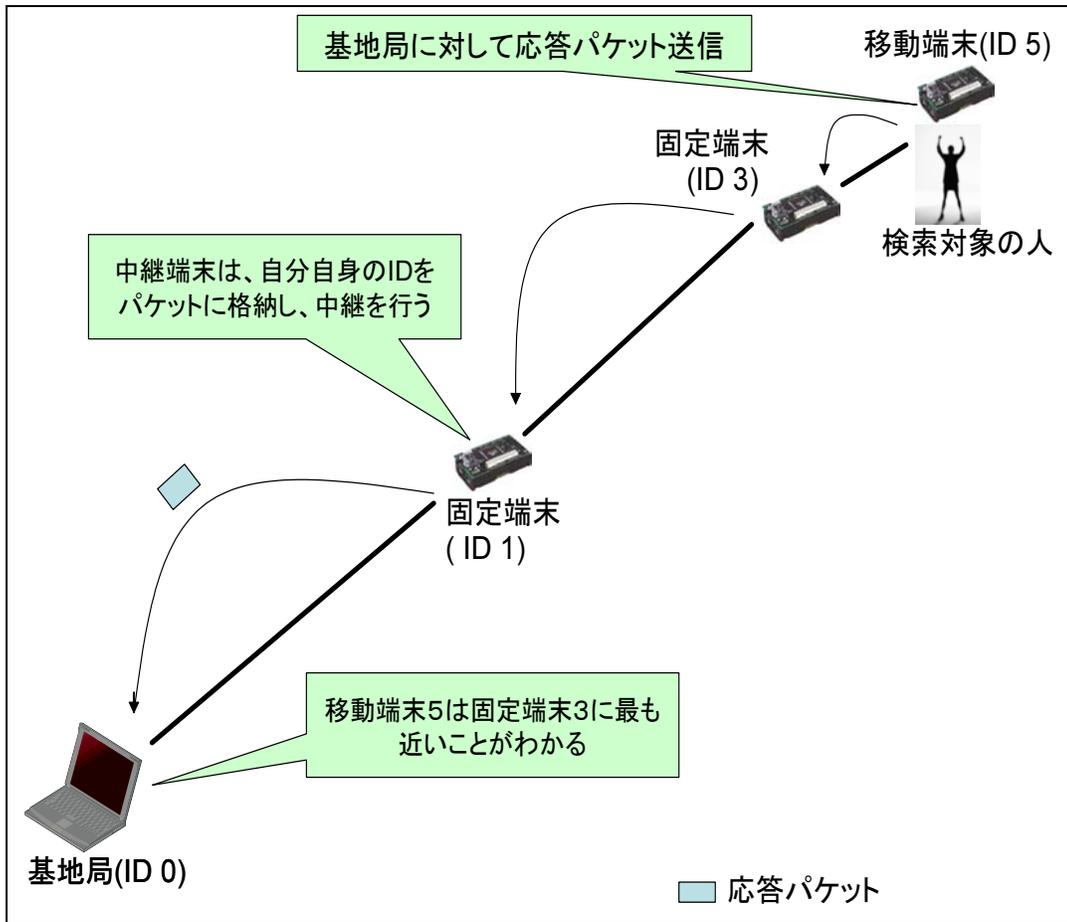


図 9: 位置検索パケットのブロードキャスト

図 9 に本システムにおける位置検索の概要を示す。本システムでは、移動端末の位置検索のために、ネットワーク内に分散配置された固定端末を利用する。これらの固定端末の ID と位置は、表 3 のように組み合わせられ、基地局において管理される。まず基地局は、検索対象の人間が所有する端末の ID をターゲットとした位置検索クエリパケットをブロードキャストする。このクエリパケットの構造と内容を図 11 に示す。

基地局は位置検索を行う際、パケットのデータ部分の `action` という変数を 1 に設定し、`args` に検索対象の MOTE の ID を格納したパケットを生成する。ネットワーク内の各端末は、このブロードキャストパケットを受け取った際、自分自身が検索のターゲットとして指定されているかどうかを調べ、ターゲットではなかった場合は、そのパケットの送信元

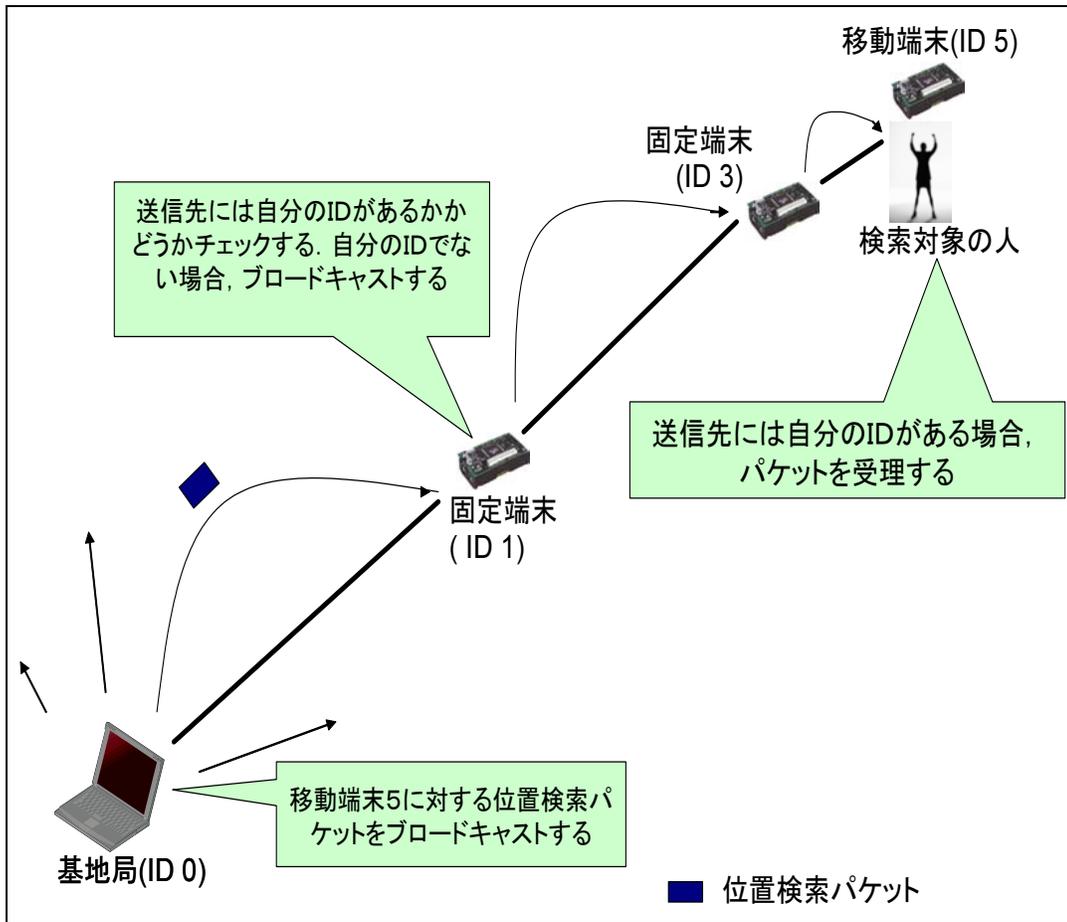


図 10: 位置検索パケットに対する応答パケットの送信

アドレス (source) とホップ数 (hop_count) を更新し, 転送する. 自分自身がターゲットであった場合は, 基地局に対する応答パケットを生成し, 送信を行う. 応答パケットでは action の値は 2 となり, args は図 13 に示すように, 送信先アドレス (destaddr) と中継端末 ID (imaddr[]) を代入する領域として使われる.

応答パケットを受け取った端末は, imaddr[] 領域を先頭から調べ, まだ中継端末 ID が代入されていない領域を発見すると, そこに自分自身の ID を格納し, 基地局へ中継を行う. 現在の実装ではこの領域は 4 台分の ID を格納できるサイズ (8 バイト) となっている. つまり, 移動端末から 4 ホップ目までの中継端末の ID がこの領域に順に格納され, 基地局へと転送される. 基地局は受信した応答パケットの imaddr[] 領域を先頭から調べ, 最も早く現れた

表 3: 固定端末 ID と場所の関係データベース

固定端末の ID	場所
0	部屋 A
1	廊下
2	部屋 B
3	部屋 C
4	部屋 D

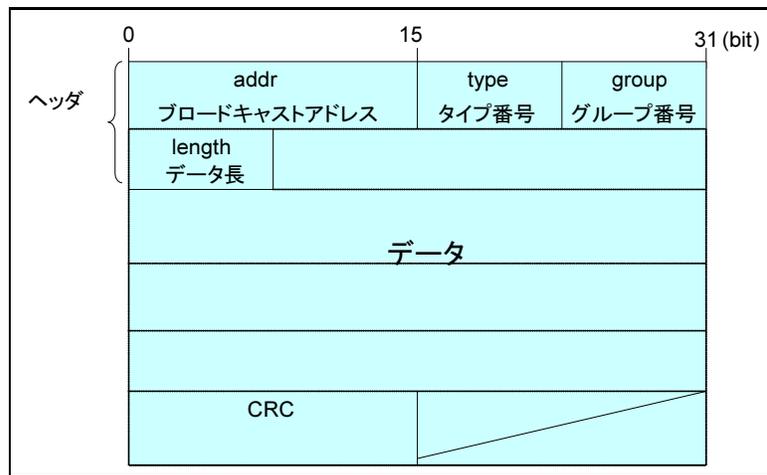


図 11: TinyOS パケット構造体 (TOS_Msg)

固定端末 ID を，検索対象の移動端末に最も近い固定端末として認識する．基地局は，表 3 を参照することでこの固定端末の位置を特定し，それを移動端末の現在位置と認識する．

3.3 警告・情報通知の仕組み

3.2 節において述べた方式により，基地局に接続された計算機端末において，移動端末の現在位置を得ることが可能である．本節ではその位置情報に基づき，移動端末，または外部のシステムに対して情報通知を行うシステムについて説明する．図 14 は，移動端末の位置

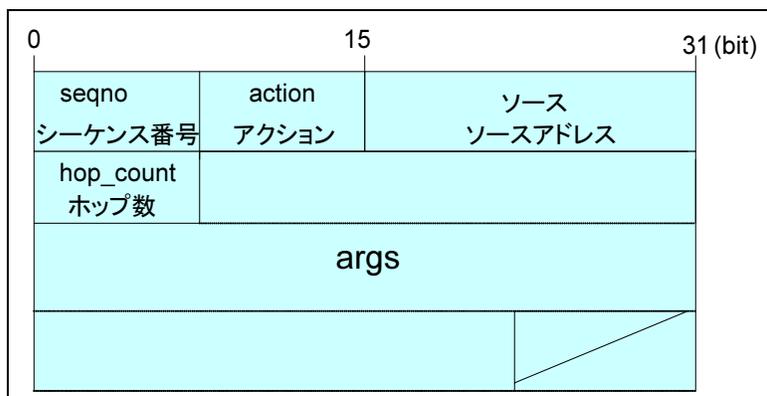


図 12: データ構造体 (SimpleCmdMsg)

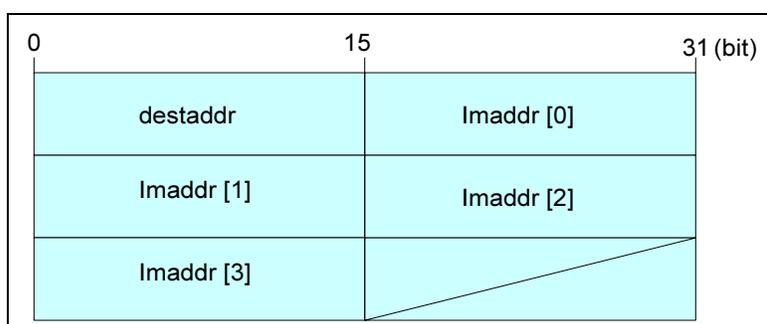


図 13: 応答パケットにおける args 構造体の構造

を検索した結果，移動端末が警告，もしくは情報通知を行うべき場所に存在すると判断された場合の基地局・計算機端末の動作を示している．現在のシステムは，警告や情報通知を行うべきかどうかの判断は，あらかじめ計算機端末のアプリケーションに与えられているものとしている．

本システムでは，警告・通知機能としては，移動端末に搭載されたスピーカと，インターネットを介したメールシステムを利用した実装を行っている．スピーカを操作するための命令は，位置検索クエリと同様のパケットによって移動端末に伝達される．具体的には，位置検索クエリのデータ構造 (図 13) の action の値を 3, 4 に設定することで，それぞれ destaddr に設定された端末のスピーカのブザー音の ON, OFF を切り替えることができる．

ンサ情報が収集され、パソコン端末上で動作を行う。アプリケーションに実装した機能は、以下のものが挙げられる。

- 位置情報の管理・利用機能

収集された位置検索の応答パケットを分析し、中継端末の ID、送信先等のデータへ変換する。また、人間の行動のトレースを把握するため、位置情報のログをデータベースとして保存する。

- パケットの生成・発信機能

TinyOS が提供される BcastInject の Java アプリケーションを利用し、位置検索パケットと通知命令パケットを生成する。まず、生成された位置検索パケットを発信し、その位置検索パケットに対する応答パケットを収集する。結果に基づき、通知命令パケットを生成し、発信する。

動作確認の検証により、パケットの送信にはパケット損失が生じていることが判明であるため、1 秒の時間間隔にパケットの送信を行う。

- 位置変更の検出機能

人間の行動をトレースするため、データベースに保存されている位置情報のログを参照し、前のログと比較し、得られた位置情報は変更したかどうかを調べる。位置情報が変更されたら、対象となる人が別の場所に移動したことがわかり、移動した場所によって警告や通知を行う。

- 場所の識別・表示機能

各所に設置された固定端末の ID と場所名をあらかじめ、データベースに保存する (表 3)。得られた中継端末の ID をデータベースに参照し、登録された場所名を表示する。

- 警告・外部のメール送信クライアントの通知機能

位置検索の結果に基づき、位置の変更や禁止場所の侵入の場合、通知メッセージがコンソールに出力されると共に、外部のクライアントに電子メールとして送信される。

本報告で作成したアプリケーションでは、TinyOS が提供された BcastInject アプリケーションの出力結果を利用し、上記の機能に対する動作を行う。詳細は以下通りである。

- 得られたパケットに格納された中継端末 ID を調査し、データ順番により、対象となる移動端末の最も近くにいる固定端末を特定することができる。この作業により得られた固定端末の ID と、実際にその固定端末の存在する場所を記述したデータベースを比較することにより、移動端末の現在位置を決定する。また、その位置情報の結果に基づき、LED・スピーカによる警告・通知を行う。
- LED・スピーカの動作命令パケットを送信することによって警告を行う。また、メール送信ソフトを利用し、通知メールの送信を行う。
- ドキュメントファイルを利用し、データベースとして固定端末の ID と場所の関係データや位置情報のログを保存する。
- パケットを正常に送受信できない場合もしくは、人間の行動をトレースする場合には、パケットの再送を行う。再送間隔は 1 秒に設定している。

4 MOTE/MICA の性能検証及びシステムの動作確認

システムを構築するにあたって、まず MOTE の基本的な通信性能の検証を行なった。さらに、実際に作成したシステムの動作確認を行なった。本章では、それらの結果を述べる

4.1 通信距離

本システムでは、建物内の各所に位置を固定したアドホック無線端末を配置する必要がある。そのため、電波範囲が過大に重複されることなく、効率的にシステムが動作できるように配置計画および、無線端末の通信性能（通信範囲）を確認する必要がある。

検証した結果では、アンテナなしの場合通信距離は 50 cm 程度であるが、長さ 8 cm のリード線をアンテナとして付けることにより [7]、1 ホップで 20 m 前後の直線距離で通信可能となった。

4.2 パケット損失率

システムの最低限の再送間隔は 64 ms となっている。これを 4 倍ずつ増やし、通信実験を行い、MICA の基本性能として、パケット損失率を測定した。

1. 図 15 のように、基地局と端末間の距離を 10 m として、1 ホップのパケット損失率を測定した。1000 回のパケット送受信の実験を行った結果を図 16 に示す。
2. 2 ホップ (10 メートル, 7 メートル) の結果と図 17, 1000 回でパケット送受信の実験を行った結果は図 18 に示す。

パケット損失率の実験結果により、再送間隔が 64 ms のとき、パケット損失率は非常に高く、実用上には適切ではないと考えられる。そこで、本研究では、実験結果に基づいて 1024 ms の再送間隔を利用した。

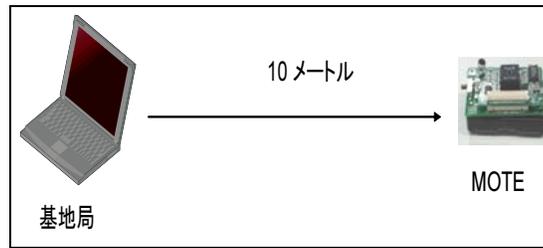


図 15: 1 ホップの 10 メートルの通信

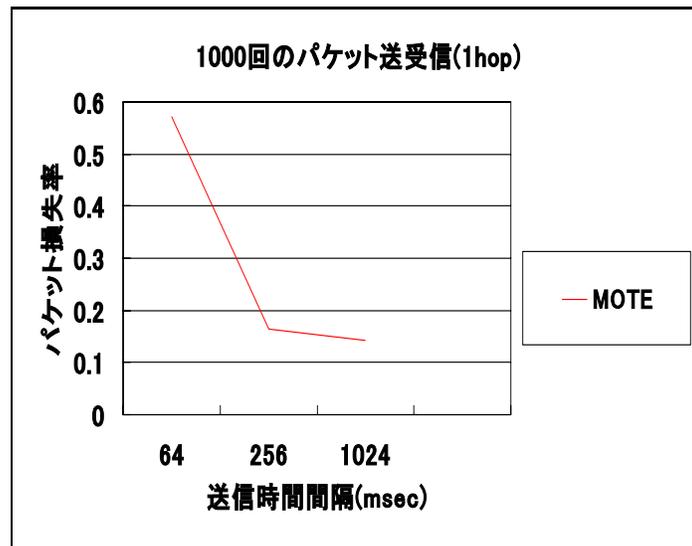


図 16: 1 ホップの実験結果のグラフ

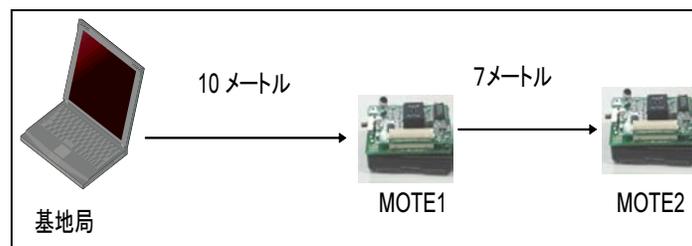


図 17: 2 ホップ (10 メートル , 7 メートル) のとき

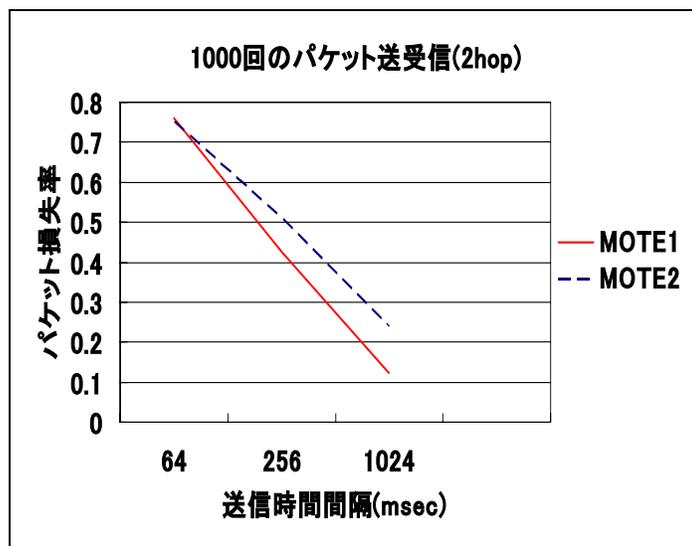


図 18: 2 ホップの実験結果のグラフ

4.3 開発システムの動作確認

図 19 により、まず、MOTE 端末を所持した人に移動してもらい、動作確認を行った。基地局端末と同じ部屋にいる検索対象の人が移動したとき、1024 ms の再送間隔で位置検索パケットを送信した。1 ホップの短距離通信で応答パケットが頻繁に届いた。そのパケットには、送信先の基地局端末の ID だけ格納された。データベースを参照することによって、その ID に対する場所がわかる。つまり、対象となる人は基地局端末と同じ部屋にいることがわかる。

次に、検索対象の人に廊下へ移動してもらったとき、基地局の電波は届かなくなったため、廊下に設置された端末を中継し、パケットが基地局に届いた。基地局から中継端末へスイッチしたとき、一定時間にパケット損失が生じた。届いたパケットには、廊下に設置された端末の ID と基地局端末の ID が格納された。つまり、対象となる人は廊下にいることがわかる。

また、対象となる人が廊下から別の部屋へ移動してみると、基地局がある部屋から廊下へ移動したときと同様に、パケット損失が生じた。さらに、1 ホップのときと比較してみると、パケット損失率が高かった。パケットは廊下にある端末とその部屋にある端末に中継され、基地局に届いた。基地局に届いたパケットはすべての中継端末の ID が格納されている。そ

の ID の順番に基づき、最初にパケットが中継された端末の ID が得られた。つまり、対象となる人は B の部屋にいることがわかる。

検索対象の人が B の部屋に移動した場合、4 回位置検索パケットを送信し、アプリケーションプログラムの内部データとして得られたパケットのデータ列では、以下のように表す。

```
7e 00 08 7d 0f fd 02 01 00 06 01 00 02 00 03 00 02 00 03 00
```

```
7e 00 08 7d 0f fd 02 01 00 08 01 00 02 00 03 00 02 00 03 00
```

```
7e 00 08 7d 0f fd 02 01 00 0a 01 00 02 00 03 00 02 00 03 00
```

```
7e 00 08 7d 0f fd 02 01 00 0c 01 00 02 00 03 00 02 00 03 00
```

(ヘッダ)

ブロードキャストアドレス

```
7e 00
```

受信ポート番号に相当するメッセージタイプ番号

```
08
```

グループ番号 データ長

```
7d                      0f
```

(ここからがデータ)

シーケンス番号	アクション	ソースアドレス	ホップ数
---------	-------	---------	------

fd	02	01 00	06
----	----	-------	----

送信先	転送 1 ホップ目	転送 2 ホップ目	転送 3 ホップ目	転送 4 ホップ目
-----	-----------	-----------	-----------	-----------

01 00	02 00	03 00	02 00	03 00
-------	-------	-------	-------	-------

このデータ列を調査し、送信先および中継端末の順番により、ネットワークポロジがわかり、表 3 より、移動端末のいる場所が検出できる。

また、得られたパケットのデータに基づき、対象となる人が B の部屋に移動した場合に、移動端末に対する情報通知や警告、さらに電子メールによる情報発信を行う。図 14 コンソールには、以下のように出力された。

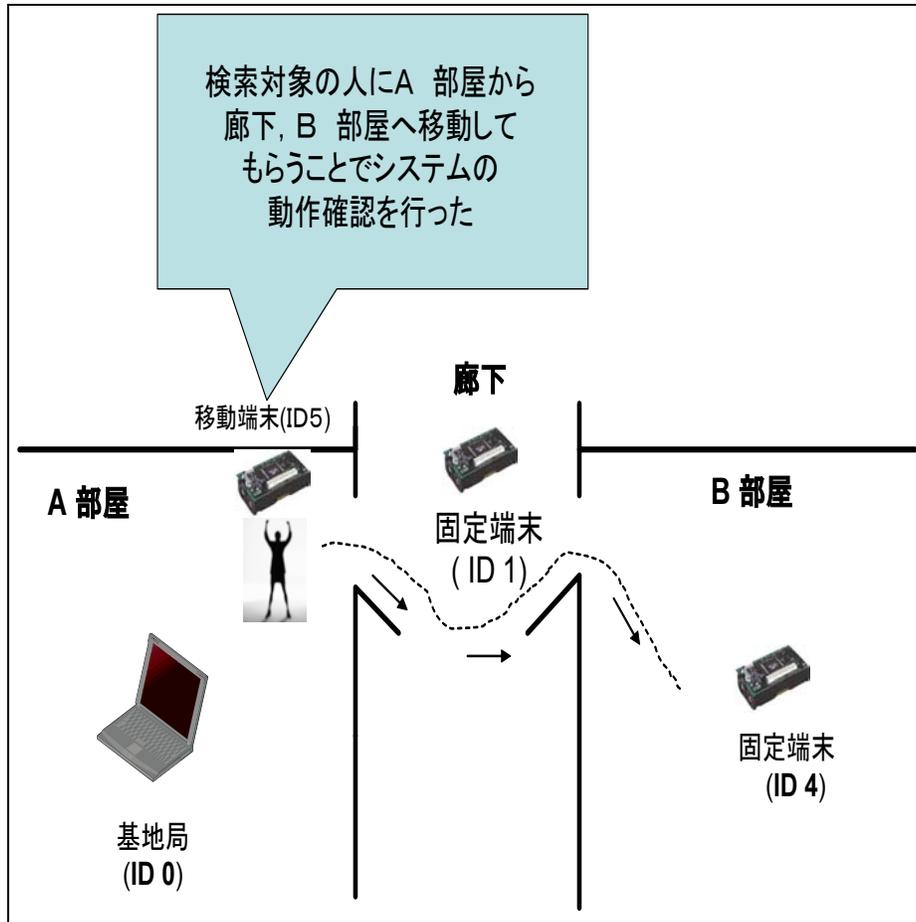


図 19: 動作確認する方法

The present room B(MOTE id 1)

Sending message.txt to k-decha@nal.ics.es.osaka-u.ac.jp

Login name is k-decha@nal.ics.es.osaka-u.ac.jp

1 行目は, 表 3 より, データベースに登録された端末に対する場所及び, 移動端末の ID である. 2 行目では, 電子メールによる情報発信が行われたということである.

5 おわりに

本報告では，アドホック無線センサネットワーク評価製品である MOTE/MICA を用い，人間の行動やその環境を把握するシステムの構築した．本提案システムは，有線のインフラストラクチャが不要であり，省電力のために乾電池で動作するため，どのような場所にも容易に設置可能である．本システムでは，人間に端末を持たせることで，対象となる人は建物内にどこにいるかということを検出することが可能である．また，得られた位置情報の結果に基づき，移動端末に対する情報通知や警告，さらに電子メールによる情報発信を行なう．

本システムは，分散配置された固定端末の ID によって移動端末の場所を特定するため，電波の重複範囲によっては，必ずしも正確な場所を検出できるとは限らないという問題がある．また，電波が重複せず，ネットワークが構築できるように固定端末を効率よく配置することも必要である．さらに，実際に何台の移動端末まで位置情報を管理できるのか，またその精度についても検証をすることが必要である．今後の課題としては，このようなセンサネットワークにおいてパケット損失に対してより安定した経路を構築する手法を検討することも重要である．また，MICA には温度センサ以外にもさまざまなセンサが備わっており，これらを活用して，人間に対してどのような支援ができるかも今後の課題である．

謝辞

本報告を終えるにあたり、宮原秀夫教授により御指導、御教授頂いたことに心から感謝致します。また、本報告において直接御指導頂いた村田正幸教授、大阪府看護大学医療技術短期大学の菅野正嗣助教授に深く感謝致します。本報告を行うにあたって、大阪大学サイバーメディアセンターの下條真司教授、大阪大学大学院情報学科研究科 情報ネットワークの若宮直紀助教授、大崎博之助教授、長谷川剛助教授、経済学部の荒川伸一助手、国際公共政策研究科の植田和憲助手からも御指導及び御助言を頂き深く感謝の意を申し上げます。また、日頃から多くの御指導を頂いた、村田研究室の山本貴之氏に心から感謝致します。

最後に、御協力頂いた宮原研究室及び村田研究室の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, "Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks," in *Proceedings of the Fifth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCOM '99)*, Aug. 1999.
- [2] Kidd, C. D., R. J. Orr, G. D. Abowd, C. G. Atkeson, I. A. Essa, B. MacIntyre, E. Mynatt, T. E. Starner, and W. Newstetter, "The aware home: A living laboratory for ubiquitous computing research," in *the Proceedings of the Second International Workshop on Cooperative Buildings*.
- [3] "Occupant-Aware Office Temperature Sensing." available at http://kingkong.me.berkeley.edu/html/BMI_Research_files/CITRIS%20Temper%ature.ppt.
- [4] "TinyOS Developers Guide." available at <http://webs.cs.berkeley.edu/tos/tinyos-1.x/doc/micasbl.pdf>.
- [5] "Mica Sensor Board Review." available at <http://webs.cs.berkeley.edu/weekly/review.ppt>.
- [6] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, and K. Pister, "System architecture directions for network sensors," in *ASPLOS 2000, Cambridge*, 2000.
- [7] "TinyOS." available at <http://today.cs.berkeley.edu/tos/index.html>.
- [8] C. E. Perkins, *AD HOC NETWORKING*. Addison-Wesley, 2001.
- [9] C. E. Perkins, E. M. Belding-Royer, and S. R. Das, "Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing," in *IETF Internet Draft*. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-aodv-10.txt>, January 2002.