

# 間欠的接続機会を持つ流れるセンサネットワークの試作

前川寛<sup>1,a)</sup> 石原進<sup>2,b)</sup>

**概要:** 老朽化した下水管の破損箇所の発見には、高いコストや労力が伴う。筆者らは、比較的成本を掛けずに水流環境での温度やガスの観測を目的とした「流れるセンサネットワーク」を提案している。これは、水流環境に小型・軽量のセンサノードを複数流し、水流環境沿いに設置されたアクセスポイント(AP)との通信を介してデータを回収するシステムである。本システムでは、一部のセンサノードに起動状態を維持させて他の間欠起動するセンサノードからのデータの受信と AP への転送を行う。これまでに時刻同期を利用した起動ノードの選択手法が検討されてきたが、低コストで本システムの実装をする場合、時刻精度の低いデバイスの使用も考えられるため、時刻の同期を必要としない起動ノードの選択手法の設計が望まれる。本稿では、ノード間での時刻のずれが流れるセンサネットワークに与える影響と実装時の課題について議論する。また、他ノードからの観測データの起動ノードへの転送時の確認応答に代表ノードの交代要求を相乗りさせることで、時刻同期を利用しないで起動ノードの選択を行う手法の設計を行った。

**キーワード:** 流れるセンサネットワーク、代表ノードの選択、クラスタリング

## Experimental implimentation of a wireless sensor network which have intermittent connectivity to access points

HIROSHI MAEGAWA<sup>1,a)</sup> SUSUMU ISHIHARA<sup>2,b)</sup>

**Abstract:** Detecting damaged part of old sewer pipes needs much cost because it requires much labor or expensive equipment such as self propelled vehicles with cameras. We have proposed *A Drifting Sensor Network* for the purpose of observation of temperature and gas in the water way with small cost and labor. A drifting sensor network is a system to collect data observed by small and light sensor nodes through access points(APs). To save energy consumption of multiple nodes, they wake up only when they observe the environment and send the data to active nodes which are used to receive data from other nodes and forward the data to APs. We have proposed a scheme for selecting active nodes assuming that all nodes synchronize their clock. However, considering low-cost implementation of drifting sensor networks, utilization of devices which are cheap but have low time accuracy is possible. In this paper, we discuss the impact of poor time synchronization in drifting sensor networks. In addition, we design a scheme for selecting active nodes without time synchronization in which a request for changing the role of an active node is piggybacked on an acknowledgement packet for data transmission to an active node.

**Keywords:** Drifting Sensor Networks, Selection of representative nodes, clustering

### 1. はじめに

橋脚、下水管等の都市インフラの老朽化が世界的に大きな課題となっている。日本では高度成長期に大規模に整備した都市インフラの老朽化が目立ち、道路陥没等の多くの事故が発生している。このうち下水管の維持にあたって

<sup>1</sup> 静岡大学大学院システム工学専攻  
Graduate School of Engineering, Shizuoka University  
<sup>2</sup> 静岡大学創造科学技術大学院  
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University  
a) maegawa@ishilab.net  
b) ishihara@ishilab.net

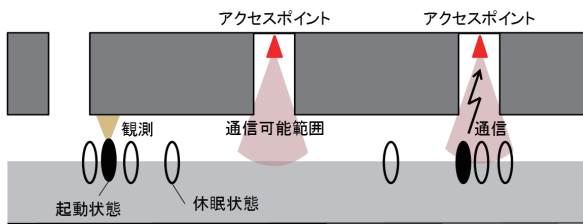


図 1 流れるセンサネットワークの下水管での使用例

は、人による目視および遠隔カメラを用いた方法の他、高価な自走ロボットを使った方法による調査が行われているが、いずれも金銭的にも人的にも高いコストが伴う。そこで、筆者らはカメラやガスセンサを持つ小型かつ安価なセンサノードを複数下水管に流し管内の観測を行うことで、比較的安価かつ安全に管路の観測を行うことを目的とした「流れるセンサネットワーク」を考えている [1]。また、同様のセンサを大災害が起きたときの河川や海岸部の観測のために用いることも有用と考えている。筆者らは、これまで流れるセンサネットワークの省電力化やバッファ管理、データ回収率の理論的評価について議論してきた [2] [3] [4]。また、流れるセンサネットワークの試作に向けて複数の移動ノードの移動を制御する方法も開発している [5]。今後、流れるセンサネットワークの実装を考えた場合、時刻精度の低いデバイスの利用も考えられる。そのため、本論文では流れるセンサネットワークにおける時刻の同期がシステムに与える影響について検討し、時刻の同期に依存しないデータの回収方法の設計を行った。

流れるセンサネットワークの下水管での利用例を図 1 に示す。流れるセンサネットワークでは、マンホールから下水管内にカメラやガスセンサを備えた複数の小型センサノードを投入する。複数のセンサノードを用いるのは、管路内でのノードの故障や電池切れ、ノードの紛失に対応できるようにするためである。これらのノードは水路を流れながら、管路内の水位や温度、ガスの検出や画像の撮影を行う。下水管や河川等を想定した場合、小型のセンサは流れてくる汚物、漂流物等と分けて発見することは難しいと考えられる。そのため、ノードによって観測された情報をアクセスポイント (AP) を通して回収する。下水管を想定した場合、利便性やコストの面からマンホールの蓋の裏に AP を設置することが考えられる。マンホールの蓋の裏に設置された AP と下水管内に流れるノード間の距離は数 m から十 m 程度あり、その側面は埋められているため AP とセンサノード間の通信はマンホール直下付近のみ可能である。従って、水流に流されているセンサノードとの通信可能な時間は数秒程度と予想でき、センサノードが観測したデータを確実に AP で回収するためには、数秒間の限られた AP との通信機会を確実にとらえてデータを送信する必要がある。

筆者らは、これまでに複数のセンサノードが交代で常時

起動状態となり、他のセンサノードが観測したデータを回収し、AP との通信機会を確実に捉えてデータを転送するための手法を開発してきた [6]。以下、起動を維持した状態で他のセンサノードの観測データを回収し、AP との通信機会を待つノードを代表ノードという。筆者らがこれまで開発した手法では、全てのノードが定期的に同じタイミングで起動し、代表ノードの選出を行う。このため、全てのノード間で時刻同期が行われていることを前提としている。システム全体のコストを抑えるために、低価格で時刻精度が低いデバイスを使用することが考えられるが、時刻同期が成立していない場合、上記の方法では近隣にある複数のノードが代表ノードになる等の意図しない動作をし、結果的に過度に電力を消費する可能性がある。

本論文では、時刻精度が低いデバイスを使用した流れるセンサネットワークの試作において、時刻のずれが流れるセンサネットワークに及ぼす影響について議論し、時刻同期を前提としない代表ノードの選択手法を示す。以下、2章で関連研究について述べた後、想定する流れるセンサネットワークとこれまで開発してきた代表ノード選択手法について述べる。4章で、時刻同期が代表ノード選択手法に対する影響を述べ、時刻同期に依存しない代表ノード選択手法の設計と、その実装の方法について述べる。5章で本論文をまとめる。

## 2. 関連研究

センサネットワークを用いて下水管内の調査を行う試みがいくつか試みられている。固定のセンサノードを用いた試みとして、PIPENET がある [7]。PIPENET は、固定センサを利用して水位、水圧、音響を測定することによって下水管の漏れの検出を行っている。しかしながら、固定センサを用いる方法は管に沿って多数の固定センサを設置する必要があり、設置コストがかかる。

本研究同様に、水流環境のデータ回収のためにセンサノードを管内に流すことを考えた研究に、SewerSnort [8] や PipeProbe [9] 等がある。SewerSnort は、主に下水管のガス濃度を調べるために、浮き輪のついたセンサノードを下水道に流すシステムである。SewerSnort では、マンホールの下等に設置した AP からの電波強度をあらかじめ測定しておき、センサノードからの通信の電波強度と照らし合わせることで AP からの距離を推定している。PipeProbe は、圧力センサと角速度センサを搭載したセンサノードを排水管に流すことで、屋内の配管の構造の推定を行う。

しかしながら、これらはいずれもセンサノード間の通信を想定していない。一方、本研究では、管路に流したセンサからのデータ回収の信頼性の向上のために、センサノードと AP 間の通信だけでなく、センサノード間の通信を用いる。また、センサノードの小型化、軽量化のために電池容量を小さくする必要があるので、省電力化の工夫を行っ

ている点に特徴を持たせている。

河川等の水流環境のデータ回収にセンサーノードを利用する取り組みとして、カリフォルニア大学パークレー校の Floating Sensor Network Project がある [10]。Floating Sensor Network Project は、ドリフタと呼ばれる任意の移動が可能な移動センサーノードを開発している。ドリフタには水質センサ、GPS の他 GSM、Zigbee による通信機能、浮力制御機能などが搭載されており、72 時間の稼働が可能である。また、芝田らは GPS、Zigbee による通信機能を持つ独自のセンサーノード (GPS フロート) を開発し、海水浴場での表層流観測に用いている [11]。流れるセンサネットワークでは、ノードと AP との通信機会が限られており、この点がこれらの取り組みとは異なっている。

### 3. 流れるセンサネットワーク

流れるセンサネットワークは、カメラやガスセンサを持つ小型かつ安価なセンサーノードを複数水流環境に流すことで、比較的安価に水位や温度、画像等の観測を行うことを目的としている。以下、これまでの研究で想定している流れるセンサネットワークの環境とその課題を概説する。

#### 3.1 流れるセンサネットワークの想定環境

##### ● 小型・軽量のセンサーノード

センサーノードが大きく重い場合、管路で詰ったり水中に沈んで AP やノード間での通信が水で遮られたりすることが考えられる。そのため、管路内でノードが詰まらず、通信が可能な状態を維持するために、センサーノードは小型・軽量である必要がある。センサーノードを構成する部品の内、電池はセンサーノード全体の重量の内大きな部分を占めるので、なるべく小型・軽量のものを使用したい。本研究では、ボタン電池等の小型・軽量の電池は、容量が小さく常にノードを起動状態にしておくと観測領域全体をカバーするには不十分であると想定する。

##### ● センサーノードの故障、離脱の発生

水流環境ではセンサーノード水没や壁との衝突による故障やノードの電池切れ等による離脱の可能性が他のセンサネットワークより大きい。そのため、ノード間でデータの交換を行い、複数のノードにデータのバックアップを残し、ノードが故障した場合にも AP を経由してデータの回収を可能とする方法が求められる。

##### ● AP を介した観測データの回収

下水管や河川などの水流環境で、漂流物と流れてくるセンサーノードを分別してセンサーノードだけを回収するのは容易ではない。そのため、本研究ではノードの回収はしないものと仮定する。ノードを回収しない場合、携帯電話回線や無線通信を使用してデータを外部に送信する必要がある。下水管の場合は、地下に埋まって

いるため携帯電話回線を使用してデータ転送ができない。そのため、マンホールの蓋の裏等に設置した AP を介して観測データを回収する。

##### ● 水流に依存したセンサーノードの移動

センサーノードにはスクリュウなどの推進器は装備されていない。そのため、センサーノードの移動は水流に依存している。また、センサーノード群は水流の状態によってはセンサーノード群は拡散するため、1 台のノードが孤立するようなことも考えられる。

#### 3.2 流れるセンサネットワークにおける課題

##### ● 限定的な AP との通信機会でのデータの回収

マンホールは、数 m から 10m 程度の深さに埋まっており、下水管を流れる水の流速は 0.6 から 2.0m/s である。このような環境で、無線通信に IEEE802.11 や IEEE802.15.4 等を用いた場合、マンホール直下周辺の数 m から十数 m 程度の位置にセンサーノードがいる場合のみ通信が可能であり、データの送受信可能な時間は数秒から十秒程度と考えられる。流れるセンサネットワークではこの限られた通信機会ですべてデータを回収することが望まれる。センサーノードは全ての観測領域で起動状態を維持することができないため、間欠的に動作する必要がある。センサーノードは起動状態の時のみ AP と通信可能であるので間欠的に動作すると通信機会を逃してしまうことが考えられる。

##### ● 使用するセンサーノードの台数の抑制

流れるセンサネットワークで使用されるセンサーノードは上記で述べたように電池容量が小さくなり、観測領域全体をカバーするためには電池が足りなくなることが考えられる。そこで、複数のセンサーノードを使用し、各々を間欠的に動作させることで観測領域の終点まで稼働状態を維持できるようにする。しかしながら、ノードの数を増やすとコストやノードが詰る可能性が増えるため、なるべく少ない数が望ましい。そのため、各ノードにおける動作の省電力化が必要となる。

##### ● センサーノードの故障、グループからの分離

流れるセンサネットワークではノードの電池切れや水没、壁との衝突等による故障によってシステム内のノードの数の減少が起こる。また、ノードの拡散等によってノード同士によるグループの通信が分離されることがあり得る。また、流れるセンサネットワークは、システムが稼働を始めた外部から操作するのが困難であり、センサーノードが離脱した時に代理のノードを追加するといった操作を行うことは容易でない。そのため、これらの問題が起きた場合でも観測されたデータを確実に回収する仕組みが必要である。

##### ● センシングデータの位置情報の特定

下水管監視への適用を考えると、流れるセンサネット

ワークで回収したデータを使用して水の漏れやガスの発生を検知し、その後直接その場所に人を派遣して対処することが考えられる。そのため、センシングデータが取得された場所は重要な情報の1つとなるが、管路内はGPSが使用できない。そこで、APからの電波のRSSIや時間経過、データが回収されたAP等から、位置を推定する必要がある。

### 3.3 限定的なAPとの通信機会でのデータの回収

流れるセンサネットワークにおいて、センサノードが観測したデータをユーザが使用するためにはAPを通してデータを回収する必要がある。このためには、センサノードが起動しているときにAPとの接続機会を得る必要がある。しかしながら、流れるセンサネットワークのセンサノードは間欠的に動作しているため、APとの通信機会にノードが起動しているとは限らない。APとの通信機会が確実にデータのやり取りする方法として、(i)セミアクティブタイプの通信デバイスを使用する方法、(ii)データを所持したセンサノードが起動状態を維持したままAPとの通信機会を取得する方法、の2つが考えられる。

- セミアクティブタイプの通信デバイスを使用する方法  
セミアクティブタイプの通信デバイスは、低消費電力状態で休眠状態にあるとき、特定のパターンの信号を受信すると起動状態に移行する通信デバイスである。このタイプのデバイスをセンサノードに用いる場合、以下の様にしてセンサノードからAPへのデータ送信を行うことができる。センサノードは観測時のみタイムで起動し、観測を終了後休眠状態に移る。休眠状態のノードは、APからの起動信号を受信すると起動し、APに観測データを送信し、その後再び休眠する。この方法ではAPからの起動信号受信により、一度に多数のノードが起動状態になり、観測データの送信を行ってしまう可能性がある。複数のノードがまとまって流れ、かつ大きなデータを送信する場合、通信の衝突が頻発する可能性がある。
- 起動状態のノードがAPとの通信機会を取る方法  
セミアクティブタイプのデバイスを使用しない場合、センサノードがAPから定期的に送信されるビーコンを起動状態で受信することでAPとの接続機会を発見できる。この方法では、代表ノード以外のノードは観測時のみ起動して観測を行い、その後データを代表ノードに送信した後に休眠する。代表ノードは起動状態を維持し、周囲のノードの観測データを受け取って保存する。代表ノードはAPから定期的に送信されるビーコンを検出すると受信済みのデータをそのAPに送信する。この方法では、適切に代表ノードが選択されていれば、APへの複数台の同時送信による衝突を避けることができる。

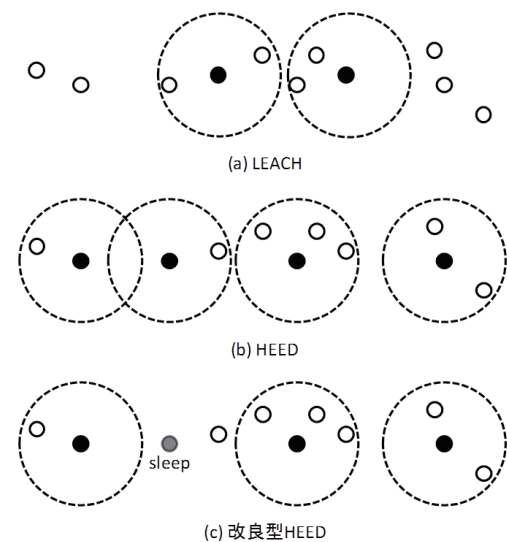


図2 時刻同期を用いる代表ノード選択手法の選択例

### 3.4 ネットワークの省電力化と代表ノード選択手法

前述した起動状態のノードがAPとの接続機会を得る方法では、全てのノードが互いに通信可能な範囲内となる位置を保ったまま流れる場合、単純なラウンドロビンによる代表ノードの交代によって、全てのノードからのデータ回収が可能である。しかしながら、実際は、水流によるノード拡散やノードの故障が起きるので、状況に応じた代表ノードの選出が必要である。そこで、筆者らはアドホックネットワークやセンサネットワークで使用されるクラスタリング技術を基とした代表ノードの選択手法を開発してきた。以下、基本的なクラスタリング技術であるLEACHとHEED、並びにHEEDを基に筆者らが開発した流れるセンサネットワーク向けの改良型HEEDについて述べる。

#### ● LEACH

LEACH [12] は、すべてのノードが時刻を同期しており、定期的に短時間起動状態となって代表ノードであるクラスタヘッドの選出処理を行う。この選出処理は、あらかじめシステムに与えられた起動頻度が維持されるように計算された確率で各ノード自身が代表ノードとして立候補することで行われる。立候補したノードは、周囲の立候補していないノードに対して次の選出処理までの動作スケジュールを送信し、周囲のノードはそれに従って動作する。LEACHの流れるセンサネットワークでの代表ノードの選択例を図2(a)に示す。LEACHは、代表ノードが確率によって選ばれるため、ノードが拡散する代表ノードと通信ができない孤立ノードが発生し、データの回収率が下がる。

#### ● HEED

HEED [13] は、LEACHと同様にすべてのノードがあるタイムスロットごとに短時間起動状態となって代表ノードの選出処理を行う。この選出処理では、すべてのノードが自身を含めた少なくとも1台の起動状態のノードと通信可能な状態となるように選出される。代



表ノードは、ノードの残存電力および他のノードとの接続状態等から得られるコストに従って決定される。HEEDの流れるセンサネットワークでの代表ノードの選択例を図2(b)に示す。HEEDでは、各ノードの1ホップ以内のノードの中に必ず代表ノードが存在するように代表ノードが選出される。これにより、代表ノードと通信できない孤立した一般ノードが存在しないようになる。一方で、ノードが孤立した場合、そのノードが常に代表ノードになってしまい、常時電力を消費するようになってしまう。

#### ● 改良型 HEED

筆者らが設計した改良型 HEED [6] は、HEED を基として、移動によってノード群が分断されたときにも各ノードと起動状態のノードとの接続性を維持できるように代表ノードを選択する一方で、ノードの消費電力を低減するためある確率で起動ノードになったノードを休眠させることでシステムの長寿命化を狙った手法である。改良型 HEED の流れるセンサネットワークでの代表ノードの選択例を図2(c)に示す。改良型 HEED は、HEED 同様自身を含めた1ホップ以内のノードの中に必ず代表ノードが存在するように代表ノードを選出する。ノードの消費電力を低減するために周囲のノード数に応じて定期的に休眠を行う。周囲のノード数が少ない場合には、高い確率で代表ノードが休眠する。このため、代表ノードであっても AP との接続機会を逃すことがある。HEED と同様にノードの密度が低いときにはノードが頻繁に代表ノードとして選出されるが、本方式では代表ノードであっても休眠することがあるため、代表ノードによる電力消費を抑制できる。

これらの方法は通信のタイミングやデータの形式を事前に決めておくことで最低限の起動時間で動作するよう設計されている。しかしながら、ノード間で通信タイミングがずれると正常な動作ができなくなるため、時刻の同期を定期的に行う必要がある。

## 4. 使用デバイスが与える流れるセンサネットワークへの影響

流れるセンサネットワークの実現を考えたとき、センサノードを構成する無線通信モジュールやマイコン等の選択は重要な要素である。以下、まず、無線通信デバイスの選択と、時刻精度の低い低機能なデバイスを使用した時に起こる時刻同期の問題点について述べる。その後、時刻同期を前提としない代表ノード選択手法の設計について述べる。

### 4.1 観測データ量と AP の設置間隔

流れるセンサネットワークではセンサノードは限られた範囲でのみ AP と通信が可能である。そのため、それま

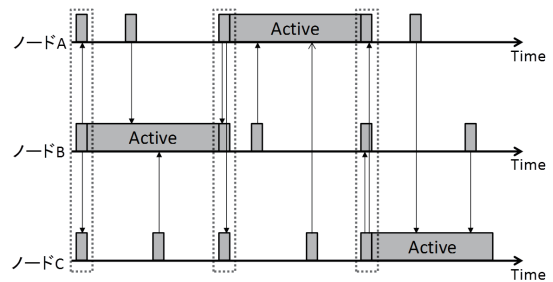


図3 時刻同期を前提とした代表ノードの交代

で観測したデータを、その限られた範囲内で AP に全て送信できることが望ましい。そこで、1回の通信機会での送信可能なデータ量について考える。マンホールの直径は60cm、深さは1~10m程度、下水道の流速は0.6~2.0m/sである。これらから、APとセンサノードが通信可能な時間は数~10秒程度と考えられる。

IEEE802.15.4 準拠の通信を想定し、センサノードが観測するデータを時刻、ノード ID、温度等の観測データから成る100バイトのデータとすると、200~300個程度のデータを送信することが可能である。そのため、2m間隔で観測データを取得すると想定すると AP の設置間隔は500m程度までなら可能である。

一方、観測データを640×480画素のJPEG画像を想定すると、データサイズは100Kバイト程度であると考えられる。この場合、IEEE802.15.4 準拠の通信では一度に AP に対して数個のデータしか送信できない。これを、IEEE802.11b 準拠の通信で考えてみると、50個程度のデータを一度に送信可能である。従って、通信に IEEE802.11b 準拠のものを使用し、2m間隔で画像を撮影することを想定すると、AP の設置間隔は100m程度までならその間に撮影した全ての画像データを送信できる。IEEE802.11b 準拠の無線デバイスは、IEEE802.15.4 準拠のものに比べて消費電力、起動速度の面で劣っていたが、近年消費電力が休眠時5μA程度のIEEE802.11bのデバイスも製品化されている。

### 4.2 代表ノード選択手法と時刻同期

3.4で述べた3つの代表ノード選択手法では、時刻の同期が全てのノード間で行われていることが前提となっている。図3に時刻同期を前提とした代表ノードの交代方法について示す。時刻同期を前提とした代表ノードの交代方法では、点線で囲まれている時間に全てのノードが一時的に起動し、次の点線で囲まれている時間(1ラウンド)までの代表ノードとその他のノードの起動スケジュールを決定する。ラウンドごとに代表ノードを決定しているため、代表ノードが故障してもそのラウンドが終われば次の代表ノードが選出される。一方で、代表ノードの選出やデータの送受信のための起動タイミングが時刻同期の前提を満たしていない場合、1ラウンド時間内に代表ノードの選出が

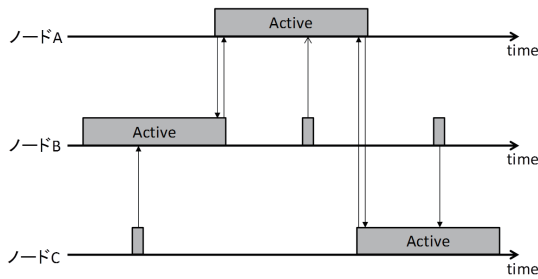


図 4 時刻同期を必要としない代表ノードの交代

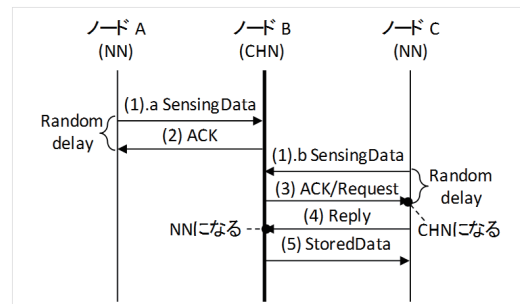


図 5 代表ノードリレー公式の正しい動作

複数回行われ、複数の代表ノードが選出され、電力を浪費する可能性がある。

時刻同期の方法には、電波時計や GPS 等の外部機器を使用するものが存在するが、下水管を想定すると電波時計、GPS の使用は困難である。無線センサネットワークにおけるセンサノード間の時刻同期のプロトコルに Reference Broadcast Synchronization (RBS) や Timing-sync Protocol for Sensor Networks (TPSN) が存在する。RBS は、各クライアントがサーバが送信する参照パケットを受信した時刻を基準とすることでクライアント同士の時刻同期を行っている。しかしながら、この方法は時刻同期を行うサーバと必ず通信できなければ同期ができない。TPSN は、双方向通信が可能であることや近隣ノードの把握ができていないことが前提の時刻同期プロトコルであり、近隣のノード同士で時刻情報を交換して時刻を合わせていく。流れるセンサネットワークでは、ノードは休眠していたり、孤立していることが考えられるため、これらのプロトコルを流れるセンサネットワークに適用するのは困難である。

そこで、代表ノードが観測データを送信してきた相手に対して代表ノードの役割を委任することで、時刻同期を必要としないで代表ノードを交代していく方法について考える。以下の方法を代表ノードリレー方式と呼ぶ。図 4 にその動作概要を示す。図 4 では、まずノード B が代表ノードになっている。ノード B は、ノード A が観測データを送信してきた時に、ノード A に代表ノードを任せている。このように、観測データの受信タイミングで代表ノードの交代処理を行うことで時刻同期を必要としないで代表ノードの交代を行うことが可能である。

この方法は、時刻精度の低いデバイスを用いても代表ノードの交代ができるので代表ノード選択手法の一つとして有効であると考えられる。時刻同期を用いる方法と用いない方法を比較した場合、時刻のずれがシステムに影響しないような短期間の稼働であれば、代表ノードの紛失からの復帰が早い時刻同期を用いる手法が有用であると考えられる。一方で、時刻が大きくずれる長時間の稼働であれば、動作に安定性する時刻同期を使用しない手法が有用であると考えられる。

#### 4.3 代表ノードリレー方式の設計

以下、代表ノードリレー方式の詳細を説明する。本方式では、代表ノードが観測データを送信してきた相手に対して代表ノードの役割を委任することで、時刻同期を必要としないで代表ノードを交代する。代表ノードは起動状態を維持して観測データの受信を待つ。代表ノード以外のノードはデータの観測時にのみ起動し、観測と代表ノードへ観測データの送信を行うと再び休眠状態に戻る。

本方式では、観測データを受信した代表ノードは、その送信元のノードと代表ノードの役割を交代するかを決定する。代表ノードを交代しない場合は、観測データに対する確認応答のみを送信する。代表ノードを交代する場合は、観測データの確認応答に代表ノードの交代要求フラグを立て、観測データの送信元に送信する。代表ノードの交代要求フラグが立った確認応答を受信したノードは、それに対する応答を返し、代表ノードの交代を了承する。また、代表ノードの交代時には、これまで回収したデータを新しい代表ノードに送信する。

観測データの確認応答に代表ノードの交代要求を付加して交代を行うため、複数のノードがタイミングを合わせて起動するような処理を行わなくて済む。そのため、時刻精度の低いデバイスを使用した場合でも代表ノードの交代が可能である。一方で、ノードが孤立した時の対処、代表ノード故障時の再選出機構が必要である。

以下、図 5 を使用して正常に動作した場合の代表ノードの交代について説明する。代表ノードを Cluster Head Node (CHN) とし、その他のノードを Normal Node (NN) と呼ぶ。あらかじめ多数の NN の中の数台を CHN として指定しておく。CHN は、常に起動状態であり、NN は観測時以外は休眠している。

- (1) NN は観測を行うときに起動し、観測したデータ (SensingData) をブロードキャストし、観測データに対する確認応答 (ACK) を待った後、再び休眠状態になる。
- (2) SensingData を受信した CHN は、送信元の NN と CHN の役割を交代するかを CHN や NN の残存電力やノード数等に応じて判断する。
- (3) 交代しない場合は、SensingData の送信元に ACK をユニキャストする。代表ノードを交代する場合、CHN

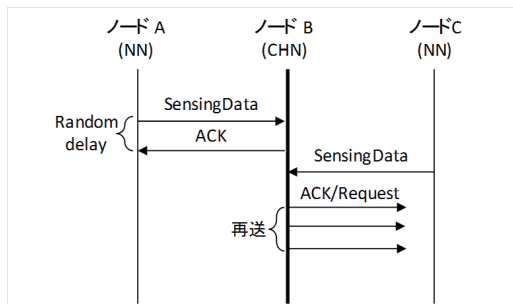


図 6 代表ノード交代時の ACK/Request パケットがロスした場合

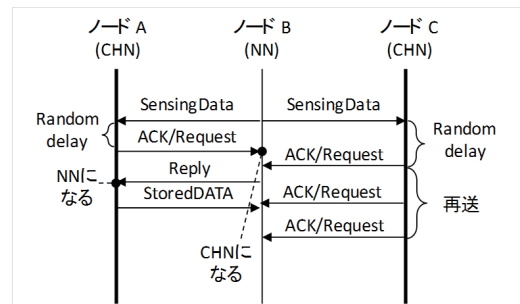


図 8 複数の CHN が同時に 1 台の NN に役割交代を要求した場合

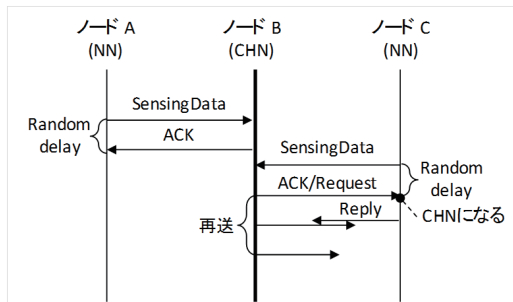


図 7 代表ノード交代時の Reply パケットがロスした場合

は SensingData に対する ACK に代表ノードの交代要求 (Request) を付加して SensingData の送信元の NN にユニキャストする。

- (4) ACK/Request を受信した NN は、CHN に向けて Request を受けて代表ノードの交代を了承したことを示すための応答 (Reply) を返す。
- (5) Reply を受信した CHN は、NN が代表ノードの役割の交代を了承したことを確認し、それまでに回収したデータ (StoredData) を次期 CHN である NN に対してユニキャストする。

CHN から NN への状態変化は CHN が Reply を受信した時、NN から CHN への状態変化は NN が ACK/Request を受信した時行われる。

流れるセンサネットワークでは、ノードの移動や故障等によりトポロジが変化する。そのため、代表ノードの交代中に交代中のノード同士が通信できない範囲に離れるようなことや複数の CHN がネットワーク内に存在することが考えられる。そこで、代表ノードの交代中に交代中のノード同士が通信できなくなった場合について図 6 図 7 を用いて説明する。

図 6 は、CHN の送信する代表ノードの交代要求である ACK/Request が NN に届かず、パケットロスした状態を示している。CHN は、ACK/Request を送信するときに再送タイマを起動し、タイムアウトした後再送を行う。複数回再送を送信しても Reply が返信されなかった場合、代表ノードの交代をやめる。このとき、CHN は Reply を受信していないため CHN のままであり、NN は ACK/Request を受信していないため NN のままである。従って、代表ノードの交代の失敗がシステムに影響を及ぼさない。

図 7 は、複数の NN が送信する代表ノードの交代要求の応答である Reply が CHN に届かず、パケットロスした状態を示している。NN は、ACK/Request を送信するときに再送タイマを起動し、タイムアウトが発生すると再送を行う。複数回再送を送信しても Reply が返信されなかった場合、代表ノードの交代をやめる。このとき、CHN は Reply を受信していないため CHN の状態を維持する。NN は ACK/Request を受信しているため CHN となる。従って、CHN の数が増えることがある。これは、システム全体の消費電力の増加につながる。しかしながら、複数回の再送にも関わらず通信ができなくなったことは、ノード群が分離してしまったことが起因すると考えられる。従って、この CHN の増加は、分離したノード群それぞれに対し CHN ができたとみなすことができる。

周囲に複数の CHN が存在するときに NN が SensingData を送信するときを考える。NN は SensingData をブロードキャストするため、周囲の CHN はどれもその SensingData を受信することができる。この結果、同時に複数の CHN から NN に対して ACK が送信され信号の衝突が起こることが考えられる。ACK を送信する前にはランダムで決定した時間待つことで、信号の衝突の確率を下げる。NN が送信した SensingData に対し、複数の CHN から交代要求付きの ACK である ACK/Request を受信した場合の例を図 8 に示す。この場合、NN のノード B は、最初に届いた ACK/Request の送信元であるノード A と代表ノードの交代を行う。ノード A と代表ノードの交代を始めたノード B に対して、ノード C からの ACK/Request が届いたとき、ノード B はすでに CHN になる準備をしているので、ノード C からの ACK/Request に対しては応答しない。しかしながら、ACK/Request を送信したノード C は、ノード B がすでにノード A からの ACK/Request に応じて CHN になったことを知らないため、ACK/Request の再送を続ける。ノード C は、規定回数だけ ACK/Request を再送しても Reply をノード B より受け取ることが出来なければ、CHN の交代を諦め、CHN としての動作を続ける。

この方法では、CHN が電池切れや故障でネットワーク内から消えた時、NN が観測したデータを AP に送信する方法が無くなってしまう。周囲 CHN が存在しない場合、NN

がセンシングデータをブロードキャストしても ACK は返信されない。このようなことが規定回数発生したら、NN は周囲に CHN がいないと判断し、自らが CHN になる。

#### 4.4 実験方法案と今後の実装方針

流れるセンサネットワークの実験では防水の試作デバイスを水に流して行うことが想定される。しかしながら、実際に水流に流す場合、移動条件が実験変わることが考えられる。実験においては、実環境で起こる様々な条件下で評価を行うことも重要であるが、その一方で同一の移動条件の下で繰り返し実験評価を行うことが重要である。そこで、移動の制御が可能な移動ノードを製作し、移動ノードにセンサノードを載せることで流れるセンサネットワークの実験を可能とする。移動は、水流によるノードの移動を模すためにノードが拡散するような移動条件の設定が行えるのが望ましい。筆者らは、移動条件を入力することで複数の移動ノードの移動スケジュールを生成し、その移動スケジュールを使用して移動ノードの移動を制御することで同一の移動を実現するためのテストベッドの構築を行っている [5]。このテストベッドでは、各々の移動ノードの移動速度を変化させることや、ランダムウォークモデルを基とした移動スケジュールの使用が可能であり、ノードの分散を表現できる。そのため、センサノードを実装した後に、テストベッドを使用した実験を行うことで水流環境を模擬した実環境評価が可能であると考えている。

センサノードの実装には MICA/MOTE[14] や Telos-B [15] 等がしばしば使用される。しかしながら、筆者らはより低価格での実装に向けて拡張性が高く、実装が容易な Arduino [16] と呼ばれるオープンソースのデバイスと IEEE802.14.5 準拠の無線通信モジュールである XBee [17] を使用したセンサノードの実装を行っている。Arduino に内蔵されているシステムクロックは低速であり、時刻精度が十分高くない。そのため、今回設計した時刻同期を使用しない代表ノード選択手法の実装を行い、その後時刻同期を必要とする代表ノードの選択手法の実装を行う予定である。

## 5. まとめ

本論文では、水流環境に小型・軽量の流れるセンサノードを複数流し、限られた AP との接続機会ですべてデータを回収する「流れるセンサネットワーク」について、時刻同期を必要としないデータ回収及び AP 発見のための代表ノード選択手法、代表ノードリレー方式の設計を行った。本手法を用いれば時刻精度の低い低価格なデバイスを使用した流れるセンサネットワークの実現が可能であると考えられる。今後、流れるセンサネットワークにおける代表ノードの選択手法の試作並びにシミュレーションを行い、本論文で議論した時刻精度が流れるセンサネットワークに及ぼす影響を

明確にする。また、今回設計したものより、より省電力かつ高いデータ回収率を維持できる代表ノードの選択手法の開発を進めていく。

#### 参考文献

- [1] 石原進: 間欠通信を行う流れるセンサ群からの情報収集に関する一考察, 情報処理学会研究報告・モバイルコンピュータとユビキタス通信研究会, Vol.22, No.22, pp.1-7 (2010).
- [2] Ishihara, S. and Sato, D.: Active node selection in flowing wireless sensor networks, Proc. 6th international conference on mobile computing and ubiquitous networking pp.8-15 (ICMU 2012) (2012).
- [3] 石原進, 佐藤大輔: アクセスポイントとの間欠的通信機会を持つ流れるセンサネットワークのための優先度を考慮したデータ回収方法, マルチメディアと分散, 協調シンポジウム, pp.1471-1478 (dicomo2012) (2012).
- [4] 三竹一馬, 石原進: 流れるセンサネットワークにおけるデータ回収率の基礎検討, マルチメディアと分散, 協調シンポジウム, pp.1463-1470 (dicomo2012) (2012).
- [5] 前川寛, 石原進: 複数の移動ノードを使った省スペース無線センサネットワークテストベッドの構築, マルチメディアと分散, 協調シンポジウム, pp.597-604 (dicomo2012) (2012).
- [6] 佐藤大輔, 石原進: アクセスポイントとの間欠的通信機会を持つ流れるセンサ群からの情報収集に関する基礎評価, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.111, No.386, pp.101-106, (USN2011)(2010).
- [7] Stoianov, I., Nachman, L., Madden, S., Tokmouline, T. and Csail, M.: PIPENET: A wireless sensor network for pipeline monitoring, Proc. IEEE IPSN 2007, pp. 264-273(2007).
- [8] Kim, J., Lim, J., Friedman, J., Lee, U., Vieira, L., Rosso, D., Gerla, M. and Srivastava, M.: SewerSnort: A drifting sensor for in-situ sewer gas monitoring, Proc.IEEE SECON 2009, pp.1-9 (2009).
- [9] Lai, T., Chen, Y., Huang, P. and Chu, H.: PipeProbe: A Mobile Sensor Droplet for Mapping Hidden Pipeline, Proc. 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp.113-126 (2010).
- [10] University of California, Berkeley, Floating Sensor Network Project: <http://float.berkeley.edu/>
- [11] 芝田浩, 岡辺拓巳, 青木伸一, 北山晋平, 上原秀幸: 海水浴場の表層流観測に対する無線センサネットワークの適用, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.112, No.31, pp.105-110, (USN2012) (2012).
- [12] Heinzelman, W., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, Proc. IEEE 33rd Annual Hawaii International Conference on System Science, pp.1-10 (2000).
- [13] Younis, O. and Fahmy, S.: HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks, IEEE Trans. on Mobile Computing, Vol.3, No.4, pp.366-379 (2004).
- [14] Crossbow: <http://www.xbow.jp/motemica.html>
- [15] Crossbow: <http://www.xbow.jp/telosb.html>
- [16] Arduino: <http://www.arduino.cc/>
- [17] Digi: <http://www.digi.com/xbee/>