

イベント駆動型センサネットワークのための オンデマンドアドレス割当方式の実装と評価

茂木 信二[†] 吉原 貴仁[†] 堀内 浩規[†]

多数のセンサノードを配置し、イベントの検出を契機に情報収集するイベント駆動型センサネットワークが注目されている。情報収集を行うシンクが、送信途中で欠落したパケットを送信元のセンサノードから取得するためには、送信元への再送要求の通知が必要になる。通知手段として、ネットワーク全体へのブロードキャストよりも全体の電力消費が小さいユニキャストを用いるためには、そのノードを一意に指定するアドレスがセンサノードに割当てられていなければならない。アドレスを多数のノードに手動で割当てては現実的に困難であり、割当て直後から恒久的に利用可能なアドレスを全ノードに割当てることができる従来のアドレス自動割当て方式の適用が考えられる。しかしながら、アドレス割当てに用いる制御メッセージ数が多く電力を消費してしまう課題があった。そこで筆者らは、イベントを検出したセンサノードのみに一時的なアドレスを割当てて方式を提案している。本稿では、提案方式に基づくシステムを実装し、提案方式の制御メッセージ数とアドレス割当ての処理時間の観点からの評価結果を述べる。

Implementation and Evaluation of On-demand Address Allocation for Event-Driven Sensor Network

SHINJI MOTEGI[†] KIYOHITO YOSHIHARA[†] and HIROKI HORIUCHI[†]

Event-driven sensor network has been widely studied that is composed of a large number of sensor nodes. The network collects information only when a sensor node detects an event. In order for a sink to receive packets failing to acquire, the sink needs to send re-transmission requests to the sensor node. To send the requests to a source sensor node using unicast, of which power consumption is less than of a network-wide broadcast, an address of a sensor node is necessary to distinguish a specific sensor node from others. Since it is actually difficult to allocate the address manually to a number of nodes, a reasonable way is to use automatic address allocation methods. However, traditional methods consume power of sensor nodes due to a number of control messages for allocating an eternal address to every node. Therefore, we have proposed an energy-efficient address allocation method. The proposed method allocates a temporary address only to the sensor node which detected an event, on an on-demand basis. In this paper, we designed and implemented a system based on the proposed method. Using the implemented system and performing simulation studies, we evaluated the proposed method from the viewpoints of the number of control messages and processing time of address allocation.

1. はじめに

多数のセンサノードを配置し、物体の動き等の物理的なイベントの検出を契機に例えば温度や照度を情報収集するイベント駆動型センサネットワークが注目されている¹⁾。利用可能なメモリや電力量に限りがあるセンサノードにとって、主な電力消費は無線通信によるものとなる。例えば1 bitの情報を100 m先まで送信するための電力量はセンサノード内で3000回演算処理する電力量に相当し、その量はパケットサイズの増加や送信距離の延長に伴って増加する^{1),2)}。そのため、ヘッドの短縮によるパケットサイズの削減³⁾やマルチホップ

でパケットを中継することで各センサノードの送信距離を短くするなど^{1),4)}、電力消費を抑制しセンサネットワークをより長い時間利用可能とするための研究が広く行われている。

温度や照度に加え、画像等の情報はセンサネットワークを利用した防犯をはじめとするアプリケーションにおいて有用な情報の1つになる。そのような情報のデータサイズは、例えばBluetoothや無線LAN等のMTU(Maximum Transmission Unit)に比べ一般に大きく、多数のパケットに分割して送信することになる。情報収集を行うシンクが、受信したパケットから元の情報に復元するためには、送信途中で欠落したパケットの再送要求を送信元に通知しなければならない。通知手段に

[†] 株式会社 KDDI 研究所
KDDI R&D Laboratories Inc.

ネットワーク全体へのブロードキャストを用いるよりも全体での電力消費量が小さいユニキャストを用いるためには、文献 4)等のように送信元の指定に検出対象の温度等の属性を用いるアプリケーションとは異なり、送信元を一意に指定するアドレスが必要となる。

アドレスを多数のセンサノードに矛盾なく手動で割当てることは現実的に困難であることから、センサネットワークと同様にマルチホップで通信するアドホックネットワークや固定ネットワークを対象とするアドレス自動割当方式^{5),6),7),8)}の適用が考えられる。それら方式は、割当て直後から恒久的に利用可能なアドレスを全ノードに割当てることができる。しかしながら、アドレス割当てに用いる制御メッセージ数多くセンサノードの電力を消費してしまう課題^{5),6),7),8)}やマルチホップでアドレスを割当てることができない課題^{7),8)}があった。そこで筆者らは、制御メッセージ数を削減しマルチホップでアドレス自動割当てを行うため、イベントを検出したセンサノードのみに一時的なアドレスをそのノードからの要求を契機に割当てるオンデマンドアドレス割当方式を提案している¹⁰⁾。

本稿では、提案方式に基づくシステムの実装と提案方式の制御メッセージ数およびアドレス割当ての処理時間の観点から評価し、その結果を述べる。

2. オンデマンドアドレス割当方式の概要

ネットワーク内の各ノードを一意に識別するためのアドレスに関し、従来方式は、割当て対象が全ノードであり、割当て直後から恒久的に利用可能となる。これに対し、提案方式はイベントの検出を契機にシンクとの通信の開始を要求するセンサノード(以下、AC(Active)ノードと呼ぶ)のみにシンクと通信する間だけ利用可能なアドレス(以下、AC アドレスと呼ぶ)を所定の限られたアドレス空間から割当てて、割当てた AC アドレスの一意性を確保するために行う重複検知は、新たな制御メッセージを送受信することなく行う。具体的には、シンクと AC ノード間の経路を作成するオンデマンド型ルーティングプロトコルの経路探索に併せて重複検知を行う。割当てた AC アドレスは、シンクとの通信の完了後に解放する。これより、新たに AC ノードが選んだアドレスが他と重複する確率を低くし、結果として、重複検知を行う回数を削減することで電力消費を抑制する。

また、各ノードはパケットの中継時に隣接ノードを一意に識別するためのアドレス(以下、LL(Link Local)アド

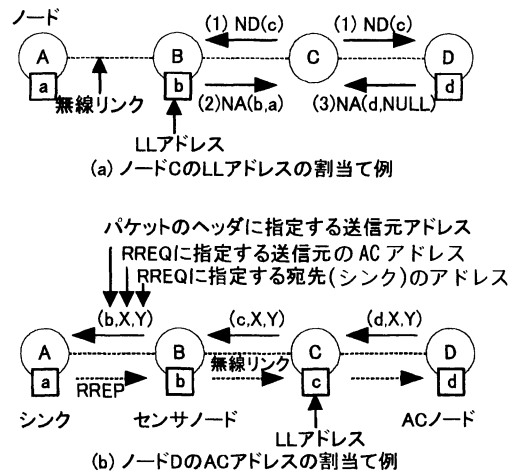


図 1 LL アドレスと AC アドレスの割当て例。

Fig.1 Example scenario of Link Local and Active address allocation.

レスと呼ぶ)を必要とする。LL アドレスは、ノードの起動時に自動で割当てて。起動したノード(図 1(a)C)は LL アドレスの候補“c”を含む ND(Neighbor Discovery message)を隣接ノードにブロードキャストする(図 1(a)(1))。NDを受信した隣接ノードは、自身および隣接ノードの LL アドレスを含む NA(Neighbor Advertisement message)を応答(図 1(a)(2)(3))する。図 1(a)のノード B であれば、NA に自身の LL アドレス“b”と隣接ノード A の LL アドレス“a”を指定し、ノード D であれば自身の LL アドレス“d”と隣接ノードが存在しないことを示す“NULL”を指定する。NA の受信により、起動ノード C は隣接ノードと重複しない LL アドレスを割当てて。

イベントを検出した AC ノード(図 1(b)D)は、自身の AC アドレスとシンクのアドレスの候補を所定のアドレス空間から任意に選択する。選択したアドレスの組みの重複検知を行った後に、それぞれのアドレスを AC ノードおよびシンクに割当てて。アドレスの組について、その重複検知を行うのは、AC ノードの識別に単にそのノードの AC アドレスを用いるよりもそのノードが選んだアドレスの組を用いることで重複確率を小さくすることができるためである。

AC ノードは選択したアドレスの組の重複検知を行うと共にシンクとの経路を作成するための経路探索を開始する(図 1(b))。経路探索でブロードキャストする RREQ(Route Request message)の送信元アドレスには

選択した AC アドレスの候補“X”, RREQ の宛先には選択したシンクのアドレスの候補“Y”を指定する。その RREQ を収めるパケットのヘッダの送信元は、自身の LL アドレス“d”とする。RREQ を中継するセンサノード C, B およびシンク A は、受信した RREQ の送信元の AC アドレスと宛先のアドレスの組(X, Y)がこれまでに受信した RREQ の組と一致するか否か重複検知する。重複しない場合、シンクが RREP(Route Reply message)を応答することでアドレス“X”で識別される AC ノード D と“Y”で識別されるシンク間の経路情報が作成されると共に AC ノード D は“X”を自身の AC アドレスとして割当てる。AC ノード D とシンク間の各ノードは、作成した“X”と“Y”の経路情報をパケットの中継および重複検知に利用する。なお、アドレスの組が重複する場合、各ノードは受信した RREQ を中継せずに破棄する。AC ノードは一定時間経過しても RREP を受信しない場合、他の組を選び同様の手順を繰り返す。

3. システムの実装

イベント駆動型センサネットワークにおいて提案方式に基づいてアドレスをセンサノードに割当てるシステムを実装する。

3.1 実現するアプリケーションとシステム構成

センサネットワークを利用した防犯を想定したアプリケーションを実現する。図2に実現するアプリケーションにおける手順概要とシステム構成を示す。本システムは、1)人感および画像センサを具備するセンサノード、2)センサネットワーク、3)センサノードが検出した情報を収集するシンク、4)検出した情報の通知先となる PC や携帯電話等の端末 ならびに 5) 通知先の端末とシンクを接続するインターネットから構成する。

センサノードを分散配置した領域への侵入物を検出し(図 2(1))、その時の様子を撮影した画像をシンクまで送信する(図 2(2))。シンクは、受信したパケットから画像を復元し、インターネット上の PC や携帯電話等の端末に電子メールで通知する(図 2(3))。センサノードの通信相手は、常にシンクであり、最終的な通知先となるインターネット上の端末と直接通信することはない。よって、各センサノードはインターネット内で一意となるグローバルアドレスを持つ必要はなく、センサネットワーク内でのみ一意となるアドレスを持てばよい。

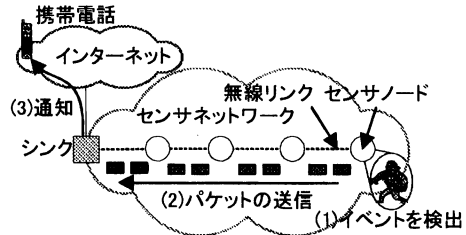


図2 アプリケーションの処理概要とシステムの構成.
Fig.2 Outline procedure and system configuration of application.

3.2 利用するネットワークプロトコル

前節で述べたアプリケーションでは、シンクが送信途中で欠落したパケットを受信するため、パケットの再送要求等を行うトランスポート層のプロトコルが必要になる。現時点でセンサネットワークのための再送要求を行うプロトコルの検討が十分に進んでいないことから¹²⁾、実装が容易な TCP(Transmission Control Protocol)と IP(Internet Protocol)を利用する。よって、2章で述べた AC ノードがシンクに向かって送信するパケットのヘッダはここでは IP ヘッダとなり、ヘッダの送信元に指定する AC アドレスは IP ヘッダの送信元の IP アドレスに対応付ける。同様に宛先に指定するシンクのアドレスは、IP ヘッダの宛先の IP アドレスに対応付けられる。

3.3 実装概要

- (1) 3.1 に基づいて実装する。
- (2) シンクおよびセンサノードに利用するハードウェアは共に kubit のゲートウェイ親機¹¹⁾とする。本親機は赤外線を用いた人感センサを具備しており、画像センサ (CCD カメラ) を本機に取付ける。
- (3) OS(Operating System)は組込み Linux (kernel 2.4.19)とする。用いる IP のバージョンは 4 とし、利用するアドレス空間は 169.254/16 とする。OS 等は CF(Compact Flash)に格納する。
- (4) センサネットワークは、アドホックモードの IEEE802.11b を用いて構成する。
- (5) ルーティングプロトコルには、AODV(Ad hoc on-demand distance vector routing)⁹⁾を用い、経路探索に重複検知を行う処理を追加する。
- (6) センサノードには、画像を SMTP(Simple Mail Transfer Protocol)を用いて送信するメールを実装し、シンクには SMTP サーバを実装する。

(7) メーラは、名前解決を行うレゾルバが提供する汎用的な関数(gethostbyname())を用いてシンクの IP アドレスを取得する。レゾルバには、重複検知済みのシンクの IP アドレスを提供可能とする拡張を行う。

3.4 ソフトウェア構成と処理手順

図3にセンサノードのソフトウェア構成と処理手順を示す。センサノードは人感および画像センサ、LLアドレスの割当てを行うLLモジュール、ACアドレスの重複検知を併せた経路探索を行うAODV_ACモジュール、画像の送信を行うメーラ、ならびにそれらの状態監視・制御を一括して行うプロセスで構成する。

センサノードは、起動時にLLアドレスの割当てを行うLLモジュールを実行する(図3(1))。LLアドレスを割当てた後から状態監視・制御プロセスは、人感センサの状態変化を監視する。人感センサが赤外線の変化を検出すると(図3(2))、状態監視・制御プロセスに変化を通知する(図3(3))。これを契機に状態監視・制御プロセスは画像センサに対して画像の撮影を要求し(図3(4))、画像を取得する(図3(5))。状態監視・制御プロセスはメーラを起動し(図3(6))、メーラはSMTPサーバの名前解決をレゾルバに要求する(図3(7))。レゾルバは、AODV_ACモジュールに対してACアドレスの割当てを併せて行う経路探索(図3(8))を要求し、決定したシンクのIPアドレスをメーラに回答する(図3(9))。その後メーラは画像を添付した電子メールをシンクのSMTPサーバに向かって送信する(図3(10))。

シンクは、センサノードと同様の無線LAN、LLモジュールおよびAODV_ACモジュールに加え、インターネットと接続するためのインタフェースおよびSMTPサーバを具備する。SMTPサーバが受信したセンサノードからの電子メールは、あらかじめ指定されている携帯電話やPCに向かって直ちに送信する。

4. 評価

制御メッセージ数の観点からの評価を4.1節でシミュレーションを用いて行う。アドレス割当ての処理時間の観点からの評価を4.2節で実装システムを用いて行う。

4.1 シミュレーションを用いた評価

(1) シミュレーション条件

電力消費の抑制を図った提案方式の有効性を明らかにするため、シミュレーションを用いた評価を行う。提案方式による電力消費量は、ACアドレスおよびLLアド

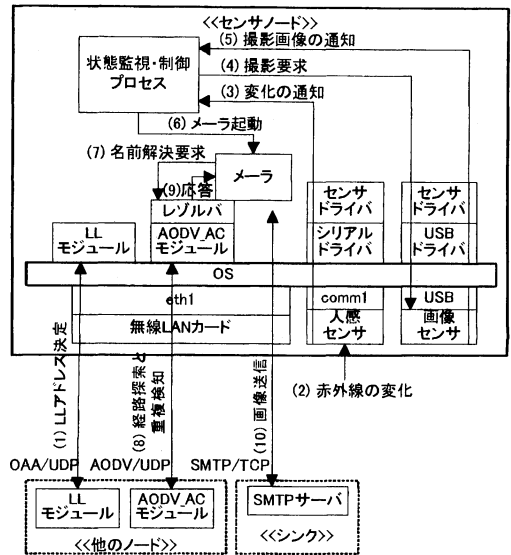


図3 センサノードのソフトウェア構成と処理手順.
Fig.3 Software composition and processing procedure of sensor node.

レスの割当てに用いる制御メッセージの送受信回数に換算される。センサノード数は 1600 ノードとし、縦横がそれぞれ 40 の格子以上にノードを順に配置する。ノードを配置する位置は任意とし、配置されたノードは LL アドレスの割当て手順を実行する。LL アドレスの割当てに用いるアドレス空間は、格子状の構成で隣接ノードを識別するための最小の空間となる 1 から 13 までの整数とする。また、所定のアドレス空間から選んだアドレスをネットワーク全体へのブロードキャストを用いた重複検知を行った後に割当てる従来方式⁵⁾との比較を行う。従来方式が用いるアドレス空間は、すべてのノードにアドレスを割当てることができる最小の空間となる 1 から 1600 までの整数とする。提案方式および従来方式のいずれにおいても、すべてのノードを配置した後からそれらノードを用いた情報収集が開始されるものとする。

(2) シミュレーション結果

図 4 にすべてのノードを配置するまでの各時点でアドレス割当てに用いた制御メッセージの送受信回数を示す。従来方式は、ノード数が約 900 ノード以上から送受信回数が増大している。これは、ノードが所定のアドレス空間から選んだアドレスの重複が、アドレスが割当て済みのノード数の増加に伴い多くなり、その結果、ブロードキャストする回数が増加したためと考えられる。提

案方式もノード数の増加に伴い制御メッセージの送受信回数が増加している。これは LL アドレスの割当てに用いる制御メッセージを送受信する隣接ノード数が、ノード数の増加に伴って増えたためと考えられる。しかしながら、その回数は従来方式に比べ十分に小さい。

図 5(a)は、全ノードを配置するまでの各時点において、それまでの制御メッセージの送受信回数の累積値を示す。この累積値は、センサネットワーク全体での電力消費量に換算できる。提案方式が、全ノードを配置するまでの初期段階で用いる電力消費量は従来方式の約二千分の一(= $35.3 \times 10^3 / 80.5 \times 10^6$)となった。これより提案方式は、初期段階の電力消費量を抑制してセンサネットワークを構成できると言える。

また、全ノードを配置した初期段階の後において、提案方式は、イベントを検出したセンサノードに AC アドレスを割当てて。AC アドレスは一時的なアドレスであることから、イベントを検出するたびに新たな AC アドレスを割当てて。そのため、割当てて AC アドレスの重複検知を併せて行う経路探索もその都度行うことになる。よって、イベントを検出した回数に対する経路探索に用いる制御メッセージの送受信回数の累積値は、図 5(b)のように単調に増加する。図 5(b)の初期値は、初期段階の累積値としている。

一方、従来方式を用いる場合、初期段階でアドレス割当てが完了しており、通常の経路探索をイベントの検出を契機に行うことになる。図 5(b)I と II は、通常の経路探索で用いる制御メッセージの送受信回数の累積値を示す。双方の初期値は、初期段階の累積値としている。図 5(b)I は、経路探索で作成する経路情報を記録するメモリ量が十分に大きい場合を想定し、全ノードが経路探索を行った時点で各ノードが全ノードの経路情報を保持することから、その後新たな経路探索を行わない場合である。それに対して図 5(b)II は、メモリ量が小さい場合を想定し、全ノードの経路情報を保持できないことから全ノードが経路探索を行った後でも提案方式と同様、イベントを検出するたびに経路探索を行う場合である。図 5(b)I では、全ノードが経路探索を行った後から新たな経路探索を行わないため累積値が一定となり、イベントを約 1 万回検出したときに提案方式と累積値が同程度になっている。それ以降では提案方式に比べ累積値が小さくなる。しかしながら、センサノードのメモリ量は一般に少なく全経路情報を保持

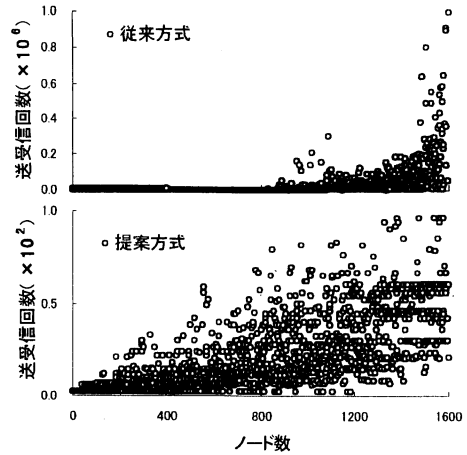
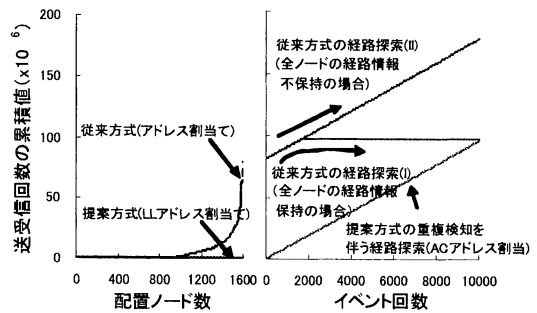


図 4 すべてのノードを配置するまでの制御メッセージの送受信回数。

Fig.4 Number of times of transmission and reception of control message until arranging all nodes.



(a)全ノード配置までの累積値 (b)経路探索の累積値

図 5 送受信回数の累積値。

Fig.5 Accumulation value of the number of times of transmission and reception.

することは実際には困難である。これより、従来方式を用いる場合の実際の累積値は、図 5(b)II となり、図 5(b)I のように累積値が提案方式より小さくなることはないと言える。

これより、ネットワーク全体の電力消費量が、従来のアドレス割当て方式より少ない提案方式は有効と言える。

4.2 実装システムを用いた評価

AC アドレスを割当ての際に、その重複検知を行う処理を経路探索に追加することで増加する処理時間を評価する。そこで、RREQ を送信した時刻から RREP を受信するまでの経路探索時間を実装したシステムを用い

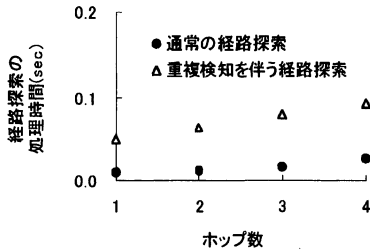


図 6 経路探索の処理時間の評価結果。

Fig.6 Evaluation results of processing time of route discovery.

て測定する。また、比較のため、重複検知を伴わない通常の経路探索時間を測定する。測定は、ACノードからシンクまでのホップ数が1, 2, 3および4ホップの場合について行う。なお、屋内の実験室で測定するにあたり、伝播距離が100メートル程度ある無線LANに対しMACフィルタを適用することでマルチホップでの通信を行う。

図6に、10回の測定結果の平均値を示す。提案方式は、重複検知を行う処理を追加しているため通常の経路探索に比べ処理時間が増加している。例えば、ホップ数が4のときの増分は、0.066 sec (= 0.092 sec - 0.026 sec)である。その間に100 mを20 sec程度で移動する走行速度5 m/secの侵入物の移動距離は33 cmとなる。実測した値を用いて前節のシミュレーションの格子の1辺となる40ホップの場合の処理時間の増分を見積もると、0.66 sec (= 0.066 sec × 10)となる。その間の移動距離は3.3 mであり、センサノードの間隔が無線LANの伝播距離である100メートル程度となるセンサネットワークの領域内でほとんど移動していないと言える。よって、その程度の遅延は許容できると考えられる。これより、実用的な処理時間を達成していることから提案方式は有効と言える。

6. おわりに

本稿では、イベントの検出を契機に情報の収集を行うイベント駆動型センサネットワークにおいてオンデマンドでアドレスを割当てる提案方式に基づいたシステムを実装し、実装システムおよびシミュレーションを用いた提案方式の評価を行った。実装システムは、センサネットワークを利用した防犯を想定し、センサノードを分散配置した地理的な領域への侵入物を検出し、その時の様子を撮影した画像を携帯電話等に通知するアプリ

ケーションを実現した。また、実装したセンサノードが用いるネットワークプロトコル、ソフトウェア構成および処理手順等について述べた。

実装システムを用いて、提案方式が経路探索にアドレスの重複検知を併せて行うことで増加する処理時間を評価した。その結果、その増分は短時間であり実用的な処理時間を達成していることを示した。また、シミュレーションを用いて提案方式の制御メッセージ数の観点からの評価を行い、提案方式は制御メッセージ数が従来方式に比べ少なく電力消費量を抑制できることを示した。

謝辞 日頃ご指導いただく(株)KDDI 研究所 浅見所長、ならびに和田執行役員に感謝する。なお本研究の一部は、総務省委託研究「ユビキタスネットワーク技術の研究開発」により実施している。

参 考 文 献

- 1) Tilak, S. et al.: A Taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models, ACM Mobile Computing and Communications Review, Vol.6, No.2, pp.28-36(2002).
- 2) Pottie, J. et al.: Embedding the internet wireless integrated networks sensors, ACM Comm., Vol. 43, No.5, pp.51-58(2000).
- 3) Schurgers, C. et al.: Distributed On-Demand Address Assignment in Wireless Sensor Network, IEEE Trans., Vol.13, No.10, pp.1056-1065(2002).
- 4) Intanagonwiwat, C. et al.: Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks, Proc. 4th ACM Int. Conf. on Mobile Computing and Networking, pp.56-67(2000).
- 5) Perkins, C.E. et al.: IP Address Autoconfiguration for Ad Hoc Networks, IETF Internet Draft (draft-ietf-manet-autoconf-01.txt)(2001). work in progress.
- 6) Zhou, H. et al.: Prophet Address Allocation for Large Scale MANETs, Proc. 22nd IEEE Conf. on the Computer and Communications Societies(2003).
- 7) Droms, R.: Dynamic host configuration protocol, IETF RFC 2131(1997).
- 8) Narten, T.: NEIGHBOR DISCOVERY and Stateless Autoconfiguration in IPv6, IEEE Internet Computing Mag., Vol.3, No.4, pp.54-62(1999).
- 9) Perkins, C. E. et al.: Ad hoc on-demand distance vector routing, Proc. 2nd IEEE workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp.90-100(1999).
- 10) 茂木ほか: イベント駆動型のセンサネットワークのためのオンデマンドアドレス割当方式の提案, 信学技報, Vol.103 No.689, IN2003-216, pp.43-48(2004).
- 11) 吉原ほか: センシングとコントロールを実現するユビキタスノード“kubit”の設計と実装, 情処研報, Vol.2003-UBI, No.2-31(2003).
- 12) Akyildiz, I. F.: A Survey on Sensor Networks, IEEE Comm. Mag., Vol.40, Issue.8, pp.102-114(2002).