

センサネットワークのためのトポロジ情報収集方式の提案

茂木 信二[†] 吉原 貴仁[†] 堀内 浩規[†]

(株)KDDI 研究所[†]

1. はじめに

センサネットワークの管理を行う上でネットワークトポロジの情報は、活性的なセンサノードの有無、無線リンクの接続状況並びにノードへの到達可能性等を知ることが可能とし、経路制御等に活用できる有用な情報となる[1][2]。トポロジ情報は、各ノードの隣接ノードの ID のリスト(以下隣接ノードリストと呼ぶ)の集合からなる。トポロジ情報を収集するためにノードが個別にシンクに向かって隣接ノードリストを送信すると、通信量の増加に伴い電力消費量が增大し、ノードの利用可能時間が短くなってしまふ。そこで、ネットワーク内で集約しながら収集する方式が提案されている[2][3]。各ノードが隣接ノードリストを送信するタイミングはシンクまでのホップ数に応じて設定し、シンクを頂点とする経路木の葉からホップ数が小さいノードに向かって順に送信する。ネットワーク内集約の具体的な処理は、各ノードが自身の送信タイミングになるとそれまでに自身よりもシンクまでのホップ数が大きい複数の隣接ノード(以下、子ノードと呼ぶ)から受信した隣接ノードリストと自身の隣接ノードリストを1つのパケットに併合し、シンクに向かう経路上の隣接ノード(以下、親ノードと呼ぶ)に向かって送信する処理となる。しかしながら、併合した隣接ノードリストのサイズの増加に伴いパケット送信に要する時間が長くなり親ノードの送信タイミングに間に合わなくなる結果、併合した多くの隣接ノードリストを転送途中で一度に失ってしまう問題を生じる原因の1つとなる。

本稿では、センサネットワークのトポロジ情報の新たな収集方式を提案する。提案方式は、併合する隣接ノードリストのサイズに応じて送信タイミングの制御を行うことで、親ノードの送信タイミングからの遅延を回避する。更に、単に1つのパケットへの併合のみならずパケット損失率に応じて複数パケットへの分割や再結合を行いパケット損失に対する耐障害性を図る。

2. 関連研究とその問題

センサネットワークからデータ収集するためにノードが個別にシンクに向かってデータを送信する方法、具体的には、自信のデータを格納した REP の送信に加え各子ノードから REP を受信するたびにその転送を行う方法となる。このような方法の冗長な通信量を削減するため、ネットワーク内でデータを集約しながら収集する方式が従来提案されている[1]。従来方式では、センサノードに対し、データ送信を要求する REQ メッセージをシンクがネットワーク全体に広報し、REQ を受信したノードはデータを格納した REP メッセージを応答する。ネットワーク内集約方法は、次の(1)あるいは(2)の方法を用いる。

- (1) 複数の子ノードから受信した REP 内のデータと自身データを要約した結果を1つの REP に格納して親ノードに送信する処理方法。この方法は収集するデータが、例えば、複数の温度センサが検出する温度の最大値をシンクが収集する場合に適用する。
- (2) 複数の子ノードから受信した REP 内のデータと自身のデータを1つの REP 内に併合して親ノードに送信する処理方法[2]。この方法は収集するデータが、上記(1)のようにデータの要約を行うことができない、例えば、各ノードの隣接ノードリストをシンクが収集しトポロジ情報を得る場合に適用する。

親ノードが子ノードから REP を受信するたびにその転送を行うのではなく、子ノードからの REP の受信をもって自身の REP 送信を行うことで助長な通信量を削減する(1)(2)の処理を可能とするため、各ノードの REP の送信タイミングを経路木における位置に応じて設定する[2][3]。位置とは経路木の頂点となるシンクまでのホップ数であり、ホップ数が最大のノードから

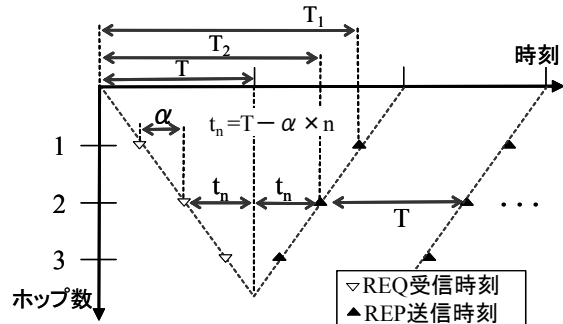


図1 REPの送信タイミングの制御例

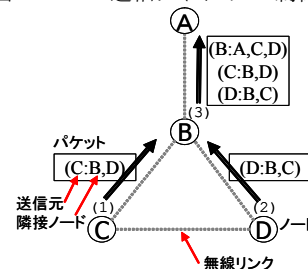


図2 ネットワーク内集約処理手順の例

ホップ数の小さいノードに向かって順に送信する。具体的には、ホップ数 n のノードは、REQ を受信した時刻から図 1 に示す時間 $2t_n$ 経過した後 REP を送信する($t_n = T - \alpha \times n$, $T: T \geq \alpha \times n$)。シンクがデータ取得を要求する周期 T と α はシンクが REQ 内に指定する。1 ホップの区間での通信遅延を示す α は利用する通信メディアの通信速度と REQ と REP のメッセージサイズを元に利用者が予め決定する。例えば、図 2 のシンク A までのホップ数が 1 のノード B は REQ の受信から $2(T - \alpha)$ 経過後(図1 T_1)に方法(2)の処理を行った REP を送信する。ホップ数が 2 のノード C と D は、親ノード B の送信時刻 T_1 よりも α だけ前(図 1 T_2)に REP を送信する。これにより、例えばノード B の場合、自身の送信タイミングから α だけ前の時刻から REP 受信に備え、その時間と自身が REP の送信を終えるまでの時間を活性的な状態とし、それ以外の多くの時間を非活性とすることで電力消費を抑制する。

しかしながら、方法(2)を用いるトポロジ情報の収集では併合した隣接ノードリスト数の増加に伴い REP の送信に要する時間が長くなり親ノードの REP の送信タイミングに間に合わなくなる。その結果、併合して格納した多くの隣接ノードリストを転送途中で一度に失ってしまう問題がある(問題 1)。単に α を予め大きな値とするのでは、活性とする時間が冗長となり電力消費が大きくなってしまふ。更に、単に1つの REP に隣接ノードリストを併合する方法では、シンクに近づくにつれて REP のサイズが増大しパケット損失の発生確率が増加してしまふ問題がある(問題 2)。

3. トポロジ情報収集方式の提案

3.1 基本方針

センサネットワークのトポロジ情報を収集するための新たな方式を提案する。以下に提案方式の基本方針を示す。

- (1) データ収集に必要な通信量を削減するため、従来方式と同様、ネットワーク内集約を行う。
- (2) 併合する隣接ノードリストのサイズに応じて各ホップ数の送信タイミングを制御することで、親ノードの送信タイミングからの遅延を回避する(問題 1 への対処)。
- (3) 基本方針(2)の実現には、併合する隣接ノードリストのサイズが必要となることからそのサイズを収集するための手順を導入する。

- (4) 無線リンクの packets 損失率に応じて複数 packets への分割や再結合を行う処理を用いることで、packets 損失に対する耐障害性を図る(問題 2 への対処).

基本方針(3)によりトポロジ情報の収集手順は、先ず併合する隣接ノードリストのサイズを収集し(本データ収集を以下タスク 1 と呼ぶ)、次にトポロジ情報を収集する(本データ収集を以下タスク 2 と呼ぶ)手順となる。基本方針(1)に基づき、タスク 1 では前節の(1)で述べた要約処理方法を用い、タスク 2 では前節の(2)で述べた併合処理方法を用いる。シンクは各タスクで複数回の REP 送信を REQ にて要求し、要求した回数分の REP の受信をもってタスク 1 を終了しタスク 2 に移る。シンクは各タスクで複数回取得した値を使って取得データの精度を向上する。タスク 2 では、基本方針(4)に基づく処理を合わせて行う。前提として利用する無線リンクの規格通信速度は既知とし、ノード ID は固定長とする。

3.2 提案方式の概要

(1)タスク 1 で収集するデータ

タスク 2 で用いる REP は、送信元のノード ID 等からなる固定サイズのヘッダと子ノードから受信した複数の隣接ノードリストと自身のリストで構成する。従って、REP のサイズは固定的なヘッダを除く隣接ノードリストのサイズによって決まる。また、複数の子ノードは同一の親ノードに対し同時にデータ送信することは単一の無線通信チャネルを用いるためにできず、1 ノードずつ REP を送信することになる。これより親ノードに対しその子ノードすべてが REP を送信するために要する時間 β_n (n は子ノードのホップ数)は、それらの REP 内の隣接ノードリストの合計サイズから求めることができる。タスク 2 では隣接ノードリストを経路木の葉から順次併合し、隣接ノードリストの具体的な要素を(送信元ノード ID, 送信元ノードの隣接ノードの ID)の組とする。従って、1 要素のサイズを EL_{size} とすると、親ノードがその全ての子ノードから受信する隣接ノードリストの合計サイズは、親ノードを頂点とする部分木に属し、親ノードを除く全てのノードの隣接ノード数の総和 $X(n)$ と EL_{size} の積となる。以上より、 β_n を求めるためタスク 1 では $X(n)$ を収集する。なお、 $X(n)$ の値は各部分木によって一般に異なるが、その中で $X(n)$ が最も大きく REP の送信に時間を要する子ノードの REP 受信を収容するため収集する $X(n)$ は最大値とする。

(2)タスク 1 の処理手順

シンクは、予め与えられたスケジュール等に基づいてトポロジ情報を収集する要求が生じるとタスク 1 のための REQ を広報する。その際隣接ノードが送信した REQ の受信により各ノードは隣接ノード数を知る。タスク 1 では固定サイズの REP を用いその主な項目は、隣接ノード数の総和、(ホップ数 n , $X(n)$)の組のリスト、最大ホップ数となる。リスト内の組の数は、予め想定した最大ホップ数だけ設ける。シンクは受信した REP から取得した実際の最大ホップ数が予め想定した数より大きい場合、再度 REQ を広報して実際の最大ホップ数をノードに通知する。 $X(n)$ の値は、ホップ数 n の子ノードの親ノードが更新する。例えば、図 3 のネットワークポロジにおいてホップ数が 3 のノード A は、自身の隣接ノード数 4 と子ノードから受信した隣接ノードの総和 16 の和 20 を含む REP を親ノード C に送信する。ノード B も同様に和 12 を含む REP を C に送信する。親ノード C は、ホップ数が 3 の子ノード A, B からそれぞれ受信した隣接ノード数の総和から $X(3)$ を求め値を $(20+12)$ に更新する。子ノードよりもホップ数が大きい組の隣接ノード数の総和は、受信した複数リスト間で比較を行い最大値に更新する。このようにしてネットワーク内で $(n, X(n))$ の組のリストを更新しつつシンクまで伝達する。なお、タスク 1 では固定サイズの REP を用いそのサイズが伝送途中で変わらないことから送信タイミングは従来方式と同様とする。

(3)タスク 2 における送信タイミングの制御

タスク 2 の REP の主な項目は、隣接ノードリストとなる。隣接ノードリストは、(送信元ノード ID, その ID の隣接ノードの ID)の組のリストとなる。ホップ数 n の親ノードが受信する複数の REP 内の隣接ノードリストに含まれる組数は、本節(1)より高々 $X(n)$ となる。基本方針(4)に基づき、packets 損失率が大きいために全ての子ノードが隣接ノードリストを分割し、最小単位である 1 組ずつ REP に格納してそれらの親ノードに送信する場合

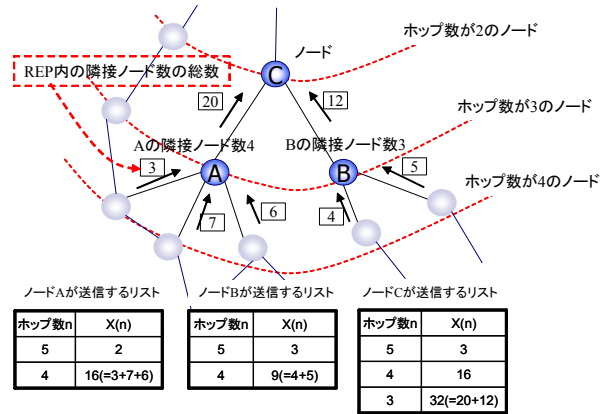


図 3 ネットワークポロジと各ノードが送信するリスト例

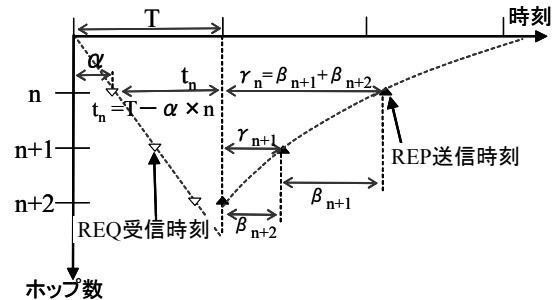


図 4 提案方式における REP の送信タイミングの制御例が最も長い β_n となる。また、その REP の数は隣接ノード数の総和 $X(n)$ となることから、その β_n は、最小単位の REP の送信に要する時間を t_{min} とすると $X(n) \times t_{min}$ で与えられる。

ホップ数が最大のノードからホップ数の小さいノードに向かって順に REP を送信し、ホップ k のノードが REP の送信に要する時間は β_k となる。ホップ数が n のノードにとって、最大ホップ数のノードからその子ノードまでのノードが REP を送信するために要する総時間は、最大ホップ数から自身の子ノードまでの β_k を積算した値 γ_n となる。例えば、図 4 のホップ数が n のノードにとって γ_n は、最大ホップ数 $n+2$ のノードの β_{n+2} とホップ数 $n+1$ であるその子ノードの β_{n+1} の和となる。シンクは、タスク 1 で収集した $X(n)$ から γ_n を求め、 (n, γ_n) の組のリストを含みタスク 2 の処理を要求する REQ を広報する。REQ を受信したホップ数 n のノードは、REQ の受信時刻から $t_n + \gamma_n$ 経過した後に親ノードに対する REP の送信を開始する。

(4)タスク 2 におけるデータの分割と再結合(基本方針(4))

各ノードが親ノードに向かって送信する REP は、親ノードのみならず無線チャネルを共有する隣接ノードも受信することになる。各ノードは無線チャネルの傍受により自身の隣接ノードリストを逐次更新する。packets 損失率が予め指定した値よりも大きければ隣接ノードリストを複数の REP に分割することで REP のサイズを小さくし packets 損失の発生確率を低減する。packets 損失率が小さければ REP のサイズを大きくする。packets 損失率は、受信した REP を用いて測定する簡易な方法等を用いる。例えば、送信した REP を親ノードが受信できたか否かを親ノードが送信した REP 内に自身が送信した隣接ノードリストが含まれているか否かによって判断し測定する。

4. まとめ

本稿では、センサネットワークのためのトポロジ情報を収集するための新たな方式を提案した。日頃ご指導いただき(株)KDDI 研究所 浅見所長に感謝する。

参考文献

- [1] Deepak Ganesan et al., Networking issues in wireless sensor networks, Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC), Vol.64, Issue 7, 2004.
- [2] B. Deb et al., "Multi-resolution State Retrieval in Sensor Networks," Proc. IEEE ICC the IEEE Int. Conf. on Communications (ICC), 2003.
- [3] I. Solis et al., The Impact of Timing in Data Aggregation for Sensor Networks, Proc. of the IEEE ICC, 2004.