

Improvised Network 構築のための基盤技術

西尾 信彦^{†‡} 徳田 英幸^{‡*}

科学技術振興事業団, さきがけ研究 21, 「協調と制御」領域[†]
慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科[‡]
慶應義塾大学 環境情報学部^{*}

本研究では来るべきポスト PC 時代に向け, 情報通信機能を備えたデバイスが人や自動車などに付属して広域に分散しているような環境を想定し, そこでの新しい形のアプリケーション (コンテキストウェアアプリケーションやセンサネットワークを用いた広域環境情報観測) の構築を可能にする基盤ソフトウェアの提供を目標とする. このために, 大量に情報通信ノードが分散した状況で, 常に適切なノードを動的に選択して参加させた即興的な (improvised) ネットワークの構築を提案する. この実現のためには各ノードが自律的に自己の状況を認識するとともに, それに動的に適応した挙動をとり, かつ近隣のノードと各自の最新情報の授受を適宜行うことによりネットワークシステム全体としての適応活動を持続する. 本稿ではこの即興的なネットワーク構築に必要な基盤技術について述べる.

Fundamental Technologies for Constructing Improvised Network

Nobuhiko NISHIO^{†‡} and Hideyuki TOKUDA^{‡*}

[†] “Intelligent Cooperation and Control,” PRESTO,
Japan Science and Technology Corporation (JST),
[‡] Graduate School of Media and Governance, Keio University,
^{*} Faculty of Environmental Information, Keio University

Confronting with the post-PC era, we can see many kinds of devices which is equipped with computation capability as well as communication capability. Among them are mobile phone, IT car, PDA, networked appliance and etc. These devices have mobile nature and spread in the very large area. Our research project aims developing fundamental technologies for constructing a new kind of applications utilizing such mobile devices. This article discusses such fundamental technologies for Improvised Network as attribute naming routing, in-network processing, battery conservation technique, dynamic adaptation protocol for clustering, Especially, node management policy and node mobility adaptation technique are mainly discussed.

1 はじめに

近年, ポスト PC 時代を迎えつつあるといわれ, PC 以外の様々な機器に情報処理能力や通信機能が装備されている. 更にこれらの機器は携帯電話や PDA のように小型化が進んだおかげで人々が常時携帯することが可能になり,

その他にも家電や自動車といった他の専用の目的をもつ機器にも組み込まれるといったことが進んでいる. このために情報通信機能をもったノードが広域に分散し, それらが常に移動しているという状況がさまざまな機会に生じることが予想される. 例えば既に携帯電話

話をもった人々は都市のあらゆる場所に分散しており、カーナビゲーションシステムを備えた車もあらゆる場所を走行している。現状でのこのようなノードが広域に分散した状況は、たとえば携帯電話の場合では持ち主のパーソナルなコミュニケーションにのみ、自動車は運転者の運転補助のためにのみ利用されている。我々は今後、このように大規模に分散した情報通信ノードが作り出すネットワークを用いた応用は、さまざまな可能性をもっていると考えている。たとえば現状では各ノードを所有者が利用しているのみであるが、各自がノードの作り出すネットワークを利用したアプリケーションを適用することも可能であろうし、第三者がこのネットワークを利用することも充分想定できる。

我々は、量と範囲において大規模に情報通信ノードが分散した状況で、適切なノードを動的に参加させたネットワークを即興的に(improvised)構築し、様々なアプリケーションを稼動できるようにすることを想定した基盤技術の研究開発を目的として Improvised Network¹ 研究プロジェクトを開始した。本研究プロジェクトが想定する典型的なアプリケーションとしてはコンテキストウェアアプリケーションやセンサネットワークを用いた広域環境情報観測などが考えられる。これらは従来のリモートセンシングなどとは異なり、各ノードが本来の目的に応じて移動しているために固定的静的な専用のインフラストラクチャとしてはとらえることができない。具体的には、幹線道路の特定の場所に備え付けられた車速センサを用いて交通渋滞情報を生成するのと、各車が刻々と自己の状況を配信することによって生成する場合といった相違が生ずる。このため、想定したアプリケーションを実現するためには各ノードが自律的に自己の状況を認識するとともにそれに動的に適応した挙動を

¹improvised とはラテン語の ad hoc に相当する英語であるが ad hoc network は MANET を中心とするルーティングプロトコルの研究を指す言葉になってしまったため、それと区別するためにつけた名前である。

とり、かつ他のノードと各自の持つ最新情報の授受を適宜行うことによりネットワークシステム全体としても適応活動を継続しなければならない。このとき構成されるネットワークはいわゆるモバイルアドホックネットワークとなるために広く使われているインタネットプロトコルだけでは不十分である。たとえば、ルーティング技術を例にしても、前述のように通信のためのインフラストラクチャが想定できないために、ホップバイホップの MANET のようなルーティングが必要になる。しかし、MANET との大きな違いとして我々はノードに興味があるのではなく、各ノードが獲得しているデータに興味があるという点が重要である。更にこのシステムの各ノードがセンサノードとして振舞う場合には、ノードの位置情報の獲得と利用はシステム全体の通信の効率化の上で特に重要な研究課題となる。

一般的にモバイルアドホックネットワークやセンサネットワークにおいては無線ネットワークを想定しており、メンテナンスのための情報のやりとりにフラッディングを利用するが、これが通信帯域を圧迫することと、非力なモバイルセンサノードの電力を浪費するという問題をもつ。本研究プロジェクトでは、これらの問題を特に各ノードが位置情報などの状況情報を適切に配信することによって効率化することを期待している。

本稿では、Improvised Network プロジェクトにおいて開発する基盤技術について述べる。以下では、まず次節にてシステムの構成について述べ、続いて各ノードの管理方式とモビリティの取り扱い方について検討する。そしてシステムの評価基準と研究プロジェクトのアプローチおよび計画している実証実験および予備実験について述べ、最後にまとめる。

2 システム構成

本研究プロジェクトでは、Improvised Network アプリケーションの構築を支援する基盤技術として以下の3つのレイヤからそれをサ

ポートする。

1. オペレーティングシステムサポート

ここでは各モバイルセンサノードにおける環境情報（センサからのデータ、電力使用状態、無線ネットワークの信号強度、自分の位置など）の取得 [8] や、それを用いた状況の認識、さらに認識した状況に適応した動作モードの設定やアルゴリズムやポリシーの選択といった項目をオペレーティングシステムのレイヤから支援する機構を構築する。

2. ネットワークシステムサポート

ここでは無線ネットワークを仮定したモバイルアドホックネットワークを仮定しており、適切な最適化のなされたルーティングや、ノードのネーミング機構、さらにいかに興味のあるデータをいかに興味をもっているユーザのいるところに配信するかといったデータ伝播 (dissemination) とデータ集約 (aggregation) の機構を構築する。

3. アプリケーション構築サポート

アプリケーション構築のためのミドルウェアとして、適切なノードを選択したり、ノードを適切な位置に配置して即興的にネットワークを構成する機能や、そのネットワークのもつリアルタイムなデータを集約して獲得するためのクエリシステム機構などを構築する。

構築すべきネットワークプロトコルでは, Estrinらの Directed Diffusion に提案されている属性つき名前ルーティングを適用してデータのクエリとその答えという形で提供する。クエリは発信側ノードが興味をもつデータの属性を記述したものを基本的にフラディングし、答えの packets はその興味で合致したデータをその時点で獲得しているノードがユニキャストで送信する。また、その中間にいて答えの packets をクエリ発信ノードに中継するノードでは、いわゆる in-network processing と呼

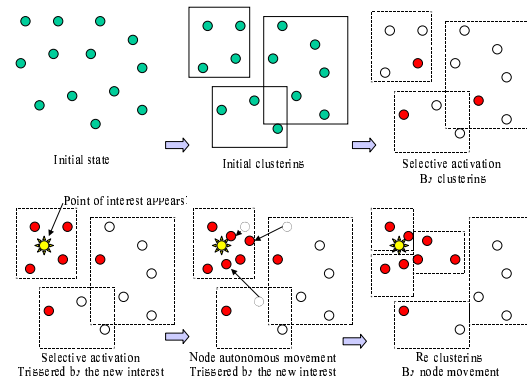


図 1: Node Clustering and Intentional Movement

ばれる処理を行うことも考えている。ここでは、中継しつつもデータの集約を行うことによって流れていくデータの量を減らしたり、その表現の抽象度を上げるのを目的とする。ある意味ではアクティブネットワークやスマートパケットなどと呼ばれてで行われていた考え方に近い。

更に各ノードは近隣のノードと通信しつつ、適度に休眠するタイミングを算出しバッテリーの節約をすることによってシステムの usability を向上することを図る。ここではそのために管理用の制御 packets を送りあうためのプロトコルを開発する。このようなプロトコルでは、ノードにモビリティがあった場合など動的に環境が変化することに適応できるようになっている必要があり、usability の観点からこれら制御プロトコルがどれだけ複雑にならず、かつ少ない packets 数でロバストネスを向上できるかが鍵となる。次節ではこれらの動的適応制御に重要に関わるノード管理方式について説明する。

3 ノード管理方式

ノードの管理方式はシステム全体の効率や usability に大きく関連するファクタである。一般にこのようなシステムでは、分散管理と集中管理の 2 つの極端な手法がある。全ノードのすべての情報を取得する集中管理ノードを仮定する手法と、全ノードがまったくホモジニ

アスに設定され、どのノードも同じソフトウェアを稼動し自分の近隣のノードとのみ通信することによって管理する手法である。集中管理手法にスケラビリティがないことは明らかであり、大規模分散システムを対象とする本研究での解が集中管理ではなく、両者の中間にあると思われることは明らかである。このような中間的な管理手法として部分的（地理的）に管理領域を分割して、その領域内を集中管理する手法をクラスタ管理といい、これも分散ネットワークシステムではしばしば適用される手法である。

クラスタ管理では、クラスタセンタと呼ばれるノードがそのクラスタに属するノードを管理する。クラスタは地理的な近さから形成されており、各クラスタの領域をどの程度の広さにするかはセンタノードのスケラビリティや、無線ネットワークの1ホップの半径、およびノードにモビリティがある場合にはその程度によって決まる。クラスタセンタは静的に選出されている場合もあるが、モビリティのある場合には動的に選出されるアルゴリズムが適用される。各ノードも自分がどのクラスタに所属すべきでどのノードがクラスタセンタであるかは自律的に判断できるよう期待される。この場合、クラスタセンタとそれ以外のノードでは区別があり、何らかの障害²がセンタノードに生じた場合には、どれか他のノードが動的にセンタノードの仕事を肩代わりできないと分散管理と比較してフォルトトレランスがないことがわかる。しかし、クラスタ内の各ノードの状況についてはセンタノードが把握しているために、省電力のためにいくつかのノードをシフト制で休眠させたり、クラスタ内での活動についての最適化をセンタノードが企画することが可能になる。

クラスタ管理とは対照的に分散管理では、基本的にすべてのノードが平等に同じソフトウェ

²この場合の障害とは、ハードウェアの故障やソフトウェア障害だけではなくバッテリーの低化や無線ネットワークの障害などあらゆる理由によりノードが稼動不能になることを含んでいる

アを稼動させており、それぞれが完全に自律的に活動する。すべてのノードが平等なので、障害に対しての耐性が改善されることが期待できモデルとしてもエレガントである。しかし、基本的に各ノードは近隣のノードの状況を知る程度であるのである程度範囲を広げた最適化を行うにはやや効率が悪い。

本研究での解はこのクラスタ管理と完全分散管理の間にあることは明らかであろう。我々は基本的にすべてのノードが同じソフトウェアを備え分散管理の形をとるが、かつどのノードも状況に応じて動的にクラスタセンタになれるような設定にする予定である。これにより、ソフトウェアやハードウェアの障害、省電力、無線通信障害などに対しての耐性を向上させることが期待でき、クラスタ管理の最適化手法も取り入れることが可能となる。また一般にクラスタリング手法は一階のフラットな構成をとるが、我々はアプリケーションの要請や動的な状況に適応して階層的なクラスタリング構成やサポートする対象に応じて多重化したオーバラッピングクラスタの実現も視野に入れている。図1では、クラスタリングを用いたノード管理と興味の対象の出現によるノードの意図的な移動、またそれにとまなう再クラスタリングを概念的に示している。

4 ノードのモビリティへの対応

関連研究でも述べたように、このようなデータセントリックなアドホックネットワークシステムではモビリティのサポートはまだ統一的には研究がなされていない。それだけ問題が難しくなるのは明らかであるが、挑戦する価値も高い。

我々はモビリティを2つの種類に分けて捉えている。その一つは意図的な移動 (intentional mobility) であり、もう一つは非意図的な移動 (unintentional mobility) である。意図的であるとはこのネットワークシステム上で稼動させているアプリケーションの要請に応じてノードが移動するような状況であり、そのような

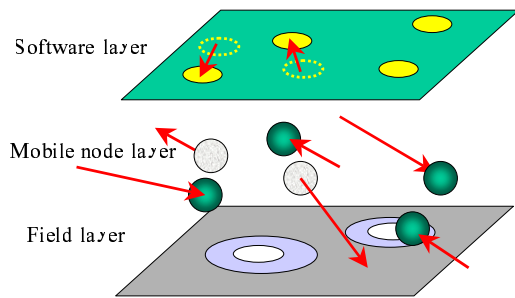


図 2: Unintentional Node Movement

要請とは独立にノードが移動してしまうような状況が非意図的な移動である。

意図的な移動の場合には、各ノードは自分の獲得しているデータの自分の稼働しているアプリケーションにとっての意味を評価することによって移動すべきかどうか、移動すべきであればどこに移動すべきかを決定しなければならない。例としては、各ノードに備え付けられたセンサを用いて動き回る標的の場所を探索するアプリケーションの場合には、ターゲットを捕捉したらターゲットの動きを追いかけるように自分の位置を変えることがあるであろう。また別の例としては、クラスタ管理をしているときにクラスタ間で手厚くノードが集まっているクラスタと手薄になっているクラスタとで格差ができてしまったときにそれを是正するためにノードが移動することも考えられる。更に、クラスタセンタが自分のクラスタ内にターゲットを発見するなど特に興味のあるイベントが起きていることを認識したときに、自分のクラスタ内でより手厚く情報を獲得するために近隣のクラスタからノードを呼び寄せる要求を出すことも考えられるであろう。

非意図的な移動はソフトウェアがノードの予期しない移動に対しても耐性をもたなければならないので更に問題が難しくなる。非意図的な移動は携帯電話をもって街中に分散している人々を即興的に選択して第三者がアプリケーションを稼働しようとするときなどに見られるケースである。各ノードとなる携帯

電話の持ち主はその第三者の意図とは関係なく街中を移動する。あるエリアにその第三者が興味をもっていたとしてもたまたまそのエリアにいたノードはそのエリアから離れていくかもしれないし、そもそもそのエリアにはノードとなる人がいないかもしれない。興味のあるエリア付近で稼働しているソフトウェアは自分が重要な仕事をしていることを認識し自分の仕事を継続するためにさまざまな方略を動的に立て実施しなければならない。図2に非意図的なノードの移動の状況を概念的に示した。ここでは、興味の対象の存在するフィールド、非意図的に動きまわるノード、それぞれのノードで稼働するソフトウェアの3つのレイヤから構成され、ソフトウェアがノードの移動に合わせて興味の対象をおいかける様子を示した。

5 対象アプリケーションの分類

本研究プロジェクトで想定しているアプリケーションは多岐にわたるが、ある部分を除いては基本的にその本質はスケールの問題である。スケールとは単位面積あたりのノードの分布濃度、平均ノード間隔と無線LANの1ホップで届く距離の比率などを意味する。本研究でこのスケールの影響だけでなく問題の難しさに影響を与える要素は、アプリケーションの興味の対象となるイベントやターゲットが単独のセンサノードによって検出できるかどうかである。近隣のノードとのみ通信することによって対処できる場合にはクラスタレベルでの in-network processing が必要となるが、さらに広域のノードからの情報が必要となる場合にはグローバルで水平分散的なアルゴリズムを in-network processing に適用するか、アプリケーションのシンクノードとなるところでのデータ集約の必要がある。

6 システムの評価基準

本研究プロジェクトでは、各ノード間での近況情報をやりとりするプロトコルや、近隣のノードがなすクラスタの管理手法、データ拡

散のためのルーティングプロトコル、省電力などのためのノード活動の動的適応機構などを研究するが、成果の評価基準としては fidelity と usability を用いる。Fidelity とは再現性であり、本ネットワークシステムを用いてノードの分布したフィールドで実際に起きているさまざまなイベントが「神の目」から見たときどの程度忠実に再現できているかを評価する。それは、イベントの有無や種類はいうに及ばず、それが起きた場所や時刻の確定などが含まれる。Fidelity はより忠実に再現できていればいるほど良く評価されるわけではなく、どのようなアプリケーションを稼働させるのかによって、そのアプリケーションの要請に応じた再現性を実現できることが重要である。

Usability とは、本ネットワークシステムを稼働するために割かなければならない資源量で定義される基準である。具体的には、ノードの数、実際に送受信されたパケット数、消費電力、動的適応やクラスタ管理のためなどの管理プロトコルのオーバーヘッドなどが含まれる。前者の fidelity を要求されただけ実現するという視点からも、明らかにこの 2 要素は互いにトレードオフとなっている。より多くの物量を投入することによって fidelity の向上は期待できるが、当然それによる usability の低化がネックとなる。与えられたアプリケーションに対して適切な設計が可能となるように開発した手法での fidelity と usability の指標を提示することが目標となる。

本研究プロジェクトでは、実際に研究を進めるにあたり理論的なアプローチと実機による実証実験のアプローチを併用する。理論的なアプローチでは、基本的に ns2 などのネットワークシミュレータを用いて考案したネットワークプロトコルや動的適応アルゴリズムの性能評価を行う。ここでは、実機を用いてでは実現が困難な大規模（ノードの数と分散させる範囲において）なネットワークや長期間にわたる性能評価を対象とする。実機によ

る実証実験では、100 台程度の携帯端末を用いた「かくれんぼ」アプリケーションを実装し、実際にかくれんぼを行ってみる予定である。ここでは、100 台のうちたとえば 3 台程度を「鬼」と想定し、残りの 97 台が鬼の居場所を要求ノードに対して提供するものである。この場合、要求ノードは 97 台の追いかけてノードの任意のものでよい。各ノードのモビリティとして、意図的な移動と非意図的な移動の両者が以下のように想定できる。意図的な移動では、鬼ノードはできるだけ自分の居場所を追いかけてノードに察知されないことを目的に移動し、追いかけてノードの場合には、鬼ノードの居場所を索敵するのに適するように移動する。非意図的な移動では鬼の居場所の再現とはまったく独立にランダムな移動を行うことである。よって理論的には 4 種類の組み合わせが考えられる。具体的には、現在、携帯端末としてコンパック社の iPAQ ハンドヘルド PC にジャケットを装着して、IEEE802.11b 規格の無線 LAN カードといくつかのノードには GPS レシーバカードもつけて稼働する。ソフトウェアは、WindowsCE ではなくコンパック CRL から提供されている Linux[9] を用いる予定である。

7 予備実験

本システムにおいて、地理的に分散した各ノードの位置情報はシステムの各レイヤから参照される基本的な情報であり、システムの効率的な実現にとっての重要な要件である。しかし、現状では各ノードが位置情報を常に確保しながら移動するといった仮定は、ノードが自動車のように比較的大規模なものである場合を除いて厳しいものとなる。USB の SmartDust などは、比較的狭い範囲に散布して、その後の移動を仮定しないような用途に利用されるが、そもそも SmartDust の各ノードが位置情報を取得するのは困難であろう。我々は、すべてのノードではなくランドマークと呼ばれる一部のノードのみが位置情報を取得でき、残りの

ノードはランドマークノードとの相対的な位置関係を動的に生成することによって自己の位置を推測する手法を導入し、以下のような仮定のもとにシミュレーションを行なった。

- 各ノード間の通信方法
1 ホップの半径 100 単位の無線ネットワーク、一定周期でビーコンを発信する。
- 分布範囲
縦横 1000 単位のトーラス空間、無線通信にとっての障害物はない 2D の空間と仮定する。
- 各ノード
ノードは移動せず、総数とランドマークの割合を変化させる。

与えられた空間に一様分布でランダムにノードを散布すると、約 200 個を境として自己の 1 ホップ以内に他の通信ノードのいない、いわゆる孤立ノードがなくなることがわかった。孤立ノードは、移動性を考慮しない今回の実験においてはまったく無駄なノードである。各ノードがランドマークからの相対的な位置情報を統合して自己の存在する可能な面積を推測するとき、50%のランドマーク含有率で、ノード総数 1600 個のとき平均推測面積を約 200 とすることができた。

8 関連研究

移動体をノードとし通信のためのインフラストラクチャを仮定しないでマルチホップで動的に構成されるネットワークとしてモバイルアドホックネットワーク (MANET) の研究が米国を中心に盛んである。中でも CMU の Monarch プロジェクトの DSR や、Nokia の C. Perkins による AODV といったルーティングプロトコルの研究が有名である [1]。MIT の GLS では位置情報を用いてアドホックネットワークのルーティングを効率化を試みたり、Span と呼ばれる省エネ機構を実現している [3]。センサネットワークの研究としては MIT の Cricket [4] や USC の Directed Diffusion [5]、また UCB の SmartDust や TinyOS を利用

した小型センサノードによるネットワークなどがある [6]。彼らはまたセンサネットワークが自己組織化するための機構についても提案している [7]。UCLA の AHLoS では、センサネットワークにおける位置情報生成を試みている [2]。センサネットワークについては米国では特に UCB の SmartDust の研究に DARPA からの予算がついた ために 2001 年の ACM MOBICOM や MobiHoc などでも投稿分野として大きく広がりを見せている。さらに国内では WIDE プロジェクトにおいて iCar を用いた広域情報収集の研究も盛んである。iCar では主にインフラストラクチャを仮定した TCP/IP プロトコルが使用されている。

本研究では、前掲の従来研究でノードのモビリティが統一的に考慮されてきていないことに注目しており、ノードモビリティがネットワークルーティングやノード管理手法に与えるインパクトとそれに適したプロトコルや適応アルゴリズムを提供するという点で貢献する予定である。更にいままで軍事関係以外ではあまり応用分野の見出せなかったモバイルアドホックネットワークに、近い将来に迎えるであろうポスト PC 時代での大きな需要の可能性を支援する基盤技術を提供する。また MANET の研究ではルーティングプロトコルが主な分野となっていたが、本研究でアプリケーションまでを具体的に想定して基盤を構築することにより、新たな研究シードを開拓することが期待できる。更に本研究で構築可能となるセンサネットワークアプリケーションでは、従来のようなインフラストラクチャとしてのものではなくモバイルノードとしてネットワークを動的に構成するために、状況に適應してアプリケーション固有の最適化を様々な手法で図っていくことが可能となる。たとえばアプリケーションの要望によるノードの移動を発生させたり、新たな地点におけるノードをネットワークのメンバに動的に加入したりすることが考えられる。

9 おわりに

研究成果はOS, ネットワークシステム, アプリケーション構築支援ミドルウェアとしてのソフトウェアとして開発され配布される。本研究により基盤技術が確立できれば様々な種類のアプリケーション(ショッピング情報配信から地雷捜索まで)を, たとえば次世代の携帯電話をもって街に出た人々に対してや, いわゆるインターネットカーに乗っている人々, または空中から散布した大量の小型センサノードに対して提供することが可能となる。これは多くのビジネスモデルを提供できるだけでなく, 社会全体が実世界についてのリアルタイムな情報をより手厚く獲得できることを意味する。またここで開発された基盤技術にのっとった適応的なセンサネットワークは人間が立ち入れないような極限地域(戦場や火山, 深海, 災害被災地域, 有毒汚染地域, 宇宙など)においてその自律性, 動的適応性からロバストで信頼性のあるシステムを構築できるようになることが期待できる。さらに広域に分散して自律的に動的適応しネットワークを自己組織化できるようになれば, 単に広域環境情報収集のためのセンサネットワークとしてだけでなく, 広域ネットワークシステム全般に対しての質的な向上を成果として期待することができる。

参考文献

- [1] C. Perkins: “Ad-Hoc Network,” Addison and Welsley Co., 2000.
- [2] A. Savvides, C-C. Han and M.B. Strivastava: “Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc network of sensors,” in *Proc. of 7th Int. Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.166-179, Rome, Italy, 2001.
- [3] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan and R. Morris: “Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in Ad Hoc

wireless networks,” in *Proc. of 7th Int. Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.85-96, Rome, Italy, 2001.

- [4] N. Priyanta, A. Chakraborty and H. Balakrishnan: “The Cricket Location-Support System,” in *Proc. of 6th Int. Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.32-43, Boston, MA., 2000.
- [5] C. Intanagonwivat, R. Govindan and D. Estrin: “Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks,” in *Proc. of 6th Int. Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.56-67, Boston, MA., 2000.
- [6] J.M. Kahn, R.H. Kats and K.S. Pister: “Next century challenges: mobile networking for Smart Dust,” in *Proc. of 5th Int. Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.271-278, Seattle, WA., 1999.
- [7] L. Subramanian and R.H. Kats: “An Architecture for Building Self-Configurable Systems,” in *Proc. of 1st Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC 2000)*, Boston, MA., 2000.
- [8] 西尾, 徳田: “EISS: 環境情報サーバサイトを用いたシステムの状況適応,” 第9回コンピュータシステム・シンポジウム論文集, 1997.
- [9] <http://www.handhelds.org/>.