

無線センサーネットワークのための 情報収集プロトコルの提案

山口 敦生[†] 加藤 聰彦[†]

近年、無線センサーネットワークの研究が盛んにおこなわれている。これは、センサーの小型化とネットワーク技術の進捗により、利用範囲が広がったことに起因すると考えられる。無線センサーネットワーク実現の課題として、いかにして多数のセンサーノードを漏れなく一つのネットワークとしてカバーするか。また、電力消費をいかにして抑えるかなどが考えられる。そこで筆者らは、通常は電源が入っておらず電波により励起されるセンサーノードを使用し、さらにセンサーがマルチホップ通信を行うことにより広範囲に広がったセンサーをネットワークに収容する方式について検討する。

A Proposal of Information Retrieval Protocol for Wireless Sensor Network

Atsuo Yamaguchi[†] Toshihiko Kato[†]

Recently, a sensor network is studied actively as a new application of network technologies. In some cases, it is considered as an example of ad hoc networks, but its requirements of functionality and power usage limitation are different from those for ad hoc networks, that is, the control nodes and the sensor nodes are asymmetric in terms of the functionality and the power usage. The communication scheme is also different. In a sensor network, the application level communication is performed mainly between the control nodes and the sensor nodes. On the other hand, the communication quality requirements, such as the reliability of data transfer, are similar. In this paper, we propose a new information retrieval protocol for a wireless sensor network. The proposed protocol takes account of the functional and power limitation requirements of sensors and provides high quality of communication. This paper describes the detailed design of our protocol.

1. はじめに

近年、無線センサーネットワークの検討が広く行われている。センサーネットワークにおいては、情報の収集ノードが定期的にセンサーからの情報収集を行うという通信形態が一般的で、通常のデータ通信アプリケーションに比べて転送される情報量が少ないという特徴を有する。さらにセンサーの構造や機能をなるべく簡易なものとし、また消費電力を極力抑える必

要がある。その一方で分散されたセンサーからの情報収集の信頼性も高める必要があり、存在するセンサーから漏れなく情報を集める、ビット誤りや衝突などによる情報の欠落を防ぐなどの要求も存在する。

一方、従来から検討されている無線アドホックネットワークでは、通信ノード間の経路情報を設定し大量のデータ転送を行うことを想定しており、また経路を維持するために定期的に制御メッセージを交換する必要がある[1,2]。このため、従来のアドホックネットワークの通信方式をセンサーネットワークに適用すること

[†]電気通信大学 大学院 情報システム学研究科
[†] University of Electro-Communications

は必ずしも得策とはいえないと考えられる[3]。

そこで筆者らは情報収集ノード (Reader: リーダー) が分散されたセンサーから定期的に情報を収集するようなネットワークアプリケーションを対象とし、センサーの消費電力や機能要件を低減しかつ地理的に分散されたセンサーから高信頼に情報を収集可能な通信プロトコルを検討している。本稿ではそのプロトコルの詳細について述べる。以下では、本稿で想定するセンサーネットワークの概要と要求条件を2章で示し、それに基づいて3章において提案する情報収集プロトコルの概要を示す。さらに4章でいろいろな状況における通信シーケンスを用いて提案するプロトコルの詳細設計を示す。最後に5章において結論を示す。

2. 対象とするセンサーネットワーク

2.1 ネットワークの要求条件

本稿で想定するセンサーネットワークの構成例を図1に示す。ここで、Rと呼ばれるノードが情報収集を行うリーダーであり、 N_1 から N_6 までの各ノードがセンサーである。リーダーおよびセンサーは無線通信を行うものとし、図中では点線を用いて無線の到達範囲を示している。

このようなセンサーネットワークに対して、筆者らは以下の要求条件を想定している。

- (1) 前述のように、リーダーは、センサーの測定する情報を、定期的に収集する。さらに、その情報量は小さく、転送するために複数のパケットを送信する必要はないものとする。
- (2) リーダーから直接無線通信できないセンサーも存在し、その場合はセンサー間でマルチホップを行うものとする。
- (3) センサーは一般的には移動するものとする。このためリーダーが情報を収集する時点では、センサーの配置が前の収集時点とは異なっているものとする。また、センサー間でマルチホップ通信を行うため、情報収集の要求を転送する時点と、情報収集の応答を転送する時点で、センサーの位置が変更されている場合も想定する。
- (4) リーダーは一般に、マルチホップで通信可

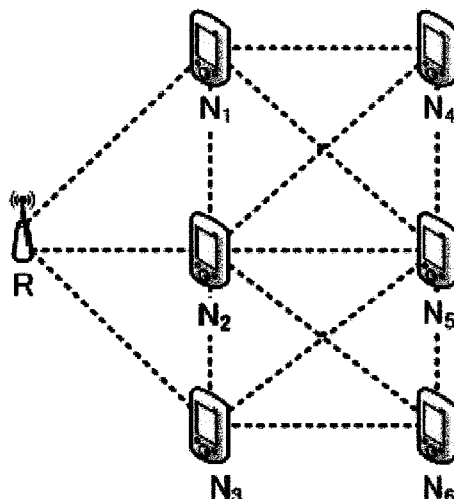


図1 ネットワーク構成例

能なセンサーの総数を知らないとする。このため、センサーからの情報は漏れなくリーダーに転送される必要がある。このため、無線通信でのビット誤りや、複数のセンサー間での送信の衝突において、メッセージが消失した場合は、そのメッセージを再送する必要がある。さらに、センサーの移動に伴う経路が消失した場合は、代替経路を用いて、情報転送を行う必要がある。

- (5) センサーは、長期的に利用することが期待されるため、その消費電力を極力抑えなければならない。このためには、通常は電源をできるだけ使用しない状態で待機しており、情報収集の場合のみ電源がオンとなるような処理を行うことが望ましい。このためには、情報収集の手順に先立ち、電波で励起され、必要な通信処理を行った後に、再度電源消費を抑えた状態に戻る必要がある。
- (6) さらに、情報収集に必要なメッセージを必要最小限とする必要がある。このためには、既存のアドホックネットワークのように、経路情報を保持するために、定期的な制御メッセージの交換を行わないようにするとともに、情報収集時に必要となる制御メッセージ数も削減する必要がある。

2.2 センサーの概要

このような要求条件を満足するために、センサーとして以下のようなシステムを想定している。マルチホップ通信を行うために、センサーは、無線タグ (RFID) システム[4]において検討されているタグ自身と、タグリーダー (Interrogator) の双方の機能を有するようなものである。さらに、通常は Interrogator 部分の電源はオフとなっており、文献[5]で定義される Type C のタグのように、隣接センサーからの最初の無線信号により、タグ部分が励起され、それが Interrogator 部分を起動させる機能を有するものとする。

さらに、センサーは多重アクセスを可能とするために、IEEE802.11[6]の定める CSMA/CA などの MAC プロトコルをサポートしているものとする。これによりキャリアセンスに基づくメディアアクセスや、ACK フレームを用いたデータ再送などを実現する。

本稿で提案する情報収集のための通信プロトコルは、これらの機能の上を実現するものとする。具体的には、データリンク層における MAC 副層の上位の副層として実現してもよいし、ネットワーク層のプロトコルとして実現してもよい。本稿では、アドレス解決などのオーバーヘッドを排除するために、前者のアプローチをとることとする。この場合、リーダーおよびセンサーを識別するために、MAC アドレスを使用すると想定する。

3. 情報収集プロトコルの機能概要

上記の前提条件を踏まえ、無線センサーネットワークの情報収集プロトコルとして、以下のような方式をサポートするものとした。

(1) 経路制御と情報要求の重畳

本プロトコルの通信では、各センサーからリーダーへのデータ転送のみを対象とする。このため、センサーからリーダーへの経路情報が設定されればよい。一方、2. で述べたように、情報収集のたびに情報収集の要求をセンサーに通知する必要がある。そこで、情報収集のたびに、情報収集要求メッセージをフラッディングさせ、それによりリーダーへの経路を確立さ

せることとする。

これにより、リーダーへの経路は情報収集のたびに再確立される。このため、情報収集を行っていない間に経路を保持する必要はないため、経路情報保持のための制御メッセージを交換する必要はない。

このような手順により、経路制御のための制御オーバーヘッドを削減する。

(2) 情報収集の要求と応答の重畳

通常無線リンクは双方向通信が可能な場合が多い。このため、あるセンサーが情報収集要求メッセージをフラッディングする場合には、そのセンサーに要求メッセージを送信したセンサーまたはリーダーにも受信されることになる。このため、要求メッセージのフラッディング時に、それを送信するセンサーの情報も重畳する、すなわち要求メッセージに応答メッセージを重畳させることにより、応答メッセージの送信を削減することとする。

(3) 重畳された応答の受信確認

(2)により重畳された応答は、要求メッセージのブロードキャストにより転送される。ブロードキャストフレームに対してはACKフレームを用いた MAC 副層での受信応答はない。このため確実に受信を確認するため、応答の受信者からの明示的な受信確認の手順を導入する。この受信確認の ACK メッセージは、MAC 副層での再送のあるユニキャストにより転送するものとする。

これまで述べた手順を図2に示す。この図では図1に示したノードのうち、リーダーRとセンサーN₁とN₄を用いている。まずリーダーRが要求メッセージをブロードキャストし、それをセンサーN₁が受信する(図中(a))。N₁は自身の応答を重畳した応答メッセージを再ブロードキャストする。これにより隣接するセンサーN₄が要求メッセージを受信するとともに、リーダーRがN₁の応答を受信することになる(図中(b))。さらにリーダーRがN₁からの応答を受信したことをACKメッセージよりN₁に通知する(図中(c))このようにして、セン

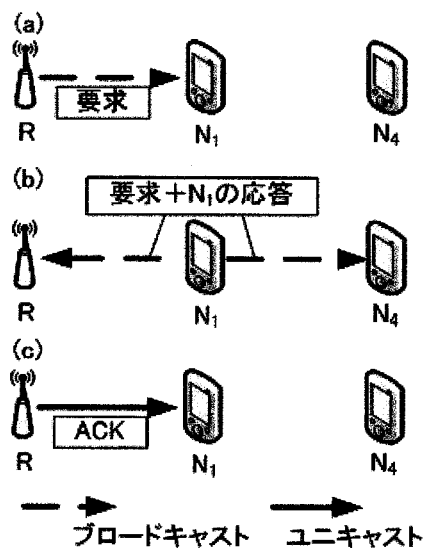


図2 要求のフラッディングと応答の重畳

サーN₁ は要求メッセージをフラッディングすると同時に応答をリーダーR に送信することができる。

(4) 応答のフォワーディングと受信確認

(2)により、要求メッセージを受信したセンサーは、それをブロードキャストした隣接のセンサーまたはリーダーまでは、要求のフラッディングにより応答を返すことができる。しかし、リーダーから2ホップ以上離れたセンサーの場合は、隣接のセンサーからリーダーまでさらに応答を転送する必要がある。このため、センサーは他のセンサーの応答を応答メッセージとして、リーダーへの上位センサーに向けてフォワーディングすることとする。リーダーへの上位センサーは要求メッセージのフラッディング時に記録しておく。さらに、このメッセージに対しても、ACKメッセージにより明示的な受信確認を行うこととする。

図3にこの通信例を示す。図2の(b)の状態で、センサーN₄が要求メッセージを受信すると、同様に応答を重畳した要求メッセージを再ブロードキャストする(図中(d))。これがセンサーN₁に受信され、それに対するACKメッセージが返される(図中(e))。N₁はN₄からの応

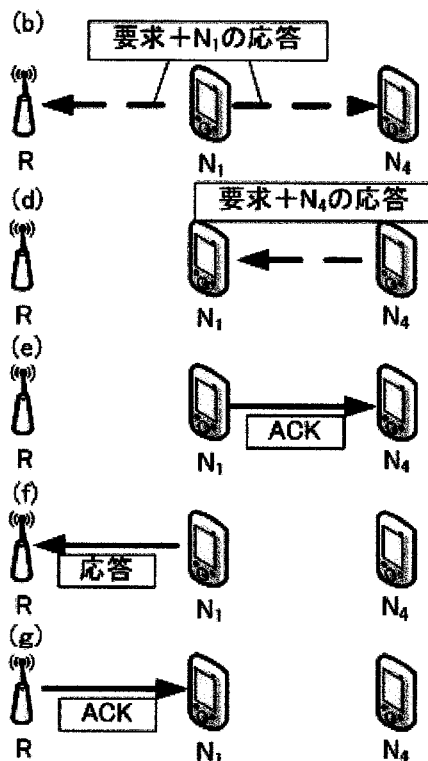


図3 応答のフラッディング

答を応答メッセージとしてリーダーR にフォワーディングする。この応答メッセージはユニキャストで転送される(図中(f))。さらにリーダーはN₁に対して、応答メッセージを受信したことをACKメッセージで通知する(図中(g))。

(5) 受信確認が得られない場合の再送

(3)および(4)で受信確認を導入したが、受信確認が得られない場合は、応答を送信したセンサーは同一の応答を再送する。この再送は、応答が要求メッセージに重畳された場合も、応答メッセージとして送信された場合も、応答メッセージとしてユニキャストで行われる。

再送された応答メッセージに対する受信確認が得られない場合は、再度再送を行う。一定回数再送を行っても、受信確認が得られない場合は、再送リトライアウトとする。その場合は以下に述べる方法で、他のセンサーを用いて応

答を転送することを試みる。

(6) 再送リトライアウトの場合の代替経路の利用

2. で述べたように、応答を転送する最中にもセンサーが移動した場合などは、当初想定した経路が切断され、再送リトライアウトが生ずる場合がある。図1に示すように、想定するセンサーネットワークでは、各センサーからリーダーに対しては、複数の経路が存在すると考えている。このため、再送リトライアウトの場合は、そのセンサーはリーダーへの別の経路を用いて応答を送信するように試みる。

センサーは複数の隣接センサーから要求メッセージを受信する。それに対して、最初の要求メッセージに対してのみ、フラッディングを行い、そのメッセージの送信センサーをリーダーへの上流センサーとする。

一方、その後受信した要求メッセージに対

してはリーダーへの代替経路として記憶する。上流センサーへの応答の転送が再送リトライアウトした場合は、代替経路を用いて転送を試みる。

この手順の例を図4に示す。この図では、図1のうちの3つのセンサーN₁、N₂、N₄を用いている。リーダーRから要求メッセージがブロードキャストされ、センサーN₁とN₂がこれを受信する(図中(A))。それに対し、N₁とN₂がそれぞれの応答を重畳した要求メッセージをフラッディングし、その2つのメッセージをN₄が受信する(図中(B)と(C))。これらの応答に対して、その受信者であるリーダーRからN₁とN₂にそれぞれ別々にACKメッセージが送られる(図中(D)と(E))。

この時点でセンサーN₁が動作不能となったとする。センサーN₄はN₁から先に要求メッセージを受信しているため、N₁を上流のセンサーとしている。このためN₄が応答を重畳した

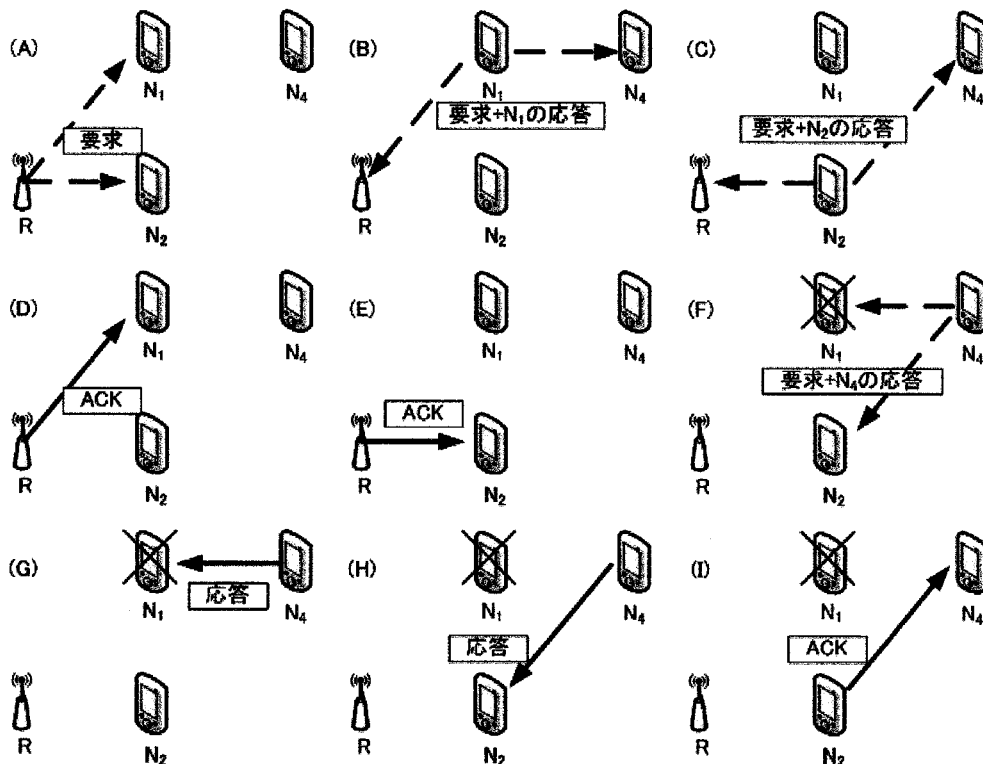


図4 再送リトライアウト時の手順例

要求メッセージを再ブロードキャストする際には、 N_1 を応答の受信者と指定している（図中(F)）。しかし、 N_1 は動作していないためこれに対する ACK は返送されない。したがって N_4 は N_1 に対して応答メッセージを再送するが、これは再送リトライアウトする（図中(G)）。そこで、 N_4 は代替経路として、センサー N_2 を経由してリーダー R に応答を送信しようとする（図中(H)）。この転送は成功し N_2 から ACK メッセージを受信し（図中(I)）、その後 N_2 から R に応答がフォワーディングされる。

4. 情報収集プロトコルの詳細設計

4.1 メッセージ種別

3. で述べたように、本稿で提案するセンサーネットワーク用の情報収集プロトコルでは以下の3種類のメッセージを用いる。

- 情報収集要求 (Req) メッセージ
- 応答 (Rep) メッセージ
- 受信確認 (ACK) メッセージ

これらは、802.11 MAC の定めるデータフレームの中に含まれると想定する。

Req メッセージは、リーダーからの情報収集要求をセンサーに伝えるとともに、リーダーへの経路情報の確立、センサーからの応答の重畳転送などの機能を実現する。このために、以下のようなパラメータを有する。

- Req メッセージ番号： 情報収集を識別するための番号で、リーダーが情報収集を起動するごとに、新たな番号が割り当てられる。
- 要求情報識別子 (オプション)： 収集すべき情報を識別するもの。
- ホップカウント： リーダーからのホップ数を示す。
- 応答受信者アドレス (オプション)： Req メッセージに重畳される応答を受信すべきノードのアドレスを示す。
- 応答者アドレス (オプション)： 応答情報を提供したセンサーのアドレスを示す。
- 応答情報 (オプション)： センサーからの応答情報の本体を示す。

また、Rep メッセージは以下のようなパラメ

ータを有する。

- Req メッセージ番号： 対応する要求メッセージの Req メッセージ番号を示す。さらに以下の情報を複数含む。
- 応答者アドレス： 応答情報を提供したセンサーのアドレスを示す。
- 応答情報： センサーからの情報の本体を示す。

このメッセージはユニキャストで送信されるため、受信者のアドレスは MAC ヘッドに含まれることになる。

ACK メッセージには、特にパラメータは含まれない。

4.2 通信シーケンス

(1) 基本シーケンス

図1のネットワークにおいて、リーダー R が各センサーから情報を収集するための基本的なシーケンスを図5に示す。

まず、R が Req メッセージをブロードキャストする。この図では、Req メッセージ番号は1で、ホップカウントは0に設定されている。続いて、センサー N_1 、 N_2 、 N_3 が Req メッセージを再ブロードキャストする。ここでは、ホップカウントが1に増加されており、また応答情報が付加されている（図では省略）。応答受信者アドレスはリーダー R となっており、応答者アドレスはそれぞれのセンサーとなっている。また、それぞれのメッセージに対してリーダー R から ACK メッセージが返されている。それぞれの Req メッセージは、電波が到達する範囲のセンサーにも受信される。センサーの N_1 、 N_2 、 N_3 については、最初の Req メッセージではないため、リーダーへの代替経路として経路情報を記録する。

N_4 と N_5 は最初に N_1 が再ブロードキャストした Req メッセージを受信する。そのメッセージを再ブロードキャストする際に、自身の応答情報を重畳する。ホップカウントは2、応答受信者アドレスは N_1 となっている。それぞれに対して N_1 から ACK メッセージが返されている。それ以外のセンサーは最初の Req メッセージではないため代替経路の経路情報を記録するのみである。

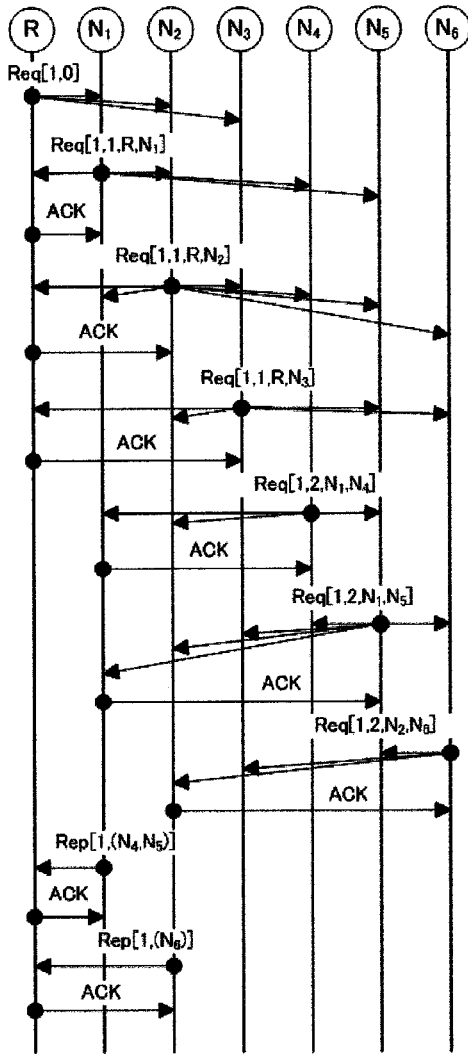


図5 基本シーケンス

センサーN₆は、N₂が再ブロードキャストした Req メッセージを再ブロードキャストしその際同様に自身の応答情報を重畳する。その結果、N₂から ACK メッセージが返されている。

続いて、センサーN₁が N₄と N₅から送信された応答情報をまとめてリーダーRへ転送し、Rがこれに対してACKメッセージを返している。またN₂からはN₆からの応答情報がRに転送されている。このようにして、すべてのセンサーからの情報をマルチホップでリーダーに集めることができる。

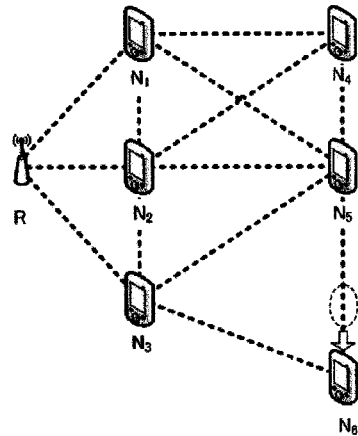


図6 センサーの移動例 (その1)

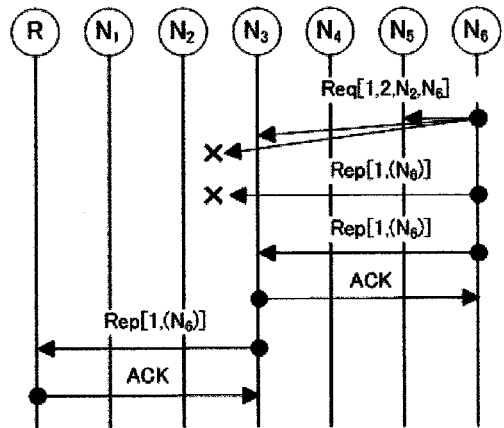


図7 図6に対応するシーケンス

(2) 代替経路を用いる場合のシーケンス

次に、センサーの一部が移動したなどの理由で、応答情報を転送する経路が変化した場合のシーケンス例を示す。図1のネットワークの一部のセンサーが、情報収集中に図6のように移動した場合のシーケンスを図7に示す。

図6では、センサーN₂からの Req メッセージを受信した後に、センサーN₆が移動しN₂との間の無線リンクが切断されたとしている。この場合N₆は Req メッセージの再ブロードキャストの際、N₂を応答受信者として指定する。しかしN₂がこれを受信しないため、ACKメッセージは返ってこない。このためN₆は RepメッセージをN₂に向けてユニキャストで送信す

るが、再送リトライアウトを起こす。この時点で N_6 は、 N_3 および N_5 が R への経路を持っていることを知っている。この内、 N_3 はリーダー R へ 1 ホップ、 N_5 は R へ 2 ホップである。このため N_6 はホップカウントの少ない N_3 を上流と定め Rep メッセージを送信する。これを N_3 が受信し ACK メッセージを返すとともに、 R へのフォワーディングを行う。

次に、図 8 に示すように 2 つのセンサーが

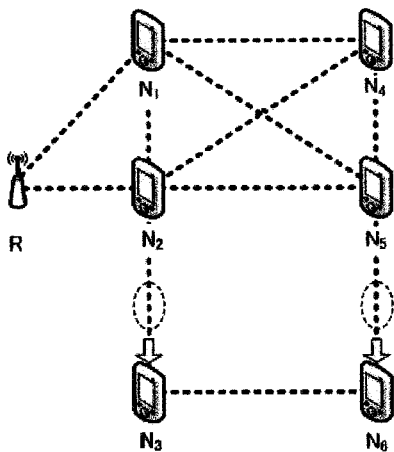


図 8 センサーの移動例 (その 2)

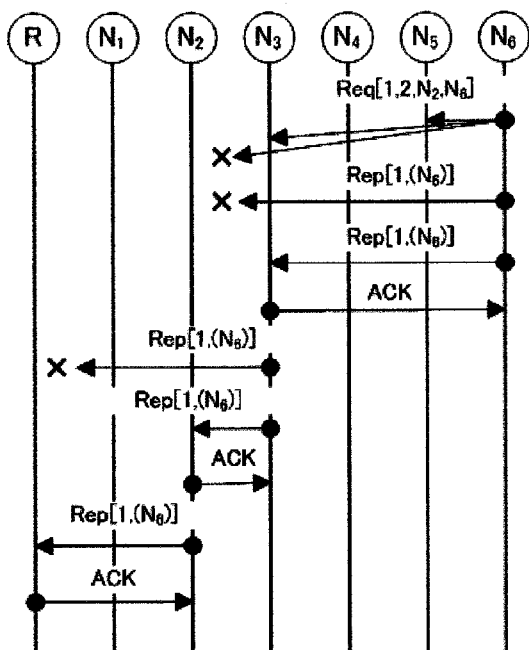


図 9 図 8 に対応するシーケンス

移動した場合のシーケンスを図 9 に示す。

図 7 と同様に N_6 は N_2 への応答の送信に失敗し N_3 に転送する。しかし次に N_3 は R への転送を失敗する。この時点で N_3 が持つ代替の経路は、 N_2 経由、 N_5 経由、 N_6 経由である。この内からホップカウントが少ない N_2 に対して Rep メッセージを転送し R へのフォワーディングに成功する。この場合、 N_3 および N_5 経由の転送が失敗すると、再度 N_6 に応答を戻すことも考えられる。

5. おわりに

本稿では、無線通信を行うセンサーネットワークを対象として、リーダーが、センサーのマルチホップ機能を用いて、低いオーバーヘッドで、伝送誤りやセンサーの移動による情報損失に対しても信頼性高く、情報を収集するための通信プロトコルを提案した。

参考文献

- [1]: I. Chakeres and C. Perkins, "Dynamic MANET On-demand (DYMO) Routing," draft-ietf-manet-dymo-10, Jul. 2007.
- [2]: T. Clausen, et.al., "The Optimized Link State Routing Protocol version 2," draft-ietf-manet-olsrv2-04, Jul. 2007.
- [3]: 山口, 加藤, 伊藤, "電波で励起される無線センサのためのマルチホップ通信プロトコルに関する一考察," 信学総大, B-6-17, Mar. 2007.
- [4]: ISO/IEC, "Information technology - Radio frequency identification for item management - Part 1: Reference architecture and definition of parameters to be standardized," ISO/IEC 18000-1, Sep. 2004.
- [5]: ISO/IEC, "Information technology - Radio frequency identification for item management - Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz, AMENDMENT 1: Extension with Type C and update of Types A and B," ISO/IEC 18000-6, AMENDMENT1, Jun. 2006.
- [6]: ANSI/IEEE, "Local and metropolitan area networks - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition, 1999.