

移動ノードを利用したセンサネットワークの設計と実装

鈴木 亮平[†] 牧村 和慶[§] 斉藤 裕樹[‡] 戸辺 義人[‡]

近年, mobile ad hoc networks (MANET) の研究が進み, 多様な場面でロボットを用いたネットワークの利用が考えられている. 従来, ロボットをセンサネットワークに利用する試みはなされているが, これらのロボットにどのような役割を持たせればシステム全体の効率を高めることができるかといったことは考慮されていない. そこで, 我々は, 移動ロボットの役割を分類し, 役割に応じてセンシング・データを配送する方式を提案する. 我々のシステムでは, 移動センサノードを動作の自由度に応じて6つのモード (Absolutely Static, Semi-Static, Dynamic Node 等) に分けることを考え, 各ノードが状況に応じ動的にモードを切り替えることで多様なスケジューリングを可能にしている. また, 各ノードは必要に応じ, 他ノードを操作することが可能となる. このシステムにより, 各ノードは管理者等の操作なしに自律的に動作することができる. 本稿では本方式の概要と, 本方式に基づき実装したプロトタイプの実験結果について述べる.

Design and Implementation of a Sensor Network with Moving Nodes

Ryohei Suzuki[†] Kazunori Makimura[§] Hiroki Saito[‡] Yoshito Tobe[‡]

Because of the progress of the robotics and mobile ad hoc networks (MANETs), we can expect that networked robots are utilized in a variety of fields including sensor networks. There are already some researches about sensor networks with mobile nodes, but literature in these areas are not dedicated in roles of each mobile node. In these backgrounds, we proposed efficient sensing and data deliveries by giving some roles to each mobile object. In our system, we have three significant aspects. First, we have classified behaviors of nodes into six modes; a mobile node can change its modes autonomously depending on its situation. Second, a node can instruct other nodes to move to a specified position if desired. Third, a node decides its action without any assistance from an administrator or any centralized infrastructure. In this paper, we describe a prototype of our proposed architecture.

1. はじめに

近年, 無線通信技術および半導体技術の発展に伴い, 無線通信デバイスが小型化, 軽量化, 省電力, 高性能化が進んできている. また小型無線端末の進化に伴い MANET (Mobile Ad hoc Network) と呼ばれる, その場限りのネットワークの研究が進んでいる. この分野では様々なプロトコルが提案されており, 例えば, AODV や DSR, GPSR, LAR, GEAR 等がある. MANET では管理者が各ノードを制御することなく, 自律的にネットワークを形成することが重要視されている.

一方, MEMS テクノロジーを軸にしたセンサデバイスの小型化, 低コスト化が進んでいる. UC Berkeley が開発した

Mica Mote[9] 等の無線通信機能を搭載したセンサノードがテストプラットフォームとして商用化されたこともあり, 現在, センサネットワークがネットワークの研究として広がりを見せている. センサネットワークは, 環境モニタリング, 構造劣化診断, 農業プラント等への応用が考えられている. センサネットワークでの従来研究では, センサノードが固定されていることを前提としたルーティングや集約に関する研究が多数提案されている.

また, 近年のネットワーク・ロボティクスの発展によって, Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS) 等ロボット同士の自律分散ネットワークの研究が進んでいる [1].

このような背景の中, センサネットワークでのロボットの利用を考えた研究が進んでいる. 例えば, センサネットワーク型ロボットとして Robomote[10] 等が存在する. しかし, これまでのアプローチはロボット利用センサネットワークに適したシステム設計やプロトコルアーキテクチャの規定という観点で欠けている. そこで我々は Mobile Object Networks (MONETs) の枠組みとして Routing Assisted by Moving Objects (RAMOS) を提案し, 各ノードに役割をも

[†] 東京電機大学 工学部 情報通信工学科

[‡] 東京電機大学 工学部 情報メディア学科

[§] 東京電機大学大学院 工学研究科 情報メディア学専攻

[†] Department of Information and Communication Engineering, Tokyo Denki University

[‡] Department of Information Systems and Multimedia Design, Tokyo Denki University

[§] Information Systems and Multimedia Design (Master's, Doctoral), Graduate School of Tokyo Denki University

たせることで効率的にセンシング・データ伝送することを提案する。さらに、各ノードでその役割を動的に変化させることで、様々な状況に対応させることを考える。

本稿の構成は以下の通りである。第2章では本研究の目的を述べる。第3章では RAMOS の設計・構成を述べ、第4章ではプロトタイプを示す。第5章では、RAMOS についての議論を示す。第6章で関連研究を述べ、最後に結論及び方向性を示す。

2. 目的

センサネットワークで移動ノードを使用する場合、個々のノードで、イベントの発生やデータの緊急性等の様々に変化する状況・環境に対応しなければならない。また、さらに動的なトポロジの変化にも対応する必要がある。そこで RAMOS では、以下の3つを設計指針とし、以下にその詳細を述べる。

- ノード間の協調によるネットワーク維持
- 異なった緊急度に応じたデータ転送
- 様々な状況への対応

2.1 ノード間の協調によるネットワーク維持

個々のノードは移動可能であるため、ネットワークのトポロジが頻繁に変化する。そのため、周辺ノードとの位置関係によって他ノードを移動させデータを転送する等、ノード間で協調することによりネットワークの維持に努める必要がある。

2.2 異なった緊急度に応じたデータ転送

緊急性を要するデータが生成された場合、緊急度の低いデータより優先する必要がある。例えば、火災のような災害が起こった時その情報を早急に管理者に知らせなければならない。そのため、データの転送の際に各ノードが協調することによってデータを迅速に転送する。

2.3 様々な状況への対応

特定の場所をモニタリングしたい場合や広い範囲をモニタリングしたい場合等、ノードによって移動を許さないものや移動を許容するもの等様々である。またさらに、上記のように緊急度に応じた対応も必要になると考えられる。そのため、ノードに複数モードを与える等、状況に応じた対応が必要である。

3. 設計

本章では、RAMOS のシステム構成・6つのモード分類の詳細を述べる。

3.1 システム・アーキテクチャ

RAMOS の設計に関する特徴を以下に示す。

- ノードの移動または無線による通信の両方を利用してデータを転送する。
- データを転送するために、各ノードは、他のノードの動きを指示することが可能である。
- 各ノードは、データの緊急度や与えられた役割によってそのモードを変化させる。

以上のように RAMOS では、単に無線通信を用いてデータの転送を行うだけではなく、中継ノード自身が移動することによりデータを最終宛先まで届けることが特徴である。この時、各ノードは状況に応じて自律的に動作を決めることができ、管理者等中央のシステムによる管理を必要としない。また、各ノードは管理ノード等最終宛先の位置情報を知っていることを前提とし、データを渡すべきノードがなかった場合、直接、宛先に向かって移動する。さらに、移動途中で他ノードを発見した場合、自ノードより宛先に近いノードのみにデータを転送することにより、無駄なデータの転送を避ける。また、データには Highly urgent level, Low urgent level の2段階の緊急度を用い、その動作レベルを分けることにより、緊急度の高いデータを迅速に届けられるようにする。

各ノードは、他ノードからデータを受信すると、それらの間でモードとデータの緊急度をチェックする。これらの条件から、相手モードに対し、自ノードがデータを受信することができるか判断した場合、さらに各ノードの位置情報によって、自ノードと宛先、相手ノードと宛先の距離を計算し、宛先にどちらが近いかを判断する。自ノードのほうが宛先に近い場合データを受信しデータを運ぶ。その際、データの緊急度や自ノードの周囲の状況に応じて、モードを変化させることも行う。RAMOS では、全ノードがその位置情報を保持していることを想定している。

3.2 モードの分類

前節で述べたように、各ノードはモードを変化させることで、自律的に動作する。本論文では、Absolutely Static (AS), Semi-Static (SS), Dynamic node (DN), Limited Search (LS), Spontaneously Moving (SM), Round Patrol (RP) の6つのモードを定義する。AS ノードはその位置から動くことなく、割り当てられたタスクを実行する。SS ノードは AS ノードのような動きをするが、緊急度の高いイベントが起きた時は移動が可能になる。DN ノードは必要に応じ、自由に動くことが可能である。さらに、SS ノードと DN ノードは移動後必ず元の位置に戻ることが要求される。LS ノードでは、限られた範囲を移動することによって、データを転送すべき

ノードを探す。SM ノードは他ノードに変化するまで自由に動作することができる。最後に RP ノードは AS や SS ノードのデータ転送を補助するため、そのノード間を定期的に巡回する。AS ノード以外のノードは状況に応じて、自律的にそのモードを変更することが可能である。以下に詳しい動作を述べ、表 1 に各モードの変化条件とその概要を示す。

3. 2. 1 ASモード

AS ノードはデータの緊急度によらず、近隣のノードにデータを転送する。近隣にノードが存在しない場合、他ノードが近隣を通過するまで待つ。データを受け渡したノードが SM あるいは RP ノードである場合、この AS ノードのための RP ノードに変化する。

3. 2. 2 SSモード

SS ノードは AS ノード以外の近隣ノードに highly urgent データを転送する。近隣にノードが存在しない場合、宛先に向かって直接移動する。移動の途中新たにノードを見つけた場合、そのノードにデータを転送し自らは元の位置に戻る。データを受け渡したノードが SM あるいは RP ノードである場合、この SS ノードのための RP ノードに変化する。low urgent データの場合、AS ノード以外の近隣ノードにデータを転送する。近隣にノードが存在しない場合、他ノードが近隣を通過するのを $T_{patrol}[sec]$ 待つ。 $T_{patrol}[sec]$ 経過してもノードが現れなかった場合、SS モードから LS モードに変化し、限られた範囲内で他ノードを探索する。それでも、隣接ノードが発見できない場合、元の位置に戻り他ノードが近隣を通過するまで待つ。

3. 2. 3 DNモード

DN ノードは近隣ノードが SM か RP ノードである場合、highly urgent データを転送する。近隣にノードが存在しない場合、宛先に向かって直接移動する。移動の途中新たに

ノードを見つけた場合、そのノードにデータを転送し自らは元の位置に戻る。low urgent データの場合、その動作は highly urgent データの場合とほぼ同様であるが、宛先に移動する前に $T_{patrol}[sec]$ 待つ。

3. 2. 4 SMモード

SM ノードは近隣ノードが SM か RP ノードである場合、highly urgent データを転送する。近隣にノードが存在しない場合、宛先に向かって直接移動する。移動の途中新たに SM か RP ノードを見つけた場合、そのノードにデータを転送し自らはその位置に留まる。low urgent データの場合、ほぼ highly urgent データの場合と同様であるが、このノードのための RP ノードにはデータを転送しない。

3. 2. 5 RPモード

RP ノードの場合 highly urgent データも low urgent データの場合も同様に扱う。近隣ノードが SM ノードである場合、データを転送し、そうでなければ直接宛先に移動する。移動の途中新たに SM ノードを見つけた場合、そのノードにデータを転送し自らは元の位置に戻る。

3. 2. 6 LSモード

LS ノードは SS ノードから一時的に変化したもので、限られた範囲内を他ノードがないか探索する。一定時間経過しても他ノードを見つけれない場合は SS ノードに戻る。

4. プロトタイプ

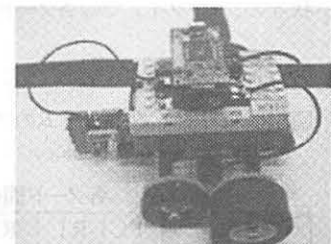
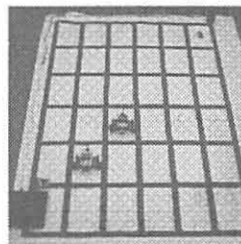
本章では、プロトタイプの設計とその実証実験の結果を述べる。

4. 1 設計

我々のプロトタイプでは、AS ノードと SS ノードだけで構成される環境を前提とし、具体的に2つの固定センサノードと2つの移動センサノードを利用したネットワークを考え

表1 mode とその変化条件の概要

mode	変化後	条件
AS		
SS	LS	Low urgent パケットを受信し、通信範囲に他ノードが存在しない場合。
DN		
SM	RP	AS, SSノードの代わりにデータ伝送し、次回以降の補助を引き受けた場合。
RP	RP	新たにAS, SSを見つけその補助を引き受けた場合。
LS	SM	一定時間探しても他ノードが見つからなかった場合。



(a) Our Test bed

(b) Robot and Mote

図1 Testbed

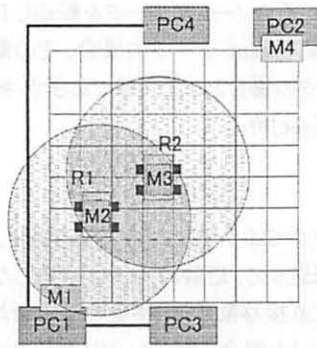


図2 Case A-1

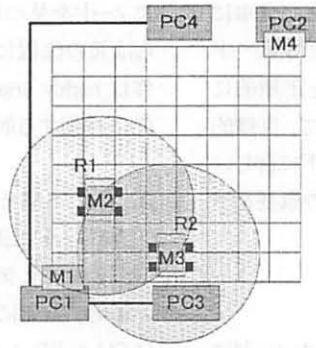


図3 Case A-2

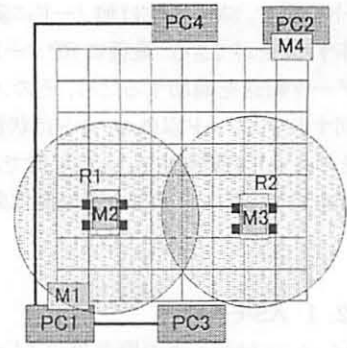


図4 Case B

る。固定センサノードには Mica Mote[9] を利用し、移動センサノードには米 Lego 社・Mind Storm RCX2[8]に Mica Mote を装着したものを利用する。図1, 図2, 図3, 図4にプロトタイプのパラットフォームを示す。図2, 図3, 図4では M1, M2, M3, M4 が Mica Mote を示している。さらに M1 と M4 は AS ノードであり、その場から移動することができない。また、Mica Mote の CPU と RCX2 の CPU と がコミュニケーションをとることが不可能なため、Mica Mote から RCX2 への指示は一度別の PC3, PC4 を介して行うことにする。さらに、RCX2 は床からの光の反射を利用し位置情報を測定しているため、直交した方向にしか移動することができない。

本プロトタイプでは、PC1でセンシングしたデータをPC2を宛先として送信することを想定し、さらにPC1とPC2は直接通信することが不可能であり、R1とのみ通信ができると仮定する。我々はこの条件のもとで以下の3つのケースを考える。

- Case A-1 : R1 の通信範囲内に R2 が存在し、R1 よりも PC2 に近い場合 (図2)
- Case A-2 : R1 の通信範囲内に R2 が存在し、R1 よりも PC2 から遠い場合 (図3)
- Case B : R1 の通信範囲内に R2 が存在しない場合 (図4)

我々のプロトタイプでの各ノード間距離を表2に示す。

4.2 フローチャート

図5にプロトタイプ・システムのフローチャートを示す。ノ

表2 各ノード間の距離

	PC1-R1	R1-PC2	R2-PC2
Case A-1	0.17 m	1.58 m	1.18 m
Case A-2	0.17 m	1.58 m	2.08 m
Case B	0.17 m	1.58 m	-

ードがデータを受信すると、まずデータのメッセージ・タイプを知る。メッセージ・タイプには Data, Query_Reply, Query_Request の3種類がある。メッセージ・タイプが Data だった場合、Query_Request をブロードキャストする。メッセージ・タイプが Query_Request だった場合、Query_Reply メッセージに自らの位置情報(座標)を格納し返信する。メッセージ・タイプが Query_Reply だった場合、まず自分の位置情報と相手の位置情報をもとにどちらが宛先まで近いかを判断する。自ノードのほうが宛先に近い場合、直接宛先まで移動する。相手のノードが宛先に近い場合、Dataメッセージにデータを格納し送信する。

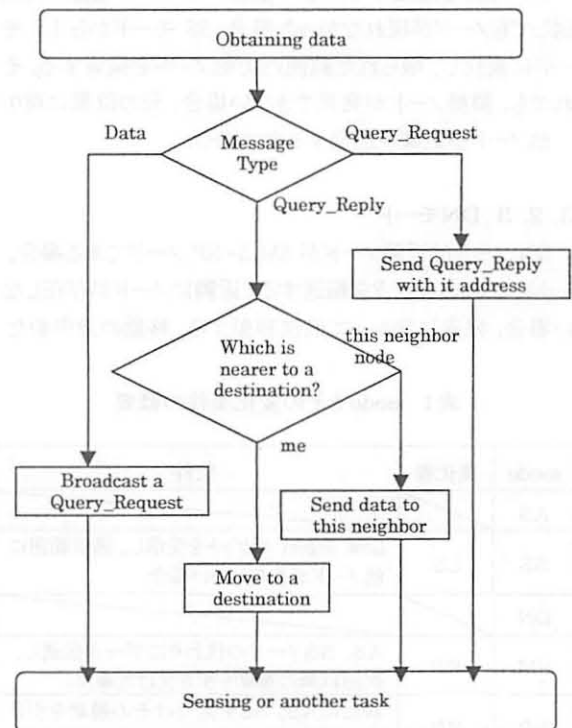


図5 Flowchart (Prototype)

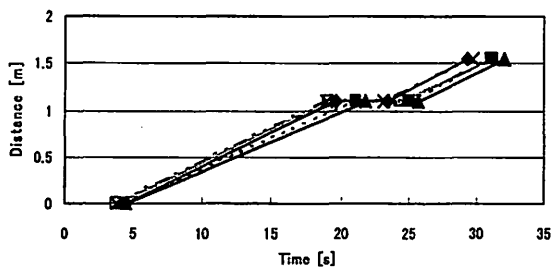


図6 Case A-1

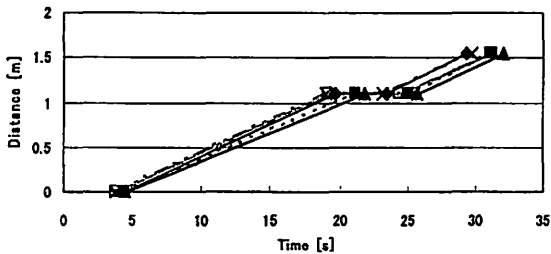


図7 Case A-2

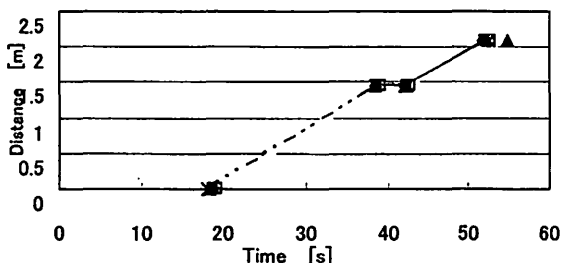


図8 Case B

CaseA-1 では、データは PC1 から R1 に転送され、R1 は query-request メッセージをブロードキャストする。query-request を受け取った R2 は query-reply メッセージで自らの位置情報を R1 に送信する。R1 はこの位置情報をもとにどちらが PC2 に近いかを計算する。この場合は R2 の方が PC2 に近い、そのため R1 は R2 にデータを転送する。R2 は転送すべき他ノードがないため、直接 PC2 に向かって移動し、データを転送する。

CaseA-2 は CaseA-1 とほぼ動作は同じだが、R2 に比べ R1 の方が PC2 に近い、そのため R1 が直接 PC2 に移動し、データを転送する。

Case B では R1 は query-request メッセージをブロードキャストするが query-reply が返ってこないため 15[sec] 待つ。しかし他ノードからの query-reply が返ってこないため、R1 の通信範囲内には他にノードが存在しないと判断し直接 PC2 に移動し、データを転送する。

4.3 測定結果

本プロトタイプではデータが PC1 から送信され、宛先

PC2 に到達するまでの時間を各ケースで 5 回ずつ計測し図 6、図 7、図 8 に示す。図 6 は Case A-1、図 7 は Case A-2、図 8 は Case B での測定結果である。どの場合も時間が 0[sec] の時コマンドを送信している。また、図 6 と図 7 から、CaseA-1 の場合の方が、移動距離も少なく、さらにデータが到着するまでの時間も少ない。また全ての Case において確実にデータが宛先に到着していることも確認できる。

5. 議論

本章では、移動ノードを利用したネットワークを考えた際の信頼性、通信アーキテクチャ、非対称性、エネルギー消費について議論し、これからの研究の方向性を探る。

5.1 信頼性

本研究では移動ノードを利用したネットワークにおいて、信頼性について言及していない。しかし、重要なイベントが発生した時、管理ノードとの間で確実な通信を確立しなければならない。MONET では、常時ノードが移動しているため end-to-end での信頼性の確保は難しい。そこで、ホップ毎に node-to-node での信頼性を確保することで end-to-end での信頼性を実現することが考えられる。ここでは、各ノード間でのデータ転送の際に、ACK を送信するという信頼性の確保が必要になると考えられる。

5.2 通信アーキテクチャ

インターネットでは end-to-end での通信を行うために TCP/IP が利用されているように、MONET でも様々な種類のノードや大量のノードによる通信が想定されるため、このような統一されたプロトコルが必要になる。また、イベント発生時には大量の packets が発生するため、ノード間でのレート制御や QoS 制御を行わなくてはならない。

5.3 アドレッシング

将来、個々のノードを管理する際、ユニークな ID が必要になる。しかし、MONET では、頻繁にトポロジの変化が起こり、ユニークな ID ではルーティング・テーブルの更新等が必要になる。そのため、ノードの位置情報等を用いた、オンデマンドの通信が要求される。

5.4 非対称性

バッテリー残量の少ないノードは管理ノードへ迅速に通知する必要があり、パケットの無駄な再送を避けなければならない。そこで各ノードは管理ノードからの ACK によってパケットの無駄な再送を避ける。そのような場合では、

管理ノードへの経路と送信元ノードへのACKの経路は非対称となることが多い。そのため、ACKの到着時間にばらつきがあり、ACKが確実に届いたか判断することが難しくなる。

5.4 エネルギー消費

MONETでは移動ノードの移動は無線通信に比べ電力消費量が多い。そのため、周辺ノードが持つ近隣ノード情報を元に移動するかどうかを判断する必要がある。

6. 関連研究

Beaufour 等が smart-tag をベースにした、センサネットワークのためのデータ散布を考案している[2]。ここでは、smart-tag を装備した移動ノードが、無線範囲外で接続されていない固定ノード間をランダムに動くことでデータを散布している。しかし、我々の提案では、ルーティング性能を向上させるために各移動ノードが協調し、自律的にその動作することによって、目的ノードまでデータを届けている。

GPSR[6], GEAR[12], LAR[7]等は経路を早く発見するため、また経路を発見するためのオーバーヘッドを減らすために、地理情報を利用している。GPSR ではホップ毎に greedy forwarding を利用し、宛先に一番近いノードにデータを転送している。さらに、greedy forwarding が不可能な場合、周囲の経路を選ぶことでそれを修正している。GEAR ではエネルギー消費とネットワークのライフタイムの増加のバランスについて考慮している。そのため、エネルギー残量とデータの最終宛先位置までの距離、両方によって次ノードを決定している。LAR ではより小さい request-zone への経路検索を制限している。

Fall 等は、多様なノードによるネットワークの相互運用性を考え[4]、遅延を許容するネットワーク・アーキテクチャ(DTN)を提案している。ここでは、ネットワーク内でのデータ・ストレージや再処理のサービスを提案し、また相互運用のためのネーミングや認証を提案している。上記研究ですでに提案されている信頼性や輻輳制御、フロー・制御等が RAMOS の枠組みに適用することが考えられる。

また、Hou 等は[5] ワイヤレス・センサネットワークにおいてどのようにライフタイムを最大にするかを提案している。彼らは、provably polynomial-time algorithm によって、すでに存在するアプローチの計算量より効率的なものを提案し、ライフタイムの問題を解決している。

Zhao 等は Message Ferrying (MF)アプローチを提案し[13]、規定の経路を通る移動ノードにデータを集めることで、データを届けている。RAMOS ではこれに対し、各ノードが協調してデータを転送することによって、動的にトポロ

ジが変化する環境でも対応できるようになっている。

7. まとめ

本稿では、移動ノードを利用したセンサネットワークとして RAMOS を提案した。ここでは、各ノードが複数のモードを持ち、動的にモードを切り替えることによって様々な状況に対応している。また、複数モードを定義することによって、多様なスケジューリングもできるようになっている。今後は移動ノードを利用した、動的にトポロジの変化するネットワークでの信頼性を考える。また、大量のセンサノードを使用しても動作するようなスケーラビリティについても考える必要がある。

参考文献

- [1] H. Asama et al., "Distributed autonomous robotic systems," Springer-Verlag, 1994.
- [2] A. Beaufour, M. Leopold, and P. Bonnet, "Smart-tag based data dissemination," Proc. of ACM WSNA'02, Sep. 2002.
- [3] D. Estrin, R. Govindan, J. S. Heidemann, and S. Kumar. "Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks," ACM Mobicom, pp. 263-270, 1999.
- [4] K. Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged Internet," Proc. of ACM SIGCOMM'03, Aug. 2003.
- [5] Y.T. Hou, Y. Shi, and J. Pan, "A Lifetime-aware flow routing algorithm for energy-constrained wireless sensor networks," IEEE MILCOM 2003, October, 2003.
- [6] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks," Proc. of ACM Mobicom'00, pp. 243-254, Aug. 2000.
- [7] Y.-B. Ko and N. H. Vaidya, "Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks," Proc. of ACM Mobicom'98, pp. 66-75, Oct. 1998.
- [8] Mindstorms, <http://mindstorms.lego.com/>.
- [9] Mote, <http://www.xbow.com/Products/productsdetails.aspx?sid=71>
- [10] Karthik Dantu, Mohammed Rahimi, Hardik Shah, Sandeep Babel, Amit Dhariwal and Gaurav S. Sukhatme, "Robomote: enabling mobility in sensor networks," CRES 2004.
- [11] Sensor & data-acquisition boards. <http://www.xbow.com/Products/productsdetails.aspx?sid=63>.
- [12] Y. Yu, R. Govindan, and D. Estrin, "Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks," Technical Report UCLA/CSD-TR-01-0023, University of California, Los Angeles, May 2001.
- [13] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zegura, "A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks," MobiHoc 2004, May 24-26, 2004