

無線センサネットワークにおける 自律分散型ストレージ方式

大島 浩太^{†1} 大塚 英悟^{†2} 田島 孝治^{†2}
高田 治^{†3} 寺田 松昭^{†1}

本論文では、シンクノードを不要とする無線センサネットワークにおける、自律分散型ストレージ方式について述べる。無線センサネットワークは屋外に設置すると自然環境によりノードのダウン率が高くなる。データをシンクノードに集約するセンサネットワークでは、シンクノードの故障や電力不足により多くのデータが失われる。そこで、シンクノードを用いず、センシングデータを近隣センサノードに保存することでセンサノードのダウンによるデータ損失の影響を軽減させる。提案方式の特徴は、(1) 複数のセンサデバイスが搭載されたセンサノードを対象に、デバイス別に 2 ホップ以内に存在するセンサノードにデータを保存、(2) 保存方式に適したクエリおよびセンシングデータの収集方式による通信電力量の抑制である。提案方式を TinyOS 上に実装し、TOSSIM によりシミュレーション評価を行った。結果、ノードダウン時のデータ収集率を向上させながら、全体としての消費電力量の増加を抑制した。一般的なセンサネットワークとの比較では、データ収集率を 20% 向上させ、電力消費量の増加は 0.1% 程度に抑えられており、提案方式が有効であることを確認した。

Autonomous Distributed Storage System in Sink Node Less Wireless Sensor Networks

KOHTA OHSHIMA,^{†1} EIGO OHTSUKA,^{†2} KOJI TAJIMA,^{†2}
OSAMU TAKADA^{†3} and MATSUAKI TERADA^{†1}

In this paper, we describes about autonomous distributed storage system in sink node less wireless sensor networks. In sensor networks, data loss occurs by due to failure of the node. In particular, a sink node failure has a significant impact for data loss. Therefore, we propose a method to store the data distributed by the cooperation of sensor nodes. The proposed sensor network assumes the node equipped with multiple devices, and storing data according to the kind of devices. In order to suppress the increase of energy consumption of node, we propose a method about preserving data and transmitting query.

The simulation result showed the effectiveness of the proposed method.

1. はじめに

無線センサネットワークは、センサデバイスを備えた膨大な数の小型機器を実空間に配置し、細かな粒度で設置環境の状況を把握することができる。設置の容易さから適用範囲も広い。環境調査、農業応用、構造物管理、災害救援活動、ロボティクス、コンテキストウェア、流通管理など^{1),2)}、無線センサネットワークはこれからの社会にとって有用な様々な用途への利用が期待できる。無線センサネットワークは、膨大な数の超小型ノードが相互に無線通信して環境情報を収集する SmartDust³⁾ の提唱から始まり、これまでバッテリー駆動の端末における、電力消費量の低減に着目した様々なネットワーク技術の研究が行われてきた⁴⁾⁻⁶⁾。電力消費量の低減は、ネットワークの稼働時間向上につながるため、無線センサネットワークでは重要な課題である。

近年、無線通信技術や MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の発達により、無線機能を備えたセンサノードの小型化・低廉化が進んでいる⁷⁾。センサネットワークは多くのセンサノードを実空間に配置し、対象エリアの詳細な物理情報を測定できることが利点である。これまでは、多くのノードの配置は高コストであったが、低廉化の影響でコスト面での実現可能性が高まってきた。

センサノードは、通信・電源設備が整備されておらず、人間の常時立ち入りか難しい自然環境などの非生活圏に配置する必要がある。そのため、センサノードへの電力供給や、センサノード自体を回収することが難しく、センサノードはバッテリー駆動となる。そして、自然環境では天候などの自然現象に対する耐環境性がセンサノードに必要となる。また、センサノードがセンシングしたデータは、シンクノードと呼ばれるノードが収集し保存する。そのため、センサノード同様に、シンクノードへの電力供給や耐環境性も求められる。シンクノードに故障や電力不足が生じると保存したデータが損失する恐れがある。センサネット

^{†1} 東京農工大学大学院共生科学技術研究院
Institute of Symbiotic Science and Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology

^{†2} 東京農工大学大学院工学府
Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

^{†3} 株式会社日立製作所システム開発研究所
Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.

ワークによる環境モニタリングにおいて、自然現象によるシンクノードの故障や電力不足から、シンクノードに保存したデータを損失した事例が報告されている^{8),9)}。そのため、自然環境などセンサノードのダウン率が高い環境におけるセンサネットワークは、シンクノードがボトルネックになると考えられる。

そこで本論文では、シンクノードを用いることによるデータ損失の解消を目的とし、シンクノードが不要なセンサネットワークにおける自律分散型ストレージ方式を提案する。提案方式の特徴は次のとおりである。(1) データ保存：シンクノードにデータを保存せず、センシングしたデータをセンサノードに保存する。データの複製を他のセンサノードに保存することで、任意のセンサノードダウン時のデータ損失を抑制する。また、他のセンサノードに保存する際のトラフィックを低減することで電力消費量を抑制する。(2) データ収集：オンデマンドにデータ収集用のクエリを送信し、データを収集する。データを保持しているノードに対してクエリを効率的に転送することで、クエリ転送にともなうトラフィック量を低減する。

提案方式の適用先のセンサネットワークとして、リアルタイム性を必要としないアプリケーション、センサノードのメモリ容量は十分であることを仮定している。具体的には、森林や気象といった自然環境調査など、樹木に一定間隔でセンサノードを設置でき、頻繁にセンシングする必要がなく、雷などの外的要因によりセンサノードが故障しやすい場所での利用を想定している。メモリ容量については、ハードウェア技術の発達により解決可能な課題と考え、今回は対象としていない。

以下、2章では対象としている無線センサネットワークシステムの概要を説明し、3章でセンシングデータの自律分散ストレージ方式について述べる。4章で提案方式の実装および性能評価から提案方式の有効性を示す。5章で関連研究について述べ、6章でまとめる。

2. システム概要

提案システムの概要を図1に示す。システムは、無線通信機能および複数のセンサデバイスを搭載したセンサノードと、データ収集を任意のタイミングで行うモバイルノードの2種類で構成している。対象環境に設置したセンサノードが定期的にセンシングを行い、センシングデータをモバイルノードからの要求があるまで、センサノードで保存しておく。センシングデータが必要になった場合、モバイルノードを所持した人が最寄りのセンサノードにクエリを送信すると、センサノードが協調してモバイルノードにセンシングデータを送信する。そのため、災害検知などを目的とした用途ではなく、リアルタイム性を必要としない環

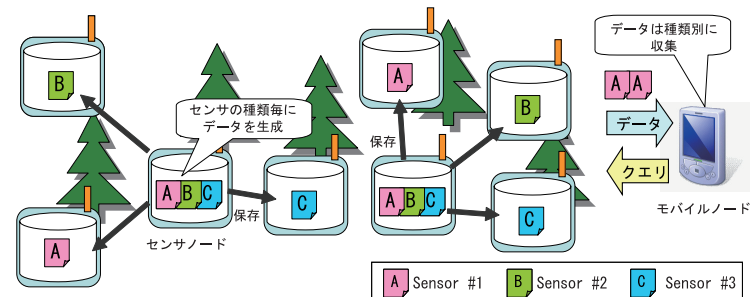


図1 提案システム概要

Fig. 1 Image of proposed sensor network.

境モニタリングを想定している。

山林などの自然環境に設置する場合、動物や自然災害、電力不足によりセンサノードのダウン率が大きくなることが予想される。センサノードにセンシングデータを蓄積するタイプのセンサネットワークは、要求があって初めてデータを要求元に送信するため、センサノードがダウンすると蓄積していたデータを取得することができなくなる。センサノードのダウンが判明すれば、直接センサノードからセンシングデータを取得できる場合もあるが、ダウン状況に依存する。特に、センサノード群からのセンシングデータを集約するシンクノードがダウンしてデータが失われると、被害が大きくなる。

提案システムでは、センサノードのダウンによるデータ損失を抑制するため、センシングデータの複製を近隣センサノードに保存する。他のセンサノードに保存することで、任意のセンサノードがダウンしても、近隣センサノードから、ダウンしたセンサノードがセンシングしていたデータをモバイルノードが取得することができる。しかし、センサネットワークは電力消費量を考慮する必要があるため、単純に近隣センサノードに複製を保存することは難しい。複製を保存するノード数、どのノードに保存するか、データ収集時の通信効率について電力消費量の観点から検討する必要がある。

本論文では、複数のセンサデバイスが搭載されたセンサノードの利用を想定している。これは、MEMS技術によるデバイスの小型化から複数のセンサデバイスが搭載しやすくなっている点、環境モニタリングなどの用途ではセンシングデータが多い方が環境変化などを詳細に調査できる点から妥当な想定であると考えている。そこで、複数のセンサデバイスが搭載されていることを利用し、センシングデータをセンサの種類別に異なるノードに保存す

る．種類別に保存することで，任意のセンサデバイスのセンシングデータの複製をセンサノードに集約することができる．センサネットワークでは，任意のノードがセンシングしたデータを“点”として取得したい場合と，設置エリア全体の情報を“面”で網羅的に取得したい場合がある．種類別に複製を保存することで，データ収集時に，特定のデータ種別を指定して収集する方法が可能となり，対象エリアの状況を俯瞰的に把握することが可能となる．

3. 自律分散型ストレージ方式

3.1 データ保存方式

3.1.1 NID と GID の割当て

センシングデータをセンサの種類別に近隣のセンサノードに保存するため，ノードのグループ分けを行う．グループ分けを行うにあたり，ノード ID とグループ ID の 2 種類を定義した．違いを以下に示す．

- (1) ノード ID (NID):
各センサノード固有の ID であり，0 から順番に割り当てる．
- (2) グループ ID (GID):
各ノードが保存するデータ種別を識別する ID．GID に対してセンサデバイス（温度センサ，湿度センサなど）を割り当てる．センサノードへの初期 GID の割当ては，NID とグループ数の剰余から決定する．本論文では省略しているが，グループ数に応じて 1 つのセンサノードに複数の GID 割り当てることによって，搭載センサデバイス数が増える状況に対応している．

NID と GID により，センサデバイスがセンシングしたデータの保存を担当するノードを決定した．しかし，保存対象のセンサノードまでのホップ数が多いと消費電力が増大する．そこで，自身の 2 ホップ以内のセンサノード群に多くの GID を割り当てるようにし，2 ホップ以内のノードにセンシングデータを保存できるようにネットワークを構成する．2 ホップとしたのは，1 ホップだけでは，通信電力は小さくなるがノード密度との関係で周囲に多くの GID を配置することが難しく，3 ホップ以上になると通信電力が多くなるためである．また，自身が直接通信できる隣接ノードと，隣接ノードの隣接ノードの情報を管理するだけで 2 ホップ先のセンサノードの NID と GID を把握することができるからである．

図 2 に，ノード ID が 1~22，グループ数が 4 (A, B, C, D) の場合 (4 種類のセンサデバイスが搭載されているケースに相当) に，2 ホップ以内に，より多くの GID を持つノードを配置した例を示す．各ノードは自身の 2 ホップ以内のノードに全種類の GID があり，

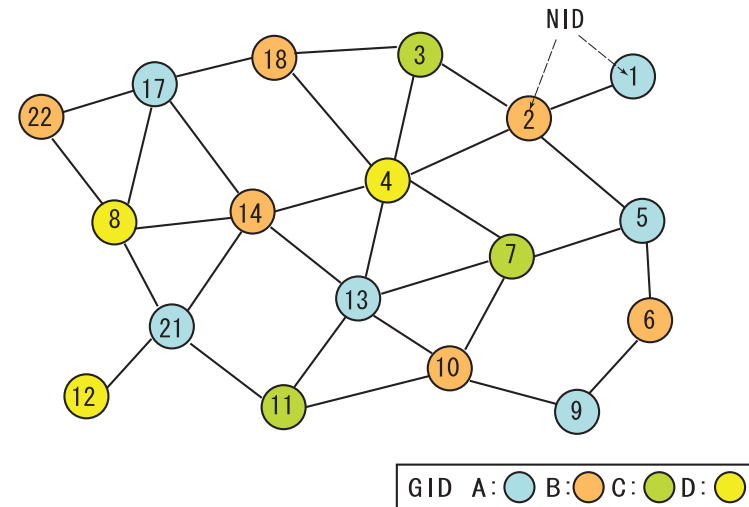


図 2 ノード ID とグループ ID によるセンサノードのグループ分け
Fig. 2 Image of node structure.

どこに送信すれば対象 GID を持つセンサノードに到達できるかを把握している．図 2 は理想的な状態であり，GID を考慮してセンサノードの配置場所を決定する必要がある．ランダムにセンサデバイスを配置することが難しく，またノードのダウンにより 2 ホップ以内に全種類の GID が存在しなくなる場合も考えられる．そのため，周囲の状況から動的に GID を変更できる必要がある．

3.1.2 近隣ノードの管理

2 ホップ以内のノードの状況を把握するため，近隣ノードの状況を把握する必要がある．本論文では，定期的に HELLO パケットをブロードキャストすることで周囲の状況を把握する方式をとった．HELLO パケットの内容を以下に示す．

- 自ノードの NID, GID
- 自身の隣接ノードの NID, GID, パケット受信率, パケット送信成功率

自身の隣接ノードすべての情報を記録しておくことで，受信者に 2 ホップ先のノードの情報を通知することができる．パケット受信率はリンク品質を知るために用い，2 ホップ先に同一 GID のノードが複数存在する場合はリンク品質を考慮して保存先を決定する．パケット受信率の測定は WMEWMA¹⁰⁾ を用いた．近隣ノードからのパケット受信率を HELLO

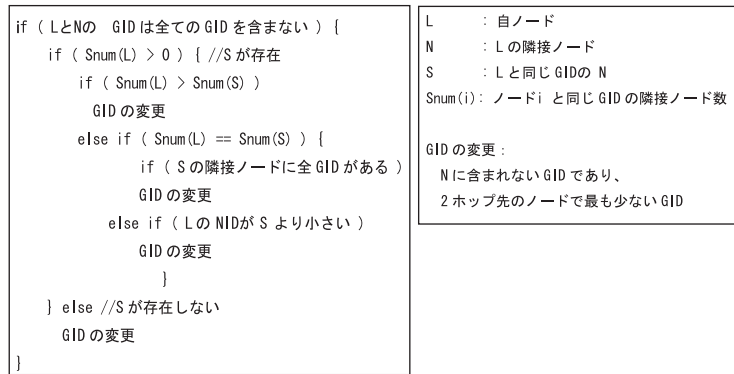


図 3 GID の動的変更
Fig. 3 A method of changing GID.

パケットに記録してブロードキャストすることで、それぞれのノードは自身が周囲のノードに対してどの程度のパケット送信成功率であるか判断することができる。このパケット送信成功率を、本論文ではリンク品質として用いている。また、隣接センサノードからのパケット送信成功率を HELLO パケットに記録することで、2ホップ先のノードまでのパケット送信成功率をそれぞれのノードは知ることができる。

3.1.3 GID の動的変更

周囲のセンサノードの状況から、GID を動的に変更する手順を図 3 に示す。自身の2ホップ以内にあるセンサノードの GID を定期的を確認し、この手順により自身の GID を変更する。センサネットワークの状況によっては頻繁な GID の変更処理が発生する。このようなケースでは変更回数に閾値を設け、閾値に達した時点で変更処理を停止する。

3.1.4 データの保存

センシングデータの保存方式を以下に示す。

- (1) 自身の2ホップ以内に存在する、保存対象の GID を持ったノードにセンシングデータを送信
- (2) 2ホップ先のノードが保存対象の場合、中継ノードにも複製を保存
- (3) GID 別に保存タイミングを変更
- (4) 2ホップ以内に保存対象の GID のノードがない場合は隣接ノードに保存を委任(隣接ノードの2ホップ以内の保存対象の GID に保存)

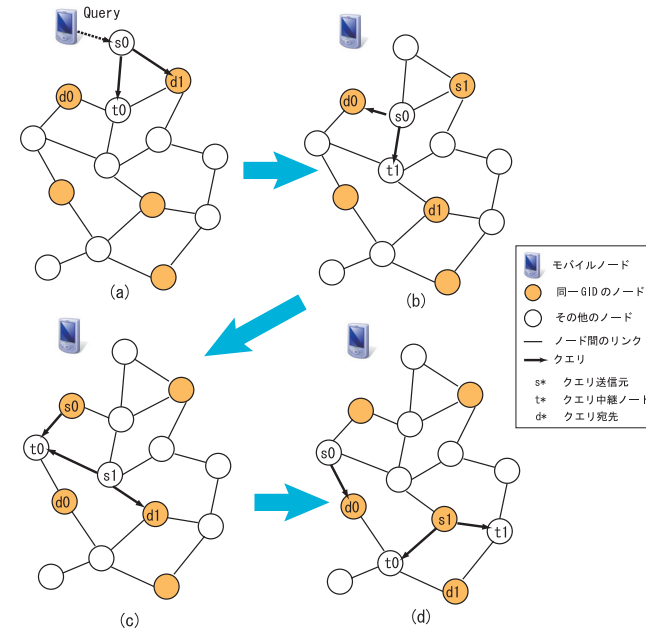


図 4 クエリ転送の概要
Fig. 4 Image of query flow.

(1)において、保存対象の GID が複数存在する場合は、リンク品質の高いセンサノードを保存対象として選択する。具体的には、自身から2ホップ先のセンサノードまでの経路となるリンクのリンク品質について、隣接ノードと2ホップ先のノードのリンク品質が一定の閾値以上を満たす経路が複数存在する場合、リンク品質の最も高い隣接ノードを含む経路を選択した。(4)における、委任対象の隣接ノードは、隣接ノードのうち最もリンク数の多いノードを選択する。隣接ノードのリンク数は、HELLO パケットから判別することができる。リンク数が同数の場合はリンク品質から選択する。

3.2 データ収集方式

前節で述べた方法に従ってデータ保存されているセンサネットワークにおける、データ収集の流れを図 4 に示す。(a)では、まずモバイルノードが近隣のセンサノードに対して、収集したいセンシングデータに対応する GID を指定したクエリを送信する。クエリを受信した s0 は、自身が管理している近隣ノードの情報から宛先を決定してクエリを送信する。こ

の場合の宛先は d0, d1 であり, t0 に d0 への中継を指示するクエリを, d1 に直接クエリを送信する. (b) では, (a) でクエリを受信したノードがクエリ送信元になる. s0 は, d0 と, t1 に d1 への中継を指示するクエリを送信する. s1 は 1 つ前のクエリの宛先になっているため送信しない. s1 は該当する GID を持つノードであり, 自身の 2 ホップ以内に同一 GID のノードがあればクエリを送信する. しかし, d0 はすでにクエリ送信の対象になっているため送信せず, クエリの終端としてモバイルノードにデータを転送する. (c) では, s0 が t0 に d0 への中継を指示するクエリを送信し, s1 は, d1 と, t0 に d0 への中継を指示するク

エリを送信する. (d) では, s0 は受信した 2 つのクエリを統合して d0 にクエリを送信する. s1 は, t0 に d0 への中継を指示するクエリと, t1 に d1 への中継を指示するクエリを送信する. d1 は t0 と t1 の 2 つのノードが中継できるが, リンク品質の高い方へクエリを送信する (図 4 は t1 > t0 の場合). もし, t0 の方がリンク品質が高いなら, t0 に d0 と d1 の 2 つを宛先としたクエリを送信する. この手順を繰り返すことで, 収集したいデータと同一の GID を持つノードに対して効率的にクエリ転送が行える.

クエリに含まれる情報を表 1 に示す. SRC, TRN, DST, RCV, GID, HOP の 6 種類のパラメータをクエリ内に記録し, 書き換えながら転送していく. 転送およびクエリ書き換えの流れを図 5 に示す. この手順で転送していくことで, RCV には指定 GID を持つセンサノードの NID リストが作られていく. クエリを転送できない状態になった指定 GID のセンサノードは, RCV に記録された NID リストを逆順に, HOP が小さい隣接ノードに対してデータを送信する. 同様に隣接ノードは, HOP が小さい隣接ノードにデータを送信することを繰り返し, モバイルノードにデータを届ける. HOP を用いることで, 最短経路でモバイルノードまでデータを転送することができる.

表 1 クエリの詳細

Table 1 Specifications of query information.

項目	説明
SRC NID	クエリの送信元ノードの NID
TRN NID	クエリの中継ノードの NID
DST NID	クエリの宛先ノードの NID
RCV NID	クエリを受信した指定 GID を持つノードの NID (該当する NID のすべてが記録)
GID	収集対象として指定されている GID
HOP	モバイルノードまでのホップ数. クエリ転送ごとにインクリメント

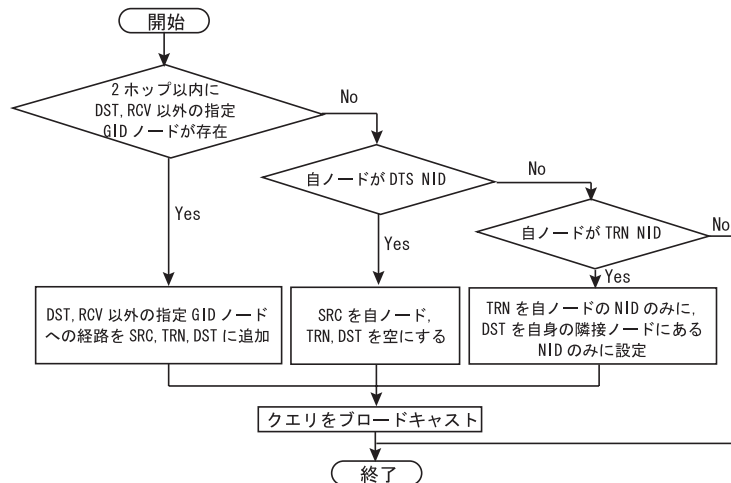


図 5 クエリ転送フロー

Fig. 5 Query flow of proposed sensor network.

4. 実装と評価

4.1 実装環境

提案方式を備えたシステムを TinyOS¹¹⁾ 上に実装した. 実装環境を表 2 に示す.

4.2 評価

提案方式と, 既存方式の比較評価を行った. 既存方式は, 自ノードのみにデータを保存し, クエリをフラッディングすることでデータを収集する方式を仮定した. クエリを受信したセンサノードからデータを収集する流れは提案手法と同様である. 受信したクエリの RCV NID に自身の ID を追記したものを再度ブロードキャストし, ブロードキャストできなくなった時点で, 自身のセンシングデータを RCV NID を逆順にユニキャストで送信してい

表 2 実装環境

Table 2 Environment of implementation.

項目	仕様
OS	Windows XP
開発言語	nesC
プラットフォーム	TinyOS
開発ツール	Cygwin, acv-gcc

表 3 電力消費モデル

Table 3 Energy consumption model.

項目	仕様
通信速度	40 kbps
最大通信距離	15 m
電圧	3 V
CPU Active	8.0 mA
CPU Idle	3.2 mA
Radio Rx	7.0 mA
Radio Tx	17.4 mA

表 4 シミュレーション条件

Table 4 Specifications of simulation.

項目	仕様
ノード数	50, 100, 150, 200 個
ノード密度	0.04 個/m ²
データ種類	4 種 (A, B, C, D)
パケット再送回数	上限 10 回
パケットサイズ	36 Byte
シミュレーション時間	1,800 秒
データ保存時刻	1 回目: 300, 320, 340, 360 秒 2 回目: 700, 720, 740, 760 秒 3 回目: 1,100, 1,120, 1,140, 1,160 秒 4 回目: 1,500, 1,520, 1,540, 1,560 秒
クエリ送信時刻	1,600 秒 (データ種類 A を収集)
ノードダウン率	0, 5, 10, 15%

く、クエリのブロードキャストの可否は、提案方式と同様に HELLO パケットで確認している近隣ノードすべてからブロードキャストを受信した場合としている。データの生成量や生成時刻、クエリの送信時刻は提案手法と既存手法は同一である。評価は、TinyOS 用シミュレータ TOSSIM¹²⁾ を用いた。センサノードの消費電力モデルは PowerTOSSIM¹³⁾ を利用している (表 3)。

シミュレーションで設定したパラメータを表 4 に示す。ノード密度は、予備実験の結果から 0.04 個/m² に設定した。0.02 の場合は隣接ノードが少なく、データ収集率が既存手法の方が高くなり、0.04 からデータ収集率に優位性が見られたことが理由である。また、ノード密度 0.04 では、ノードどうしの間隔は約 10 m 程度になり、最大通信距離 15 m を考慮しても十分通信可能である。ノードダウン率は、ランダムに選択されたノードがダウンする割

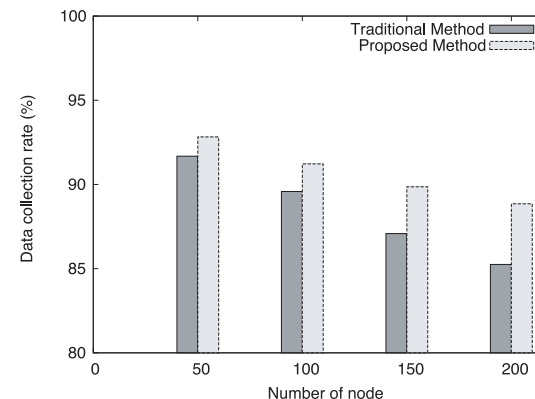


図 6 ノード数別・データ収集率 (ノードダウンなし)

Fig. 6 Data collection rate by the number of nodes.

合である。シミュレーションのエリアサイズは、ノード数とノード密度から算出している。ノード数 100、ノード密度 0.04 の場合は、面積 2,500 m²、50 m × 50 m の正方形のエリアになる。本論文で述べた方式を備えたセンサネットワークの適用先として我々が考えているのは、森林などの自然環境モニタリングである。この環境では、樹木にセンサノードを付けることで、センサノードを密に配置することが可能である。また、雷などの外的要因によりセンサノードのダウン率が高くなることを想定し、ダウン率は 0 ~ 15% の間で変化させた。

上記の環境において、ノード数別データ収集率、ノードダウン率別データ収集率、送受信パケット数、電力消費量に関する評価を行った。データ収集率は、提案する分散ストレージ方式の有効性の確認を目的としている。ノードのダウンがない状態で GID によるデータ収集方式の効果を示す。送受信パケット数は、電力消費量に大きな影響を与える通信電力量を測る指標としている。他のノードに保存することで生じるトラヒックを、他の通信におけるトラヒックでどの程度軽減できるかを示す。電力消費量は、センサネットワークの稼働時間に対する評価指標である。ノードのダウンがない条件下における既存方式との電力消費量の差と、ノードのダウンが発生する条件下での消費電力の変化から、分散ストレージ方式が有効であることを示す。

4.3 データ収集率

ノード数を 50 ~ 200 の間で変化させた際の既存手法と提案手法のデータ収集率を図 6 に

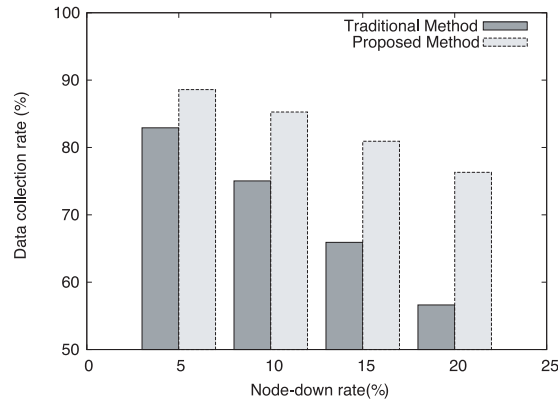


図 7 ノードダウン率別・データ収集率 (ノード数: 100)
Fig. 7 Data collection rate by the node down rate.

示す．ノードのダウン率は 0% に設定している．提案手法は 88% 以上のデータ収集率になり，既存手法より最大 4% 以上高くなった．ノードのダウンによるデータ損失がない状態であるため収集率の差は小さいが，GID による収集率向上効果が確認できた．ノード数の増加にともなってデータ収集率が低下している理由は，コネクションレス型通信によるパケットロスが原因である．ノード数に比例してネットワーク全体を流れるパケット数が増加し，パケットロスの影響を受けるクエリ数が増加したためと考えられる．パケットロスの影響は，コネクション型通信による確実な通信で緩和できると考えられる¹⁴⁾．

ノード数を 100 に固定し，ノードダウン率を 5~20% の間で変化させたときのデータ収集率を図 7 に示す．提案手法のデータ収集率は，既存手法より最大で 20% 高くなった．ノードダウン率が高くなるほど，既存手法と提案手法のデータ収集率の差が増加していることが分かる．この結果から，近隣センサノードに保存することにより，ノードのダウンに起因するセンシングデータの損失を抑制する効果があることが分かった．

4.4 送受信パケット数

ノード数を 50~200 の間で変化させた際の送受信パケット数の違いを表 5 に示す．表におけるパケット数は 1 ノードあたりの平均値である．ノードダウン率は 0% に設定している．クエリとデータ (収集時) は提案方式の方が少なく，通信電力量を低減できていることが分かる．特にクエリについては，20% 以上少なくなっており，指定 GID のノードに対して効率的にクエリ転送できていることを示している．ノード数の増加に比例してデータ (収

表 5 送受信パケット数 (ノード数別)

Table 5 Number of transmitted packet by the number of nodes.

ノード数	データ種別	既存方式 (個)	提案方式 (個)	減少率 (%)
50	クエリ	38.75	27.19	29.8
	データ (収集時)	65.68	60.66	7.6
	データ (保存時)	0	45.10	-
100	クエリ	39.41	29.34	25.5
	データ (収集時)	100.21	93.19	7.0
	データ (保存時)	0	45.30	-
150	クエリ	40.37	30.46	24.6
	データ (収集時)	124.83	112.89	9.6
	データ (保存時)	0	45.21	-
200	クエリ	40.54	30.63	24.4
	データ (収集時)	146.29	137.35	6.1
	データ (保存時)	0	44.76	-

表 6 送受信パケット数 (ノードダウン率別)

Table 6 Number of transmitted packet by the node down rate.

ノードダウン率 (%)	データ種別	既存方式 (個)	提案方式 (個)	減少率 (%)
5	クエリ	36.04	26.76	25.7
	データ (収集時)	93.13	89.41	4.0
	データ (保存時)	0	47.52	-
10	クエリ	32.77	25.37	22.6
	データ (収集時)	87.24	84.56	3.1
	データ (保存時)	0	49.94	-
15	クエリ	29.46	21.20	28.0
	データ (収集時)	83.47	81.81	2.0
	データ (保存時)	0	52.18	-
20	クエリ	25.86	17.60	31.9
	データ (収集時)	79.87	78.21	2.1
	データ (保存時)	0	54.78	-

集時) の送受信パケット数が増加しているのは，データの転送ホップ数が増加するためである．提案手法は，既存手法にはない他のセンサノードへのデータ保存のためのトラヒックが生じるが，その他の部分でトラヒック量を低減できている．

次に，ノード数を 100 に固定し，ノードダウン率を 5~20% の間で変化させたときの送受信パケット数の違いを表 6 に示す．表におけるパケット数は 1 ノードあたりの平均値である．

クエリは，既存方式に比べ提案方式は 20% 以上の減少率を示している．そのため，ノー

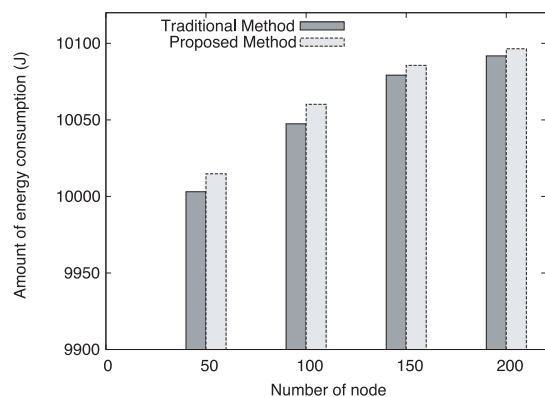


図 8 ノード数別・消費電力量（ノードダウンなし）

Fig. 8 Amount of energy consumption by the number of nodes.

ドダウン率が増加しても既存方式より効率的なクエリ転送ができておりといえる。

4.5 電力消費量

ノード数を 50~200 の間で変化させた際の電力消費量を図 8 に示す。図における消費電力量は 1 ノードあたりの平均値で、ノードダウン率は 0% に設定している。ノード数に比例して消費電力量が増加しているのは、データ収集時のセンシングデータの転送ホップ数が増加することにより通信電力量が増加したためである。提案手法と既存手法の電力消費量を比べると、提案手法の方が約 0.1% 多い。これは、データ保存のためのトラフィックが生じるためである。しかし、クエリおよびデータ収集時のパケット送受信数が既存手法に比べて少ない（表 5）点と、2 ホップ以内のノードにセンシングデータを保存することによるトラフィック量の低減から、0.1% 程度の増加にとどまっている。そのため、データ収集率を高めながら電力消費量を抑制できており、実用に耐えうる性能を示しているといえる。

次に、ノード数を 100 に固定し、ノードダウン率を 5~20% の間で変化させた際の電力消費量を図 9 に示す。ノードダウン率が増加するとともに電力消費量が減少しているのは、クエリやデータ収集時のトラフィックはノード数に比例し、ノードのダウンにより総ノード数が減少するためである。既存方式と提案方式の電力消費量を比べると、電力消費量はノードダウン率にかかわらず約 0.1% の増大にとどまっていた。そのため、ノードダウン率の変化による電力消費量の大幅な変化はないことから、データ収集率と電力消費量の関係は安定しており、提案方式は実用に耐えうる性能を示しているといえる。

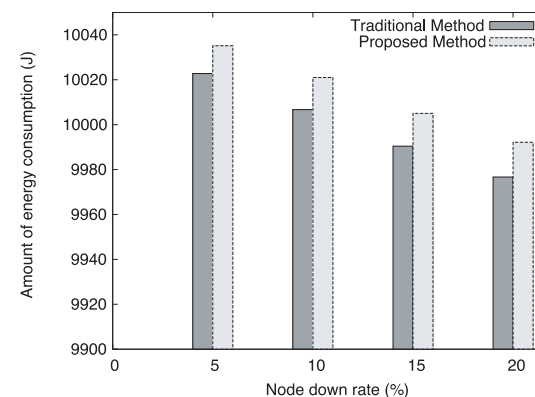


図 9 ノードダウン率別・消費電力量

Fig. 9 Amount of energy consumption by the node down rate.

4.6 考 察

提案方式の長期的シミュレーションを考えた場合、ノードのダウンによりノード密度が減少することが考えられる。特に、雷などの外的要因により同時に複数のセンサノードがダウンすると、ノード密度は急に減少することになる。予備実験の結果から、センサノード敷設時にノード密度が 0.02 の場合、データ収集率は提案方式より既存方式の方が高いことを確認している。この結果から、ノード密度の減少により、提案方式のデータ収集効果は低減されていくと考えられる。しかし、分散ストレージ方式により、ノードがダウンするまでのデータは他のノードに保存されているため、データ収集時にはダウンしているノードのデータも収集できる。したがって、ノード密度が 0.02 まで減った時点で、即座にデータ収集率が既存方式より低くなることはない。ただし、ノード密度が 0.02 まで低下した状態で生存しているセンサノードが、分散ストレージ方式によるデータの保存を実施した場合は、既存方式よりデータ収集率が低下することが考えられる。外的要因による複数ノードの同時ダウンの抑制は難しいため、ダウンが発生したと思われる場合は設置台数を増やすなどの運用面での対応が必要になると考えられる。

次に、表 5 および表 6 で示した送受信パケットの低減数において、消費電力量が 0.1% に収まっている理由に、送信電力量 (17.4 mA) と受信電力 (7.0 mA) の違いがあげられる。既存方式と提案方式のクエリ伝送は、任意のノードから送信と受信を繰り返してネットワーク全体に伝搬される。提案方式は、NID と GID により送信する必要のないノードにはクエ

りを伝送しないため、既存方式に比べ送信回数が少なくなるものと考えられる。

評価の結果から、提案方式は既存方式に比べ電力消費量が0.1%増加しているが、ノードダウン時のデータ収集率が既存方式より有効であることが分かる。しかし、この効果は複数のセンサを備えたセンサノードから、特定の種類のデータを収集するという本論文の前提条件から、伝送するクエリの無駄を低減できることで得られるものである。そのため、前提条件によってはフラッシングを用いる既存方式の方が適している場合もあると考える。

5. 関連研究

同じ名前を持ったデータすべてを同じセンサノードに保存するデータセントリックストレージ方式が提案されている¹⁵⁾。この方式では、ユーザがデータを収集する際には、データ内容を指定し、そのデータを保存しているノードから収集する。そのため、センシングしたセンサノード自身にデータを保存するローカルストレージ方式とは異なり、すべてのセンサノードにクエリを送信する必要がなく、省電力の面で優れている。本論文における提案方式は、近隣のセンサノードの状況から動的にデータの保存先を変更している。また、クエリ伝送効率を考慮した保存方式にすることで、消費電力量の増加を抑えている。

データセントリック方式におけるルーティング方式として、GEM¹⁶⁾、BVR¹⁷⁾が提案されている。GEMは、センサノードの位置情報を用いないルーティング方式である。任意の1ノードをルートとするツリー構造のグラフを形成し、ツリーを基に各センサノードに極座標系の仮想座標を付与する点が特徴である。センサノードの位置情報を利用しないため、位置情報を取得するための位置推定手法やGPSなどの装置を必要としない。そのため、センサノードは屋内外問わず設置可能であるという利点がある。しかし、ルート付近へのトラフィック集中や、親ノードがダウンしてしまうとデータを中継することができなくなり、新たにツリーを構築する必要がある。BVRは、GEM同様にセンサノードの位置情報を用いないルーティング方式である。任意の複数のセンサノード(ビーコンノード)までのホップ数を仮想座標とし、その仮想座標をルーティングのメトリックとして利用する点が特徴である。GEM同様に位置推定を必要としないという利点のほかに、ビーコンノードはパケットをブロードキャストするだけなので、GEMと比較するとトラフィックの負荷分散性が高いという利点がある。しかし、複数のビーコンノードからパケットをフラッシングするため、仮想座標を取得する際のトラフィック量がビーコンノード数に比例して増加する。また、ビーコンノードはランダムに選択されるため、ビーコンノードの位置に偏りが生じるとルーティングがうまく機能しない場合がある。GEMとBVRは、他のノードにデータを保存する際

の通信成功率を重視している。電力消費量については議論されていない。本論文の提案方式は、他のノードへのデータ保存により生じる電力消費に着目し、クエリ伝送時の無駄を低減させることに主眼を置いている。そのため、これらの研究とは対象としている課題設定が異なる。

センサノードにデータを分散保存するストレージシステムにEnviroStore¹⁸⁾がある。EnviroStoreは、センサノードとモバイルノード、シンクノードで構成されている。センサノードは、隣接センサノード間でストレージとバッテリー残量を交換し、閾値に従ってデータを分散保持する。モバイルノードはセンサノードの敷設されたエリアを移動し、移動中に周囲のセンサノードからデータを受信し、シンクノードにデータを届ける。モバイルノードが直接データを収集するため、シンクノードまでの転送にかかるトラフィックを抑制できる。各センサノードでデータの生成量が異なる場合において、各センサノードのストレージの利用効率を向上させることができる。しかし、モバイルノードはセンサノードの近辺を移動しなければデータ収集ができずデータ収集量に課題がある。本論文の提案方式は、クエリを任意のタイミングで発行してデータ収集を行っている。

6. まとめ

本論文では、シンクノードを用いることによるデータ損失の解消を目的とした、シンクノード不要のセンサネットワークにおける自律分散型ストレージ方式を提案した。センシングデータを複数のグループに分けて他のノードに保存する方式、グループ単位でのデータ収集方式を提案した。他のノードにデータを保存する際のトラフィックが生じるが、保存方式に適したクエリおよびセンシングデータ転送により消費電力量の増加を抑制している点が特徴である。提案方式を備えたシステムをTinyOS上に実装し、シミュレーションツール：TOSSIMで評価を行った。評価の結果、センサノード自身にデータを保存し、データ収集をフラッシングで行う方式に比べ、0.1%の消費電力量の増加で、88%以上の高いデータ収集率を実現できていることを確認した。今後の課題として、センシングデータのストレージへの書き込み、読み出し時に遅延書き込みなどを適用することによって、ストレージの増加により生じるコスト上昇に対応することなどがあげられる。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金若手研究(B)21700069の助成を受けている。

参 考 文 献

- 1) Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E.: A survey on sensor networks, *IEEE Communications Magazine*, Vol.40, No.8, pp.102–114 (2002).
- 2) Harta, J.K. and Martinez, K.: Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science?, *Earth-Science Reviews*, Vol.78, No.3 (2006).
- 3) Kahn, J.M., Katz, R.H. and Pister, K.S.J.: Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust, *Proc. 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Seattle, Washington, USA, pp.271–278 (1999).
- 4) Heinzelman, W.R.: An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks, *IEEE Trans. Wireless Communications* (2002).
- 5) Stemphanie, L.: PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems, *IEEE Aerospace Conference*, pp.3-1125–3-1130 (2002).
- 6) Ratnasamy, S., Karp, B., Yin, L., Yu, F., Estrin, D., Govindan, R. and Shenker, S.: GHT: A geographic hash table for data-centric storage, *Proc. 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, pp.78–87, ACM Press (2002).
- 7) Mote: Crossbow Technology. <http://www.xbow.jp/motemica.html>
- 8) Werner-Allen, G., Lorincz, K., Welsh, M., Marcillo, O., Johnson, J., Ruiz, M. and Lees, J.: Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano, *IEEE Internet Computing*, Vol.10, No.2, pp.18–25 (2006).
- 9) Martinez, K., Padhy, P., Elsaify, A., Zou, G., Riddoch, A., Hart, J. and Ong, H.: Deploying a Sensor Network in an Extreme Environment, *International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous and Trustworthy Computing*, Vol.1, pp.186–193 (2006).
- 10) Woo, A., Tong, T. and Culler, D.: Taming the Underlying Challenges of Reliable Multihop Routing in Sensor Networks, *SenSys2003: Proc. 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.14–27, ACM Press (2003).
- 11) TinyOS. <http://www.tinyos.net/>
- 12) Levis, P., Lee, N., Welsh, M. and Culler, D.: TOSSIM: Accurate and scalable simulation of entire tinyos applications, *SenSys2003: Proc. 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.126–137, ACM Press (2003).
- 13) Shnayder, V., Hempstead, M., Chen, B., Allen, G.W. and Welsh, M.: Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications, *SenSys2004: Proc. 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.188–200, ACM Press (2004).
- 14) Ahn, J., Kapadia, S., Patten, S., Sridharan, A., Zuniga, M., Jun, J.-H., Avin, C.

and Krishnamachari, B.: Empirical evaluation of querying mechanisms for unstructured wireless sensor networks, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol.38, No.3, pp.17–26 (2008).

- 15) Shenker, S., Ratnasamy, S., Karp, B., Govindan, R. and Estrin, D.: Data-Centric Storage in Sensor Networks, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol.33, pp.137–142 (2002).
- 16) Newsome, J. and Song, D.: GEM: Graph Embedding for Routing and Data-Centric Storage in Sensor Networks without Geographic Information, *Proc. 1st ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '03)*, pp.76–88 (2003).
- 17) Fonseca, R., Ratnasamy, S., Zhao, J., Ee, C.T., Culler, D., Shenker, S. and Stoica, I.: Beacon vector routing: Scalable point-to-point routing in wireless sensor networks, *NSDI'05: Proc. 2nd Conference on Symposium on Networked Systems Design & Implementation*, Berkeley, CA, USA, USENIX Association, pp.329–342 (2005).
- 18) Luo, L., Huang, C. and Abdelzaher, T.: Envirostore: A cooperative storage system for disconnected operation in sensor networks, *INFOCOM 2007: Proc. 26th IEEE International Conference on Computer Communications* (2007).

(平成 21 年 5 月 25 日受付)

(平成 21 年 12 月 17 日採録)



大島 浩太 (正会員)

平成 15 年東京農工大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士前期課程修了。平成 18 年東京農工大学大学院工学教育部電子情報工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。現在、東京農工大学大学院共生科学技術研究院助教。センサネットワーク、オーバーレイネットワーク、VoIP 等の研究に従事。新世代ネットワークに興味を持つ。電子情報通信学会会員。

大塚 英悟

平成 19 年東京農工大学工学部情報コミュニケーション工学科卒業。平成 21 年東京農工大学大学院工学府情報コミュニケーション工学専攻博士前期課程修了。同年横河電機株式会社入社。在学中センサネットワークの研究に従事。



田島 孝治 (学生会員)

平成 18 年東京農工大学大学院情報コミュニケーション工学専攻博士前期課程修了。同年東京農工大学大学院工学府電子情報工学専攻博士後期課程進学。現在同大学院工学府電子情報工学専攻博士後期課程在学中。位置情報応用システム、オーバレイネットワーク等の研究に従事。電子情報通信学会会員。



高田 治

北海道大学大学院情報工学専攻修士課程修了，1979 年日立製作所に入社，システム開発研究所に所属し現在に至る。広域/ローカルネットワークシステムおよび ITS 応用の研究開発に従事。



寺田 松昭 (正会員)

1970 年岡山大学工学部電気工学科卒業。同年 (株) 日立製作所入社。同社システム開発研究所において，制御用分散処理システム，LAN，プロトコル高速処理，VoIP，次世代インターネットの研究に従事。工学博士。著書『制御用計算機におけるリアルタイム技術』(共著，コロナ社)，『デジタルサービス革命』(共著，日刊工業新聞社)。1999 年 4 月より東京農工大学工学部情報コミュニケーション工学科教授。センサネットワーク，位置情報応用システム，新世代ネットワーク等に興味を持つ。同大学総合情報メディアセンター長を兼務 (2003 年 4 月～2007 年 7 月)，現在，同大学大学院共生科学技術研究院教授 (工学部情報工学科，CIO 補佐を兼務)。IEEE，ACM，電子情報通信学会各会員。