

短距離リンクと長距離リンクを相補的に用いる 無線センサネットワーク方式の検討

大島 浩太[†] 安藤 公彦^{††}

[†] 埼玉工業大学 工学部, 埼玉県

^{††} 東京工科大学 メディア学部, 東京都

あらまし 人間の頻繁な立ち入りや電源設備, ネットワーク環境の整備などが難しい山野の幅広い環境情報を取得するために無線センサネットワークを構築する場合, バッテリ駆動の無線センサノードが連携し, 計測データを Sink ノードにパケットをマルチホップ通信で中継・伝達するメッシュやクラスタツリー構成がよく用いられる. この構成では, ノード障害による伝送性能の低下, 環境状況の変化による通信効率の変動, 計測情報の欠落などの障害への対応が求められる. しかし, 短距離リンクのみで構成した場合は, 物理的な電波の伝搬距離の制約により不十分な対応に留まる. 本論文では, 3G データ通信が安価に利用可能になってきた背景を受け, 短距離リンクで構成したメッシュ接続の無線センサネットワーク中に, 3G データ通信による長距離リンクも利用可能な無線センサノード (ハイブリッドノード) を複数台配置することで, 生存ノードの検出率を向上させる方式について述べる. 提案方式のシミュレーション評価を行い, 障害発生時の生存ノード検出率がハイブリッドノード未使用時に比べて 10~40% 向上可能である見通しを得た. また, 時間経過に対する検出率の変化, ハイブリッドノードの配置による性能の違いを示した.

キーワード 無線センサネットワーク, 環境モニタリング, 長距離リンク, 障害検知, 生存ノード検出

Wireless Sensor Network by Complementary Use of Short and Long Distance Link

Kohta OHSHIMA[†] and Kimihiko ANDO^{††}

[†] Saitama Institute of Technology, 1690 Fusaiji, Fukaya-shi, Saitama, 369-0293 Japan

^{††} Tokyo University of Technology, 1404-1 Katakura, Hachioji-shi, Tokyo, 192-0914 Japan

Abstract Environmental monitoring by using wireless sensor network is attracting the attention of usefulness about low running cost and can measure detailed wide area environmental information. However, wireless sensor network has a problem about ability of detecting survival nodes, because of basic wireless sensor network is constructed by short distance wireless link such as IEEE802.15.4/802.11. In this paper, we propose survival node detecting method by using hybrid node into some part of wireless sensor network that constructed by short distance wireless link. The hybrid node is a node that can connect both of short distance wireless link and long distance wireless link such as 3G. We evaluated proposed method in some node placement cases, and showed effectiveness.

Key words Wireless Sensor Network, Environmental Monitoring, Long-distance Link, Corrective Action

1. ま え が き

無線センサネットワークは, 小型端末 (無線センサノード) が相互に連携しながら, 計測した環境情報をシンクノードに集約する形態が一般的である. そのため, ネットワークや電源インフラの整備されていない環境に柔軟に設置できる, 人力でのデータ回収に危険を伴う場所の計測データを安全に確認できる

などの特徴を備えている. しかし, この場合は無線センサノードはバッテリー駆動になるため, 連続稼働時間の延長を目的とした省電力化や, 大規模化した際のノード故障の検知といった運用面での検討が必要になる. これまでに, 省電力化や効率的なデータ収集を目的とした, トポロジ最適化, ライフタイムの向上が可能なルーティング, 無線出力調整, Duty Cycle の最適化などに着目した様々な研究がなされている. これらの技術によ

り消費電力量は低減可能だが、適用先が限定される技術も多い。さらに、耐障害性などの運用面で求められる機能に着目したものは少ない。ノードの正確な故障箇所の検知と現在稼働しているノードの情報把握は、無線センサネットワークがモニタリングできている場所を把握することに直接つながるため、実際に無線センサネットワークを運用する上では非常に重要である。

無線センサネットワークでは、これまでに様々な方式提案がなされているが、利用目的により要求条件は千差万別である。環境モニタリングに無線センサネットワークを利用している研究事例に、公園と大学キャンパスにおける実験 [1]、火山 [2]、氷河 [3]、永久凍土 [4]、野生動物の観察 [5] や監視 [6] などがある。これらはいずれも、提案された様々な方式の利用よりも、対象環境において確実な計測と通信が実施できることが優先され、利用可能な無線メディアや機器の耐環境性を考慮し、それぞれの観測対象に適したものが利用されている。したがって、無線センサネットワークは、どのような環境と対象をどの程度の期間計測するかといった要求条件により、通信性能や運用効率化などの技術に求められる要件が大きく変化する。

本論文における無線センサネットワークの想定適用先として、主に人が頻繁に立ち入ることが難しいエリアの情報を、ノード障害に起因するデータの欠落を可能な限り抑制した状態で取得可能な自然環境モニタリングを想定する。具体的には、環境動態解析などで利用可能なデータ収集が目的である。自然環境には電源やアクセスポイントなどの設備の設置ができない場合が多く、バッテリー駆動の無線センサノード群のマルチホップ通信により Sink ノードに計測データを伝達する構成になる。この構成には、電波の伝搬範囲を考慮した十分なノード台数を設置するためのコスト、ノード障害により Sink ノードまでの計測データの伝達経路が無くなるといった課題がある。そのため、無線センサノードはバッテリー駆動になり、かつ短距離リンクを用いたマルチホップ通信を利用することになるが、障害により経路が失われる、計測データの欠落防止、コスト抑制などが考慮すべき課題になる。

そこで本論文では、安価なマイクロコントローラで 3G データ通信を可能にする製品 [7] が近年登場している背景を受け、短距離リンクで構成したメッシュ接続の無線センサネットワーク中に、3G データ通信による長距離リンクも利用可能な無線センサノード (ハイブリッドノード) を複数台配置することで、生存ノードの検出率を向上させる方式を提案する。長距離リンクの導入により、Sink ノードと一部の遠方ノードの直接的な通信が可能となり、従来の短距離リンクのみで構成したメッシュネットワークに比べて運用面での利便性向上効果が期待できる。特に本論文では、我々が想定する無線センサネットワークの諸条件におけるノード障害や障害発生エリアの検知、長距離リンクを併用した場合の効果検証を行う。

2. 想定する自然環境モニタリングと課題

環境動態解析などに利用可能な環境情報の計測を目的とした自然環境モニタリングでは、同一地点の環境情報を定期的かつ長期的な計測が可能であることが求められる。また、ノード障

害によるデータの欠落を可能な限り抑制する必要がある。

我々が想定する無線センサネットワークの要件定義について、設置者側とネットワーク性能に分類して述べる。

まず、設置者側については、人が頻繁に立ち入ることの難しいエリアの情報を遠隔地から安全に把握したい、計測したい地点が決まっている (意味のある環境情報を計測可能な代表性のある場所が存在)、導入・運用コストを可能な限り減らしたい、ノードの障害を速やかに検知し計測データの欠落期間を最小化したいというニーズがある。

次に、ネットワーク性能については、電源や Wi-Fi AP などのインフラが存在しないため、バッテリー駆動の無線センサノードを用いて、IEEE802.11, IEEE802.15.4 などの中距離・短距離通信を利用したマルチホップ通信で Sink ノードにデータを届けるネットワーク構成になる。この構成では、バッテリーの枯渇やノード故障に代表される障害により、Sink ノードまでの経路が失われ Sink ノードに計測データが届かなくなるといった、ネットワーク構成と利用する無線の伝搬距離上の課題がある。

以上の要件定義を考慮して、我々の想定する自然環境モニタリング用途の無線センサネットワークの概要は次のようになる。

- ノードは基本的に不規則に配置され、マルチホップ通信の保証ができるほどの高密度設置は行わない
- ノードにはストレージを搭載し、計測情報を伝送できない場合は自身に蓄積
- ノード障害の検知と、障害箇所・内容の把握が可能な情報の設置者への提供
- ノードの位置情報の把握と時刻の同期

これらの要件を満たすことが可能な無線センサネットワークの基本設計について、以下に述べる。

3. 提案無線センサネットワーク

3.1 ネットワーク構成

本研究における無線センサネットワークの要件と、安価なマイクロコントローラで 3G データ通信の利用が可能になってきている背景を受けた提案する無線センサネットワーク構成を図 1 に示す。提案無線センサネットワークは 3 種類のノードで構成している。IEEE802.11 や 802.15.4 といった短距離無線通信とインターネットへの接続機能を備え管理者まで各ノードの計測情報を伝達する Sink ノード、短距離無線通信のみを利用可能な一般ノード、短距離無線通信と 3G データ通信などの長距離無線通信の両方が利用可能なハイブリッドノードである。各ノードが計測した環境情報は、一般ノードおよびハイブリッドノードの短距離リンクで構成したアドホックネットワークを用いて Sink ノードまでマルチホップで伝達する。本論文において、ハイブリッドノードの備える長距離リンクは、生存ノード情報の管理者への通知と、障害発生を当該箇所周辺のノードに通知する目的で利用する。周辺ノードへの通知は、まず管理者からハイブリッドノードに長距離リンクを用いて指示し、その後短距離リンクを用いたブロードキャストで行う。ノード障害により任意のノードから Sink ノードまでの経路が失われてしまった場合、マルチホップ通信ではノードの生存情報そのもの

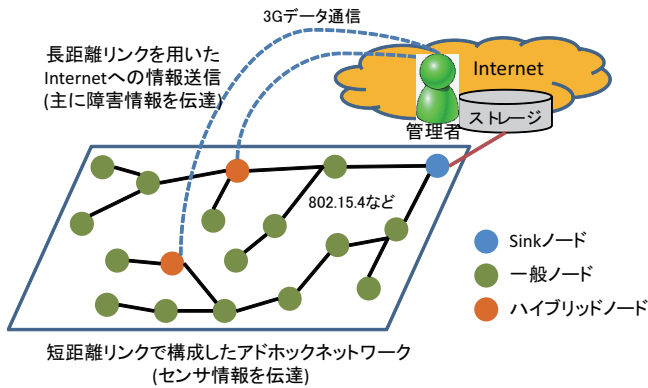


図 1 想定する無線センサネットワーク構成
Fig.1 Proposed Wireless Sensor Network Model

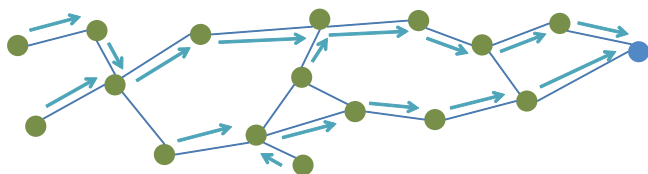


図 2 通常状態 (ノードのダウン無し)
Fig.2 Initial topology of ad-hoc connection.

を管理者に伝達できない場合がある。そのため、長距離リンクの導入により、確実な通信手段で管理者に情報を伝達することが可能になる。このような利点があるなら、全てのノードを 3G データ通信が可能なノードで構成することで経路の不安定性が情報伝達に与える影響を緩和可能であると考えられる。しかし、消費電力量、ノードの 1 台あたりの導入コスト、キャリアにより提供される 3G データ通信網の維持コストといった問題があり、全ノードへの適用は現実的ではない。そのため、一般ノードで構成する短距離メッシュネットワーク内に、数台のハイブリッドノードを適用する構成を採っている。

3.2 課題

短距離リンクのみで構成したメッシュネットワークを用いた無線センサネットワークにおける、ノード障害と物理的な電波伝搬距離の制限により生じる問題について述べる。最初に、図 2 に通常状態のネットワーク構成を示す。丸は全て短距離無線通信のみを利用可能なノードであり、実線は繋がっている他のノードと通信可能であることを意味している。矢印は各ノードが計測したデータを右上の Sink ノードに届ける際の伝達経路を意味している。

次に、ノードに障害が発生し、Sink ノードまでの経路が失われた状態を図 3 に示す。障害が発生したノードの位置によっては、特定ノード群から Sink ノードまでの経路が失われ、図 3 に示すようにいくつかのノードは短距離リンクで通信は可能だが、Sink ノードまでの経路が存在しない孤立ノード群が発生する。電波伝搬距離を考慮した格子状にノードを配置する場合は、ノードの平均枝数は 4 になるため、迂回経路は多く存在することになる。しかし、本研究では計測したい地点が決まっていることを想定しているため、ノードの配置は不規則になり、孤立ノード群の発生確率は高いと考えられる。短距離リンクのみで

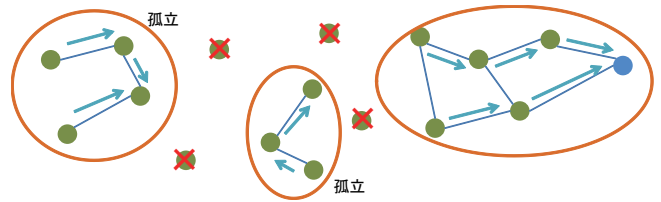


図 3 ノード障害により孤立した部分が発生した状態
Fig.3 Isolated nodes by node failure.

構成した場合の孤立ノードによる問題は、主に次の 2 つである。

(1) 障害が発生したノードと直接繋がっていたノードは、自身の接続状況から、障害が発生したノードを検出することは可能である。しかし、当該箇所から 1 ホップ以上離れたノードは自身の接続状況から障害発生を検知することはできず、計測した情報を送り続けることになる。孤立ノード群中の Sink ノードに最も近いノードは、自身より下位からの情報を上位に送信することができない状態であるため、ローカルストレージに保存しなければデータの欠落が発生することになる。

(2) Sink ノードが検出できるのは、電波の伝搬距離の制約から、現在自身が接続されているノード群に隣接するノードの障害のみである。そのため、障害が発生したノードより遠方のノードの生存状況を検出することができない。したがって、図 3 のように、孤立ノード群より遠方に別の孤立ノード群が発生している可能性もある。障害が発生したノードの情報を正確に検出できない場合、環境情報の計測が続けられているエリアを正確に把握できず、また復旧の手間の見積もりも難しくなる。

これらの状況は、短距離リンクで構成したアドホックネットワークを用いる限り、正確な障害情報を伝達する経路が無いため解決が困難な問題である。

最後に、ノードに障害が発生し、Sink ノードまでの経路は存在する状態を図 4 に示す。この時に問題になるのが、迂回経路の長さで中継しなければならないデータ量の増減である。図 4 の 3 種類の矢印は、それぞれ図 2 に記述した初期の経路に比べて、障害発生前の中継データ量と変わらない箇所、中継データ量が増加した箇所、減少した箇所を示している。増加した箇所は、ノード障害により経路が変わり、迂回経路を通して来たデータを新たに中継しなければならなくなっている。逆に減少した箇所は、これまで中継しなければならなかったデータを中継する必要がなくなっている。前者は、中継処理でのデータ送受信電力量が増加することを意味しており、ノードのバッテリー消費速度が向上することになる。後者は、これまでよりデータ中継に関するバッテリー消費量が減少するため、ノードの生存時間が長くなる。このようなトラヒックの不均衡がノードの生存時間に与える影響は Funnel Effect として知られており、トラヒックの均一化などによる解決方法が提案されている [8]。孤立ノードの問題と経路の負荷増減は同時に発生することもありうる。なお、この問題への対応は本論文の趣旨とは異なるため対象としていない。

3.3 ハイブリッドノードによる解決方式

3.2 で述べた課題を、無線センサネットワークのトポロジヤ

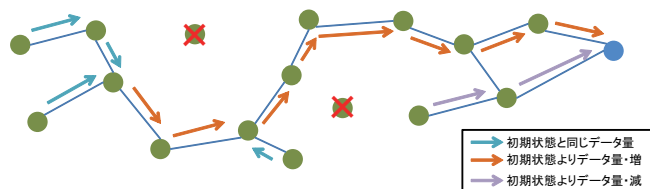


図 4 ノード障害により経路の負荷が変化した状態

Fig. 4 Changes of load in paths by node failure.

プロトコルの工夫で解決するのではなく、管理者に障害情報を伝えることで、ネットワークを人力でメンテナンスするというアプローチで解決を図る。このとき、短距離リンクのみで構成したメッシュネットワークでは Sink ノードまでの経路が存在しないノード群の障害情報の検知が難しい点に着目し、3G データ通信による長距離リンクも利用可能な無線センサノード (ハイブリッドノード) を複数台配置することで、生存ノードの検出数の増加が期待できる。

3.3.1 ハイブリッドノードの機能

ハイブリッドノードは、IEEE802.11 や IEEE802.15.4 といった短距離無線通信機能の他に、3G データ通信による長距離無線通信機能も備えたノードである。3G データ通信などの諸機能は、AnyDATA 社の DTW400-W/DTW600-W モジュール^(注1)で利用可能なものを想定している。

一般ノード、Sink ノード、ハイブリッドノードの機能の違いを表 1 に示す。括弧内の項目は、機能として存在していても構わないが、必須では無いことを意味している。一般ノードの備える IEEE802.15.4 などの短距離無線通信、ローカルストレージ、環境情報計測機能は他のノードと共通である。Sink ノードはこれらに加えて、インターネット接続機能を備えている。これは、遠隔地で計測データを確認する際にはインターネット経由で行うのが現実的であるためである。ハイブリッドノードは、3G データ通信機能、SMS 送受信機能、GPS 機能を備えている。3G データ通信は、ハイブリッドノードからインターネット上の任意のサーバに接続してデータをやり取りする機能で、インターネット上のサーバからハイブリッドノードに接続は行えない。もし、3G データ通信機能を用いてインターネットからハイブリッドノードに対して情報を伝達したい場合は、ハイブリッドノードから定期的に情報確認を行う必要がある。SMS 送受信は、3G データ通信機能で必要となる SIM カードに登録された携帯電話番号を用いたメッセージ交換の機能である。これを使うことで、ハイブリッドノードから SMS を受信できる機器へのメッセージ送信と、管理者側からハイブリッドノードへの指示に利用することができる。他にも、GPS 測位機能と GPS 信号を用いた時刻同期機能も利用できる。

3.3.2 障害検知方式

ハイブリッドノードを用いた、ノードの障害検知の流れを図 5 に示す。図 5(a) は、ノードに障害が発生していない状態を示している。このとき、一般ノードおよびハイブリッドノードは、自身が計測した環境情報を、任意のルーティングプロトコルを

用いて、Sink ノードまでマルチホップ通信で伝達する。計測データには、802.15.4 の物理アドレスや任意のノード ID、送出したデータの順番を示すシーケンス番号などを記録したヘッダを付与する。このような情報を付与することで、Sink ノードはどのノードから情報が届いているかを把握することができる。

図 5(b) は、ノードの一部に障害が発生し、孤立ノード群が発生した場合の処理を示している。Sink ノードは、自身に届いている情報のヘッダ情報から、計測情報が届かなくなったノードの発生を検知することができる。障害発生を検知した Sink ノード (あるいは管理者) は、インターネットおよび 3G データ通信網を介して、届かなくなったノード群の中に存在するハイブリッドノードに対して障害発生通知を行う。この時、Sink ノードに届かなくなった未達ノード群の ID を通知情報に含めておく。障害発生通知を受け取ったハイブリッドノードは、隣接ノードに障害発生通知と Sink ノードに届いていない未達ノード群の ID をフラッディングする。フラッディングは、通常の通信は末端の一般ノードから Sink ノードに向けた方向性があるため、ハイブリッドノードより上流と下流の両方の生存ノードを検出するために利用する。また、フラッディングにシーケンス番号を設定し、ブロードキャストストームが発生しないよう制御する。

図 5(c) に、障害情報を管理者に通知する時の流れを示す。ブロードキャストを受け取ったノードは、自身が未達ノード ID 群に含まれている場合は、これまで Sink ノードに向けていた経路をハイブリッドノードに変更する。変更した経路では、自身のノード ID をまずハイブリッドノードに通知し、もし計測情報が必要であればそれもハイブリッドノードに送信することもできる。自身が含まれる孤立ノード群の情報を収集したハイブリッドノードは、3G データ通信機能を用いて管理者に孤立ノード群中の生存ノード情報を通知する。こうすることで、短距離リンクでは経路そのものが失われてしまい取得できなかった、障害発生ノードより先のノード群の生存状態検出が可能になる。特に、従来の短距離リンクのみ利用できる状況では、Sink ノードに接続されているノード群に隣接するノードの障害のみ検知可能であったが、本方式を用いることで孤立ノード群にハイブリッドノードが含まれている場合に、その孤立ノード群の生存状況を検出することができる。もし、障害発生個所が研究などにおいて重要な場所であった場合は、障害発生から対処するまでの時間はデータ欠落期間と同義になるため、本方式により早期の発見と対処が可能になるため、無線センサネットワークの管理・運用面での効果が高いと考えられる。

しかしながら、孤立ノード群中にハイブリッドノードが含まれていないと孤立ノード群の状況把握ができないため、ハイブリッドノードをどのように配置するかは十分に検討する必要がある。

4. 評価

4.1 シミュレーション設定

シミュレーション条件を表 2 に示す。フィールドサイズは、我々が先行研究 [9] で利用している自然環境を想定したもので

(注1): <http://www.anydata.com/pdf/dtw-600w.pdf>

表 1 各ノードの機能

Table 1 Functions of each node.

Sink ノード	一般ノード	ハイブリッドノード
IEEE802.15.4/IEEE802.11 (ローカルストレージ機能) (環境情報計測機能) インターネット接続機能	IEEE802.15.4/IEEE802.11 ローカルストレージ機能 環境情報計測機能	IEEE802.15.4/IEEE802.11 ローカルストレージ機能 環境情報計測機能 3G データ通信機能 SMS 送受信機能 GPS 機能

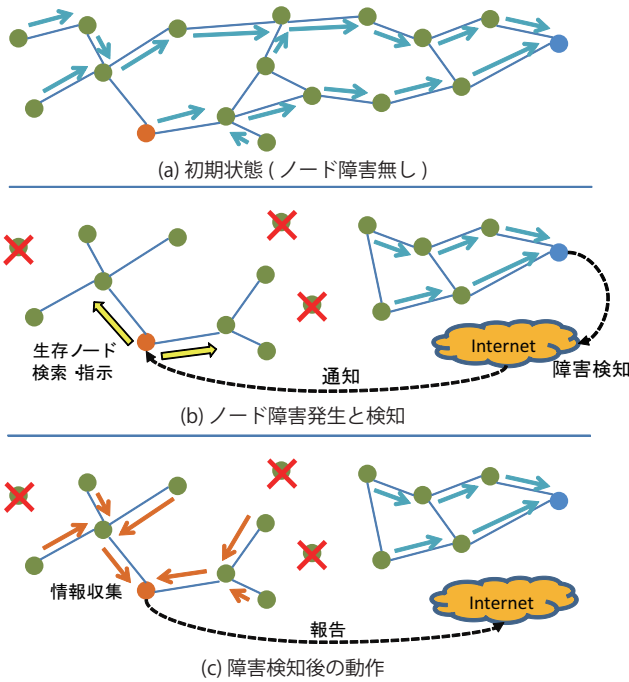


図 5 ノード障害検知と障害情報提供の流れ

Fig. 5 Flow of detecting node failure and reporting failure node information.

ある．今回はネットワークログと障害発生時の生存ノードの検出性能に焦点を当てているため，センシングに必要な電力やノードそのものの消費電力は考慮していない．これらの消費電力は全てのノードで様に減少していくものであるため，本質的な影響はほとんど無いと考えられる．

ノード数は，シミュレーションによる予備実験において，Sink ノード周辺のノードのデータ中継の負荷が大きくなり，Sink ノードを囲むドーナツ状にノードがダウンする現象が確認されたため，Sink ノード周辺の密度を他よりも増やしている．また，250 台というノード台数は，100m × 100m のエリアに 10 台程度の無線センサノードを設置するイメージである．ノードの設置は，エリアを 5 × 5 のグリッドに分割し，一様に設置するノード台数を総グリッド数で割った台数を，1 つのグリッド内にランダムに設置することで，不規則に設置しながらノードの設置密度が同程度になるよう調整している．ノードの配置パターンを図 6 に示す．緑色の箇所には Sink ノードを，橙色にはハイブリッドノードをそれぞれ 1 台ずつ配置している．パターン 1, 2 におけるハイブリッドノードは，それぞれの橙色部分

表 2 シミュレーション設定

Table 2 Simulation Parameters.

項目	設定値
フィールドサイズ	500 m x 500 m
ノード数	250(一様) 30(Sink 周辺) 1(Sink) 4,8(3G)
搭載電力量	1500 J
送信電力 (802.15.4)	462 nJ/bit
受信電力 (802.15.4)	502 nJ/bit
電波伝搬範囲 (802.15.4)	40 m
送信電力 (3G)	3,438 nJ/bit
受信電力 (3G)	3,438 nJ/bit
センシングデータ量	360 bit/回
ヘッダサイズ	120 bit
計測データの送信頻度	センシング 5 回毎
3G 障害通知データ量	480 bit

中で最も Sink ノードから離れた場所に配置している．ハイブリッドノードの配置を図 6 のようにしたのは，ノードのバッテリー枯渇速度と中継データ量には関係性があるため，中継経路の中央付近に設置できるようにするためである．

IEEE802.15.4 の送受信電力は一般的に入手しやすい製品の仕様から，3G データ通信の送受信電力は AnyDATA 社 DTW400-W の仕様から決定した．センシングデータ量は，日時，温度，湿度，気圧などの環境情報を表現できる数値にしている．ヘッダサイズは，MAC アドレス × 2: 24 バイト，シーケンス情報: 2 バイト，データ種別: 1 バイト程度を想定した数値である．

ルーティングは，自身の電波伝搬範囲に存在するノードのうち，位置的に Sink ノードに最も近いノードにデータの中継を依頼するシンプルなものを採用した．これは，本論文の趣旨が長距離無線通信機能を備えたノードが利用できる場合に，Sink ノードや管理者が現在生存しているノードをどの程度検出できるかを検証することが目的であるため，特定のルーティングプロトコルへの依存度は低いと考えたからである．

シミュレータは Java 言語による独自実装のものをを用いた．後述する各実験は，約 50 回試行した際の平均値である．ハイブリッドノード無しと有りについて評価を行うが，各試行におけるノードの配置はハイブリッドノード無しと有りで同じものを利用している．

図 7 に，Sink ノードでの生存ノード検出数を，それぞれハイブリッドノード無し・有りの状態別に示す．横軸は，1 分に 1 回センシングを行い，センシング 5 回につき 1 回 Sink ノー

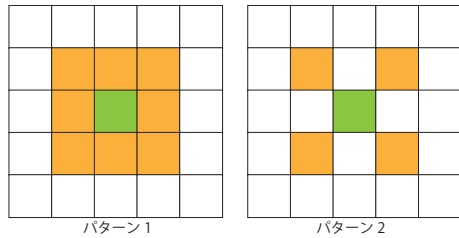


図 6 ノードの配置パターン

Fig. 6 Node placement patterns for simulation.

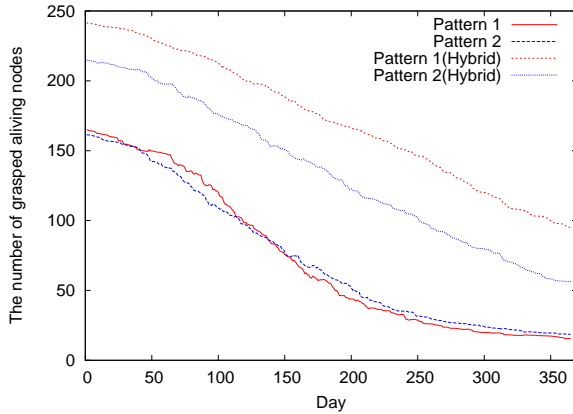


図 7 生存ノード検出数

Fig. 7 The number of detected alive nodes.

ドに送信を行うのを 1 ラウンドとした場合の 288 ラウンド分を 1 日と仮定している。これらのグラフを比較すると、ハイブリッドノード有りの方が、どちらのノード配置パターンにおいても Sink ノードで検出できる生存ノード数が多い事が分かる。初期状態で全ノードの生存状態を把握できていないのは、ノードの配置をグリッドに対して一定数をランダムに配置することと、Sink ノードに対して最短距離になるようルーティングを行っていることから、初期状態で Sink ノードまでの経路が存在しないノード群が発生していることに起因する。

ハイブリッドノードを利用しない場合は、短距離リンクのみを用いたマルチホップ通信により、センサ情報内に含まれるノード ID をノードの生存情報として扱うことになる。そのため、マルチホップ通信では、ノードの脱落により経路がなくなると下位のノード全てが Sink ノードと通信不可になるため、結果として生存情報が把握できないことになる。対して、ハイブリッドノードを利用する場合は、短距離リンクで把握できる生存ノードに加えて管理者と直接通信が可能な長距離リンクも用いて生存ノード情報を通知しているため、ノードダウンによる短距離リンクが存在しない箇所の生存ノード情報を把握することができる。また、ハイブリッドノードは生存ノード情報のみを通知し、計測データは送信しないため、ハイブリッドノードが含まれる孤立ノード群内の中継データ量は少なく済む。そのため、各ノードのバッテリー消費量を抑制する効果もある。

図 8 に、全生存ノード中、Sink ノードが検出している生存ノードの割合を示す。生存ノード検出数と関連性があるため、ハイブリッドノード有りの方が割合は高く、序盤はハイブリッ

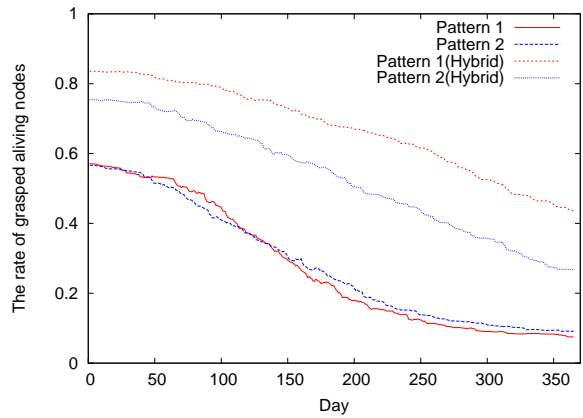


図 8 生存ノード検出率

Fig. 8 The rate of detected alive nodes.

ドノードが無い状態に比べて 20%以上良い結果になっている。また、後半部分について、ハイブリッドノード無しの場合は数%~10%程度の検出率にとどまっているのに対し、ハイブリッドノード有りの場合は 10%~40%という結果になっている。そのため、ハイブリッドノードを用いることで、時間経過に対する生存ノード検出性能に対する効果が見て取れる。

図 9、図 10 に、各ノードの配置パターンにおけるノードの接続状態の変化を示す。これらは、開発したシミュレータが生成した画像である。図は、左からハイブリッドノード無しの 1 日目の終了時点の状態、ハイブリッドノード無しの 150 日目の終了時点の状態、ハイブリッドノード有りの 1 日目の終了時点の状態、ハイブリッドノード有りの 150 日目の終了時点の状態を示している。三角は Sink ノードを、丸は一般ノードを、四角はハイブリッドノードを意味しており、線は Sink ノード方向に向けた最短経路を示している。×印はノードがバッテリー枯渇でダウンした状態を意味している。各ノードの周囲にある円は、そのノードの電波伝搬距離の半分を半径とするもので、円が重なっている場合は通信可能であることを意味している。青い円の部分は Sink ノードまでの経路が存在するものを、赤い円はハイブリッドノードに障害情報を通知している状態を、白い円は Sink ノードとハイブリッドノードの両方と通信できない状態を示している。

図 9 では、150 日目には Sink ノード周辺の一般ノードの大半がバッテリー枯渇によりダウンしているため、ハイブリッドノード無しと有りの状態で管理者が検出可能な生存ノード数に大きな違いが生じていることが分かる。図 10 は、基本的に図 9 と同様の結果であるが、ハイブリッドノード数が少ないため、図 9 に比べると検出できている生存ノード数は減少している。したがって、長期的に無線センサネットワーク運用した際の、ハイブリッドノードの適用による生存ノードの検出効果が示されている。

本論文では、Sink ノードに一部のノードから計測情報が届かなくなった場合に、3G データ通信網経由でハイブリッドノードに指示を出して、ハイブリッドノードが周辺ノードの生存状況を確認・検出する方式を採っている。これにより、各周辺ノード

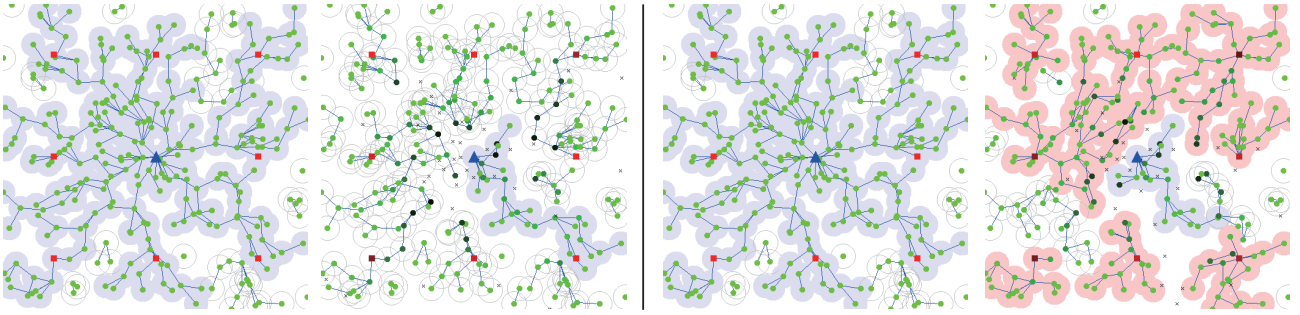


図 9 配置パターン 1 における接続状況の変化

Fig. 9 The changes of connection between nodes in the case of placement pattern 1.

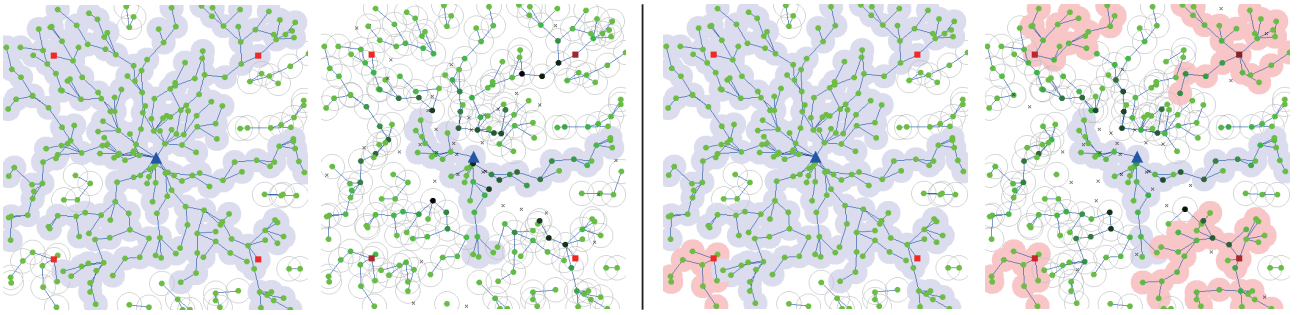


図 10 配置パターン 2 における接続状況の変化

Fig. 10 The changes of connection between nodes in the case of placement pattern 2.

ドは自身の周囲で障害が発生し、Sink ノードへの経路が失われている可能性があることを検知することができる。また、今回は、各周辺ノードは計測データをハイブリッドノードには送信せず、各ノードが自身のローカルストレージに計測情報を保持するようにしている。短距離リンクのみで構成した従来の無線センサネットワークでは、各ノードは Sink ノードまでの経路の有無を検知することができないため、経路が失われた時でも計測情報を上流に送り続ける。その結果、Sink ノードまでの経路の分断地点にいるノードに計測データが集中することから、受信電力の消費やローカルストレージの圧迫につながり、そのノードは急速にバッテリーを消費することになる。この時、ローカルストレージには他のノードから収集した情報を保持しているため、このノードがダウンすると大幅なデータの欠落に繋がる。本提案では、ハイブリッドノードにより一般ノードが自身から Sink ノードまでの経路が存在するかを検知できる点、障害発生時に計測データを自身で保持することで送信電力を抑え、結果としてノードの生存時間が延びるため、データ欠落を抑制できる可能性がある点も大きな長所である。本提案を用いることで、管理者側にとっては、短距離リンクによる経路が存在しない箇所の生存ノードの検出と、その生存ノードの電力消費量が抑制されていることから、無線センサネットワークの復旧計画を立てやすくなるといった恩恵もあると考えられる。

5. 関連研究

アプリケーション品質の向上を想定した研究に、機能障害のあるノードや異常なデータを送信する Faulty Node の検出に関するものがある [10] [11] [12]。ノード障害の検知という点では

本論文の目的と同じだが、短距離リンクのみを用いている点、十分なノード密度が確保できる台数や格子状の規則的な配置、計測データの検証など、条件や手段は異なっている。

バッテリー枯渇を要因とするノードのダウンによる無線センサネットワークへの影響を緩和するための方式として、これまでノードのバッテリー消費量を抑制することで連続稼働時間を長くする方法が多く提案されている [13] [14]。これらは、ノードがダウンし始める時間を先延ばしにすることは可能である。しかし、本研究では適用先が無線センサネットワークに求める要件から機能設計を行っているのに対し、従来研究はライフタイムを延ばすという観点で方式提案がなされている点異なる。しかし、ライフタイムが延びても、ノードがダウンし始めると、そのダウン速度が急速に進む提案も多い。そのため、従来方式を用いる場合は、観測対象に対して適切な環境情報の計測が可能であるかを検討する必要がある。なお、本研究におけるハイブリッドノードを用いたノード障害箇所の検知方式は、ルーティング方式に依存する部分が少ないと考えられるため、従来手法との併用は可能であると考えている。

6. まとめ

本論文では、従来の短距離リンクのみで構成した無線センサネットワークの障害情報の伝達性能に課題がある点に着目し、3G データ通信が安価に利用できるようになってきている背景を受け、短距離リンクと長距離リンクの両方が利用可能なハイブリッドノードを無線センサネットワーク中に配置することで、障害情報の伝達性能を向上させる方式について提案した。提案方式のシミュレーション評価を行い、短距離リンクによる一般

less microsensor networks”, HICSS '00 Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences-Volume 8, p. 10 pp. vol.2 (2000).

[14] Y. Xu, J. Heidemann and D. Estrin: “Geography-informed energy conservation for ad hoc routing”, ACM MOBICOM, pp. 70–84 (2001).

[14] Y. Xu, J. Heidemann and D. Estrin: “Geography-informed energy conservation for ad hoc routing”, ACM MOBICOM, pp. 70–84 (2001).

[14] Y. Xu, J. Heidemann and D. Estrin: “Geography-informed energy conservation for ad hoc routing”, ACM MOBICOM, pp. 70–84 (2001).

- [14] Y. Xu, J. Heidemann and D. Estrin: “Geography-informed energy conservation for ad hoc routing”, ACM MOBICOM, pp. 70–84 (2001).