

流れるセンサネットワークにおける電力消費と データ回収率に関する評価

三竹 一馬^{†1} 前川 寛^{†1} 秦 小月^{†1} 石原 進^{†1}

概要：下水管の破損箇所の発見のために定期的な検査が必要であるが、高いコストが伴う。そこで、筆者らは低コストで容易に管内の検査を行う「流れるセンサネットワーク」を提案している。流れるセンサネットワークでは、下水管内に複数のセンサノードを流し、ガスの検出や管内の写真撮影を行う。観測データは各ノードがマンホールの蓋の裏に設置されたアクセスポイント（AP）と通信を行うことによって回収される。本システムでは、故障に備えて複数のノードを使用している。各ノードは小型・軽量化のため、小容量の電池の使用を想定しており、観測開始から水路終端へ流れるまで常に起動状態を維持することは難しい。そこで各ノードは省電力化のため、ノード同士で協調して起動休眠を繰り返すことで省電力化を行う。筆者らはこれまで起動ノード選出手法に関して電力消費や移動、データ回収が簡略化されたモデルにより議論を行ってきた。本論文では、各ノードの通信状態における詳細な電力消費モデルを用いて、起動ノード選択手法の電力消費量とデータ回収に関してシミュレーションによる評価を行った。この結果、全ノードが常時起動している時に比べて各起動ノード選出手法が電力消費を抑えていることができてい

ことを確認した。

1. はじめに

近年、下水管などの都市インフラの老朽化が世界的に問題となっている。日本では、高度経済成長期に大規模に整備した都市インフラの老朽化によって、道路陥没や生活用水の汚染など、多くの事故が発生している。それを防ぐために、下水管の検査が定期的に行われている。下水管の検査は人の目視及び遠隔カメラを用いた方法が主であるが、下水管内では、二酸化炭素や硫酸、メタンなどの有害なガスが発生しているため、人が直接管内に入り検査を行うのは危険である。センサやカメラを利用した検査への取り組みも行われているが、それらを利用するためのインフラ設置には多くの費用がかかる。

筆者らは比較的安価で容易に下水管の検査を行うために、流れるセンサネットワークを提案している [1]。流れるセンサネットワークの全体像を図 1 に示す。流れるセンサネットワークでは、上流のマンホールからカメラ等を備えた複数の小型の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、水路の漏れによる紛失に対応できるようにするためである。

本システムでは使用したノードの回収を考えていない。そのため、下水に流されたセンサノード群の観測データは

マンホールの蓋の裏などに設置されたアクセスポイント（AP）を介して無線通信によって回収される。AP の設置場所にマンホールの蓋の裏を選択する理由は、AP のメンテナンスや、AP と外部との通信を容易にするためである。AP をマンホールの蓋の裏付近に設置した場合、立坑の下の下水管内に流れるノードとの通信はマンホール直下から数 m 程度の範囲でのみ可能になると考えられる。そのため、センサノードは限られた AP との通信機会を確実に捉えて、限られた数秒間の通信中に収集したデータを AP へ転送する必要がある。

各センサノードは下水管に複数入れても管に詰まらないようにするため、小型・軽量である必要がある。このため、センサノードに使用する電池には、ボタン電池など小型の電池を使用する。しかし、画像など大容量のデータの転送や、検査を行うための高解像度の写真撮影とそれに伴う照明の点灯には多くの電力を消費する。そのため、本システムの稼働時間が数時間におよぶ場合、常に通信・観測状態を維持することは困難である。したがって、ノードは互いに協調しながら起動と休眠を繰り返す間欠的な動作が必要である。

以上のような環境で、AP との通信機会に確実にノードの起動状態を維持するために、筆者らは固定センサネットワークで用いられているノードのクラスタリング手法を基

^{†1} 現在、静岡大学大学院工学研究科
Presently with Shizuoka University

に、複数のセンサノード間で起動状態を維持する起動ノードを選出し、起動ノードが他のノードが観測したデータを収集して AP へ転送する手法を開発してきた [2][3]。文献 [2][3] では流れるセンサネットワークにおける起動ノード選出手法に関して、セルオートマトンを用いたステップベースのモデルによりデータの回収数やバッファ管理手法の評価を行っている。

これらの評価では流れるセンサネットワークの挙動の評価のため、以下のような点について簡略化されたモデルが使用されている。

電力消費 起動ノードとして選出されたノードの起動時間の電力消費のみを考え、起動ノードのみが各時間ステップで 1 単位ずつ電力を消費する。実際には他の休眠しているノードもセンシング時には起動ノードに対して観測データの転送を行うときにも電力を消費する。そのため、すべてのノードに注目して送受信時や通信待機状態時の消費電力を計算する必要がある。

移動モデル セルオートマトンによって表された次元直線上を各ステップ毎に事前に与えられた確率に従って下流方向のセルに移動するか決定する。

観測範囲 セルオートマトンを用いたモデルにより、各セルに 1 つのデータが存在するとして、セルごとにデータを区別してデータ回収数の評価を行っている。実際にガスの検出や写真撮影などのセンシングを考えた場合、ノードの観測データから観測地点とその周辺の管路の様子を把握できるものとする、複数のノードが観測を行った時のそれぞれのデータから得られる観測範囲には部分的に被覆する範囲が生まれることが考えられる。セルオートマトンを用いたモデルでは、観測地点が一致しているセルのデータのみ被覆したものととしてカウントしている。

本論文ではネットワークシミュレータ QualNet を使用し、各ノードの送受信・通信待機状態における詳細な電力消費モデルを用いて、流れるセンサネットワークにおいて全ノードが常時起動している場合と 3 つの起動ノード選出手法を使用した場合の電力消費量について評価を行う。また、各起動ノード選出手法により回収したデータから得られる観測カバー範囲についても評価する。観測カバー範囲とは、ある観測データの観測地点から半径 r の範囲がカバーできるとした時、AP がノードから回収したデータによってカバーすることができた全領域を示す値である。

以下、第 2 章で関連研究について述べた後、第 3 章で流れるセンサネットワークの想定環境並びに解決すべき課題について述べる。次に第 4 章で、流れるセンサネットワークのための省電力化と AP への確実なデータ転送のための起動ノード選出手法をを説明する、第 5 章で、各種の起動ノード選出手法における通信時の電力消費と、それぞれの観測データから得られる観測カバー範囲についてシミュ

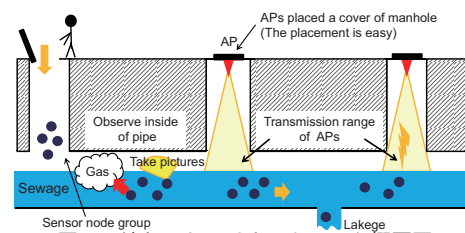


図 1 流れるセンサネットワーク概要図

レーション評価について述べる。最後に、第 6 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として PIPENET[4] がある。PIPENET では、管に沿って配置された複数の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、管に沿っていくつも固定センサを設置するのは設置コストがかかるため、固定センサはより少ない数での利用が望まれる。

本研究のように、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バークレー校の Floating Sensor Network (FSN) Project がある [5]。FSN では、複数のセンサ端末を水流に流し、搭載された携帯電話端末を利用してセンサ外部との通信を行うことで、洪水等での水流の広がりや水質をモニタリングする。また、下水にセンサノードを流してセンシングを行い、収集したデータをマンホール直下に配置された特定の AP から受信するという状況を想定して、ハードウェアの開発やエミュレーションを行っている SewerSnort[6] や、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 PipeProbe[7] がある。筆者らの流れるセンサネットワークで想定しているものはこれらと異なり、既存のインフラの使用を想定せず、管路に流したセンサからデータ回収の信頼性の向上の為に、センサノードと AP 間の通信のみならずノード間の通信を用いる他、個々のセンサノードの小型化、軽量化のために必要電池容量を小さくするための省電力化の工夫を行っていることに特徴がある。

本稿では、流れるセンサネットワークにおける起動ノードの選択手法並びに、各ノードの通信時における電力消費とシステムによる観測データの回収について議論する。このうち、起動ノードの選択手法については、アドホックネットワーク、センサネットワークの省電力化や効率的な通信経路形成のためのクラスタリング手法との関連性が深い。特に、省電力化を目指したクラスタリング方法に関しては、LEACH[8] や HEED[9] の他いくつかの方法が提案されているが、いずれも固定ノードを主な対象とした方法であるうえ、本研究で想定するような AP との遭遇によ

てデータを回収するモデルではない。

3. 流れるセンサネットワーク

本システムでは、水路の上流から複数のセンサノードを投入し、投入したノードが上流から下流まで流れる間にガス検出や画像撮影と言ったセンシング処理を行う。

3.1 想定環境

本稿では流れるセンサネットワークの利用環境として以下のものを想定する。

- 観測対象である下水管は、一般的に複数の流入点から一か所の下水処理場に繋がっている。ノード群が流れると想定している管の距離は約 4km から 8km、地上から管までの深さは数 ~ 10m 程度、管の直径は数十 cm ~ 数 m のものが多く、下水管には通常普段は 0.6m/s から 1.8m/s、雨天時には最大 3.0m/s の速さで水が流れている。
- センサノードは十分に小型・軽量であり、ボタン型電池等の小型・軽量、小容量の電池で駆動する。ボタン電池は一般的に 20mAh ~ 100mAh のものが多い。IEEE802.11 での通信（送受信時、通信待機時で 110 ~ 130mW）を想定すると、この電池容量は常に通信可能な状態を維持し、管内の検査を行うための高解像度の写真撮影や、それに伴う照明の点灯を続けたまま観測領域全体をカバーするのは不十分である。
- 移動中の水没・管の壁やノード同士の衝突などによって、ノードが故障する可能性がある。
- AP の設置位置は、下水管における一部のマンホールの蓋の裏などに限定され、その通信範囲はマンホール直下とその周辺部にのみ限定されるものとする。
- センサノード自身は自ら移動する機構を持たず、水流に依存した移動を行う。その正確な移動経路はセンサノード自身、センサノード以外の機器のいずれも予測できない。また、まとめて流されたノード群であっても、水流によって時間とともに互いの間の距離が長くなり、相互に通信不可能になることがある。
- 観測地点の位置は AP との遭遇時刻等から推測でき、ノードのセンシングによって得られたデータから、そのデータの観測地点から半径 r の範囲がカバーできるとする。しかしながら、ノードの移動が水流に依存しているため、ノードの故障や電池切れ、ノード間及び AP-ノード間の通信の分断によりデータが観測・回収されず、回収された観測データによってカバーされない範囲が生じてしまうことが考えられる。

以上のような条件においても、観測領域全体を隙間なく観測でき、特定の領域での連続した観測データの欠損がないように回収できることが望ましい。

3.2 流れるセンサネットワークにおける課題

流れるセンサネットワークの実現には多くの課題が存在する。その中でも、データ回収に焦点を当てた場合、大きく以下の 2 つの課題が存在する。

● ノードの省電力化

観測対象の水流をノードが流れきる時間に対して、センサノードに搭載された電源によるノードの稼働時間は短い。そのため、最初から継続して稼働し続けた場合、途中で電池切れの状態になり、水路の終端まで稼働状態を維持することができない。そこで、ノード群の一部を起動状態、その他ノードを休眠状態にすることで、ネットワーク全体での省電力化を行いながら、水流のデータ回収を可能にする。また、少なくとも 1 台のノードが起動状態であれば、不定期に得られる AP との通信機会を逃すことなく、ノードが回収したデータを AP へ送信することができると考えられる。そのスケジュールは、お互いに通信可能な範囲に存在しているノードに応じて、動的に変更できる必要がある。

● AP との通信

流れるセンサネットワークでは、多数のセンサノードの観測データを AP との通信を介して、確実に回収することが望まれる。仮にセンサノードが流速 1.5m/s の水流で移動し、マンホール直下の AP と 3 秒間のみ通信可能であるとする。高い圧縮率で保存された 640 × 480 画素の JPEG 画像を想定した 10 ~ 50KB の画像データを転送する場合を考える。IEEE802.11b で通信を行う場合、実質的なデータ転送速度 6Mbps を想定すると、約 15 ~ 75 枚の画像データの転送が可能である。このとき、100m 間隔で設置された AP に対して、数 m おきに撮影した画像データを収集できると言える。しかし、ノードの AP へのデータ転送時、すべてのノードが一度に観測データを転送してしまった場合、お互いの信号が衝突してしまい、観測データが AP へ届く前に欠落してしまうことが考えられる。そこで、あるノードが起動ノードから休眠状態へを切り替える時、それまで収集した観測データを他の起動ノードへの受け渡しを行う。この動作を繰り返すことで、それまでの観測データが一ヶ所に格納されている状態で一部の起動ノードが AP へデータを送信することができると考えられる。

4. 起動ノードの選択手法

4.1 基本戦略

流れるセンサネットワークでは、ノードの故障と電池容量不足を補うため、複数のノードを用い、それらを間欠的に起動・休眠させながら観測データ収集、AP への転送を行う。具体的に、ノード群は以下のように動作する。

- 一部のノードを一定期間起動状態にしておく。
- 他のノードは間欠的に起動して観測を行った後、そのデータを通信範囲内に存在する、起動ノードに転送する。

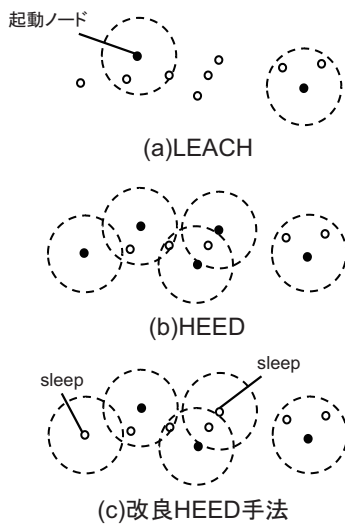


図 2 起動ノード選択手法の比較

- 起動ノードは AP との通信可能範囲に到達した時、自身の観測データと他のノードから受信したデータを AP へ転送する。

起動ノードの選択に当たり、単純なラウンドロビンスケジュールで起動ノードを切り替える場合、少なくとも 1 台のノードが起動するような状況を作ることができる。しかし、ノードの移動は水流に依存しているため、事前に定められた起動スケジュール通りに動作すると、ノード群の分断やノードの故障によりノード同士が通信不可能になることがある。この場合、起動ノードが他ノードから観測データを受け取ることができず、AP は起動ノードとの通信時にすべてのノードの観測データを回収することができない。従って、ノードの残存電力やノード間の接続性に依りて適切に起動ノードを選択する必要がある。筆者らは省電力化を目的として固定のセンサネットワーク向けに開発されたクラスタリング方式 LEACH[8] と HEED[9] を流れるセンサネットワークに応用し、HEED を改良した手法（以下、改良 HEED 方式）を設計した。以下、LEACH ベースの手法、HEED ベースの手法、改良 HEED 方式の概略を説明する。図 2(a)~(c) にそれぞれの起動ノードの選択手法の特徴を示す。

4.2 LEACH ベースの手法

LEACH では、図 3 のようにすべてのノードが定期的にある確率に従って起動ノードとして立候補することで起動ノードを決定する。立候補したすべてのノードは次の選出処理まで起動ノードとして動作する。この立候補の確率は、起動ノードになっていない期間が長くなるほど大きく、かつ、平均的にはシステムに与えられた基準値 P_{LEACH} に従うように制御される。

4.3 HEED ベースの手法

HEED でも LEACH と同様にすべてのノードが図 3 の

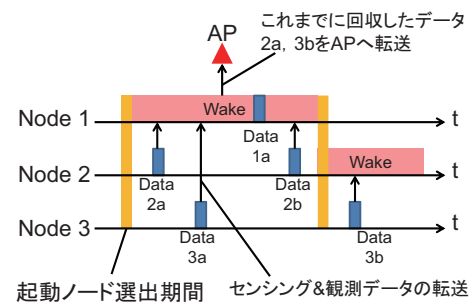


図 3 起動ノード選出処理

ように定期的に短期起動状態となって起動ノードの選出処理を行うが LEACH とは異なり、すべてのノードが自身を含めて少なくとも 1 台以上の起動ノードに接続できるように起動ノードが選出される。まず各ノードは自身の残存電力及び他のノードとの接続状態などから得られるコストに従って起動ノード立候補確率 P_{HEED} を以下のように算出する。

$$P_{HEED} = \max(p_{CH} \cdot E_{residual} / E_{max}, p_{min})$$

選出処理の始めに各ノードは自身の P_{HEED} に従って起動ノードに立候補し、自身の ID とコスト、並びに自身が起動ノード候補であることをブロードキャストにより、1 ホップで通信可能なノードに通知する。その後、すべてのノードは P_{HEED} を 2 倍した後、再び P_{HEED} に従って立候補パケットの送信を行う。以降、 P_{HEED} が 1 以上になるまで立候補パケットの送信処理を繰り返す。この繰り返し処理の回数は p_{min} によって制限される。文献 [9] では $p_{min} = 0.005$ とし、最大 12 回の繰り返しで処理が完了するようにしている。

起動ノードに立候補したノードは、他のノードからブロードキャストされた情報に基づいて、自らの通信可能範囲で立候補している自身を含む起動ノード候補ならびに起動ノードと確定されたノードにおいて、自身のコストが最も低いとみなすと、再度自身が起動ノード候補であるとブロードキャストで通知する。ただし、この時点で自分自身の P_{HEED} が 1 以上になっていた場合、自身が最終的な起動ノードになったことをブロードキャストで通知する。また、各ノードは自分の周りから起動ノード候補からの通知を得ていないと、その時点での P_{HEED} に従って立候補し、自身の ID とコスト、起動ノード候補であることをブロードキャストする。立候補パケット送信処理の後、これまでの処理で起動ノードになっていないノードは、その時点で最終的な起動ノードであることを通知済みのノードの中からコストがもっとも小さいものを自身の属する起動ノードとする。

以上の処理により、この手法では各ノードの 1 ホップ以内のノード群の中に必ず起動ノードが存在するように起動ノードが選出されるため、理想的には起動ノードと通信ができないノードは存在しない。しかしながら、ノードの

通信可能範囲に他のノードが存在しない場合、そのノードが常に起動ノードになり、電力の消費が多くなる。また、LEACH と比べて代表ノードの選出のために行う通信が多いため、それにかかる電力消費も大きい。

4.4 改良 HEED 方式

改良 HEED 方式では、ノード密度が低い場所で選出された起動ノードに関して、起動ノードであっても起動状態を維持させるのではなく、確率に従って定期的に休眠させる。HEED における選出処理では、ノードの通信可能範囲内に存在している他のノードの数が少ないほど、そのノードが起動状態になる時間が長くなり、電池切れになるのが早くなってしまふ。そこで、改良 HEED ではノードの密度に応じて起動ノードも休眠させることで、より長期間の観測を可能にする。この休眠させる確率 p_{sleep} は次の式に従って、隣接ノード数 $N_{\text{neighbors}}$ と全ノード数 N_{all} の比が小さいほど休眠する割合が大きくなるように計算される。

$$p_{\text{sleep}} = 1 - \max(\min(\alpha N_{\text{neighbors}}/N_{\text{all}}, 1), p_{\text{min_sleep}})$$

休眠の実施の判定は周期 T_{sleep} 毎に行う。休眠することが決定すると、そのノードは次の休眠判定まで周期 T_{sleep} の間、休眠状態となる。この期間の間は選出された起動ノードは他のノードが観測したデータを受信することも AP を検出することもできない。従って、その間のデータ回収率は低下するが、その一方で HEED の場合よりも起動ノードの電力消費を抑えているので、ノードはより長い時間稼働することが可能であり、最終的に広い範囲に渡る観測とデータ収集が可能となる。

5. シミュレーション評価

本研究では既存のネットワークシミュレータ QualNet (ver5.1) [10] を用いて、詳細な電力消費モデルの下、流れるセンサネットワークにおける起動ノードの選択手法に関して観測地点に応じた管路の観測カバー範囲に関して評価した。流れるセンサネットワークにおける起動ノードの選択手法に関して、筆者らはこれまでにセルオートマトンを用いたモデルによりデータの回収数やバッファ管理手法の評価を行ってきた [2][3]。これらの評価で用いたモデルにおける電力消費は、起動ノードのみが各時間ステップで 1 単位ずつ電力を消費するのみとなっている。また、セルオートマトンを用いたモデルでは各セルに 1 つのデータが存在するとして、セルごとにデータを区別してデータ回収数の評価を行っていた。実際にガスの検出や写真撮影などのセンシングを考えると、ノードが観測を行った時、その観測データから観測地点とその周辺の管路の様子を把握できると考えられる。そこで本章での評価ではセンサの観測可能範囲を考慮してシステム全体での観測カバー範囲について調べる。

5.1 シミュレーションモデル

● 観測領域

4000[m] の一次元直線上の下水管を測定する、3600 秒のシミュレーションを行った。この時間は、平均 1.5m/s で動くノード群がノードが 4000m を流れ切るのに十分な時間である。各ノードの移動は x 軸の正方向のみとする。移動に伴うノードの位置のばらつきを模擬するため、このモデルでは各ノードが 1m 進む毎に速さを以下のように変更する。ある時刻 t の速度を v_t m/s とすると、1m 進んだ後の速度を $v_{t+1} = v_t \pm v_t/10$ とする。この速度はあらかじめ与えられた $v_{\text{min}} \leq v \leq v_{\text{max}}$ の間で変化する

● データの取得と通信

各ノードは T_s 秒の時点で観測を行い、1 度の観測で現在位置のデータ 10KByte のデータを取得し、自身の通信範囲内に存在する起動ノードへ観測データを転送する。これは以下の議論に従って設定される。ノード数 N 、平均流速 v m/s、観測半径 r とした時、全ノードが $2r$ 間隔で観測を行った場合、最小の観測間隔で観測対象全体を観測することができる。従って、ノード群が広がることなく流れたならば、各ノードは時間 $T_s = 2rN/v$ で観測を行うことで観測対象全体を観測する事ができる。本シミュレーションでは $N=10$ 、 $v=1.5$ m/s、観測半径 $r=0.5$ m とし、観測間隔は $T_s = 6.6$ と計算される。

各ノードは取得したデータを自身のバッファ内に保存した後、同じデータを起動ノードへ転送する。各ノードは First-In First-Out (FIFO) に従ってデータ転送を行う。また、観測データを起動ノードへ転送したり、起動ノードの交代時にそれまで収集したデータを引き継いだりする時には、バックアップのため、データ転送後も自身のバッファに保存されているデータは破棄しない。ノード間の通信は IEEE802.11 を用いて、0dBm の送信出力で通信を行っている。起動ノードは観測データを受信した時、センシング時と同様に自身のバッファ内に受信データを保存する。ここで自分のバッファと起動ノードが二重にデータを保存するようにしているのは、どちらかのノードが故障や電池切れになった時に対処できるようにするためである。各ノードのバッファに保存されているデータは、そのノードが起動ノードとして選出され、AP にデータを転送した後に破棄される。起動ノード選択手法で用いられるパラメータはそれぞれ表 1 のようになっている。

● AP

本モデルではノードから観測データの回収を行う AP が 250m 間隔で水路沿いに配置されている。各 AP は自身の ID を含んだビーコンを 1 秒間隔で送信しており、起動ノードはビーコンを受信した時点で、AP の通信可能範囲内に存在していることを知り、観測データの転送を開始する。実際の下水管は地上から約数 ~ 10m の位置に埋まっており、AP の電波はコンクリート管や地面の土により減衰してし

表 1 各起動ノード選択手法に関するパラメータ

パラメータ	値
P_{LEACH}	0.5
P_{CH}	0.4
HEED でのコスト	残存電力量
α	1.0
p_{min_sleep}	0.3-0.5
T_{sleep}	0.5s
起動ノード更新周期 T_{CH}	180s

表 2 各状態時の電力消費 [mW]

Transmit mode	100.0
Receive mode	130.0
Idle mode	120.0
Sleep mode	0.0

まう．そのため，AP の通信可能範囲はマンホールの直下とその周辺になると考えられる．そこで，AP のビーコン送信出力を-20dBm と設定した．これにより起動ノードがビーコンを受信する位置を AP の位置付近にすることで通信可能範囲の制限を表現している．また，起動ノードはビーコンを受信した後，AP の通信可能範囲内に存在している間に N_d 個の観測データが転送可能であると判断し，UDP によって N_d 個の観測データを転送する．仮にセンサノードが流速 1.5m/s の水流で移動し，マンホール直下の AP と 3 秒間のみ通信可能であるとする．センシングによって得られた 10KB のデータを転送する場合を考える．IEEE802.11b で通信を行う場合，実質的なデータ転送速度 6Mbps を想定すると，約 75 個の観測データの転送が可能である．

● 電力消費モデル

各ノードの状態はデータの転送を行う Transmit mode，データを受信する Receive mode，送受信を行わないが通信待機している状態である Idle mode，送受信を行わず省電力化状態である Sleep mode の 4 つの状態をとる．各状態の電力消費を表 2 に示す．

今回はセンシングよりも通信に消費される電力が主であるとみなし，通信に使用される電力のみについて計算を行う．初期電力は 20mAh とした．この時，全ノードが常時起動していた場合にも観測領域を流れ切るまでに電池切れにならない．

● 故障モデル

各ノードは 1s 毎に確率 P_b に従って故障判定を行う．故障したノードはそれ以降，他のノードや AP との通信や管内の観測を行うことはできない．

5.2 評価指標

5.2.1 電力消費

すべてのノードが常に起動している状態，LEACH，

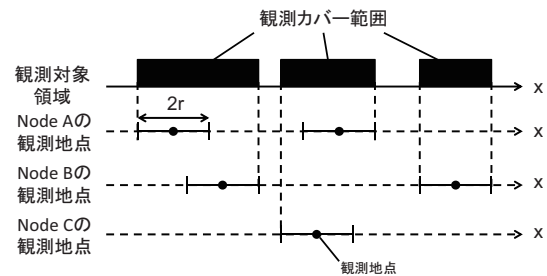


図 4 観測カバー範囲

HEED，改良 HEED 手法を用いた時のシミュレーション終了時におけるノード 1 台の平均電力消費量を比較する．観測範囲を流れきるまでに故障しなかったノードの，シミュレーション終了までの電力消費量の平均をとった値を比較する．

5.2.2 観測カバー範囲

重複部分も含め，複数の観測点での観測データによる観測領域の観測カバー範囲を計算する．各ノードはシミュレーション時間が T_s [秒] に現在位置のデータを取得し，自身の所属する起動ノードへ観測データを送信する．観測領域（一次元）内の観測地点の座標を x ，そのデータから観測できる範囲の半径を r とすると，観測データから $[x - r, x + r]$ で観測対象を表すことができる．図 4 のように観測領域を表す線分上に対して，全観測点の座標の前後に観測点に対する観測領域半径 r の部分に色を塗った時，色の塗られた部分の範囲を観測カバー範囲 [m] とする．

5.2.3 観測点の偏り

観測地点の地理的偏りを調べる為に，データ回収を行った観測点間の距離の Fairness Index[11] について評価を行った．データを回収できた観測点間の距離 g_i に対して以下の式で計算される．

$$f = \frac{(\sum_{di=1}^N g_i)^2}{N_d \sum_{di=1}^N g_i^2}$$

ここで N_d はデータを回収できた地点の数である． g_i のばらつきが小さいときほど f は大きくなり，回収されたデータの地理的偏りが小さいことを意味する．

5.3 シミュレーション結果

故障確率と移動速度を変化させた時の，1 台あたりの平均電力消費量と観測カバー範囲に関するシミュレーション結果について示す．全ノードを常に起動状態にしていた場合と，3 つの起動ノード選択手法により一部のノードを起動状態にしていた場合を比較する．表 1 に示す LEACH ベースの手法における P_{LEACH} ，HEED ベースの手法における P_{CH} ，改良 HEED 手法における P_{min_sleep} は，観測カバー範囲の平均が最大となった時の値としたときのものである．改良 HEED 手法における P_{CH} は HEED ベースの手法を評価した時の値と同じものを使用した．各条件におけるシミュレーションの結果の値は，それぞれ 10 回の試

表 3 シミュレーション終了時におけるノード 1 台当たりの平均電力消費量 (流速 1.3-1.7m/s) [mA]

故障確率	常時起動	LEACH	HEED	改良 HEED
0.0002	50408.5	28153.8	13448.8	5122.5
0.0001	50424.2	28421.8	12809.3	5485.7
0	50465.5	28262.4	12616.5	5061.6

表 4 シミュレーション終了時におけるノード 1 台当たりの平均電力消費量 (流速 1.2-1.8m/s) [mA]

故障確率	常時起動	LEACH	HEED	改良 HEED
0.0002	51167.1	28853.8	14732.9	5694.9
0.0001	51206.0	28421.8	12836.3	5732.7
0	51281.7	28262.4	12616.5	5348.1

行の平均値である。また、移動速度については平均速度は同じであるが、とりうる速度の値の区間 $[V_{max}, V_{min}]m/s$ を変化させた場合についても評価した。この区間が広いほど、時間が経過した時のノード群の広がりが大きくなりやすい。故障確率 (0.0002, 0.0001, 0) はあるノードが 4km の範囲を平均流速 1.5m/s で流れきる時点で、故障していない確率がそれぞれ (50%, 75%, 100%) であるような値である。

シミュレーション終了時のノード 1 台あたりの平均電力消費量を表 3, 表 4 に示す。流速 $[1.3, 1.7]m/s$, 故障確率 (0.0002, 0.0001, 0) の時、常時起動時の電力消費量に比べて LEACH では (約 45.1%, 約 43.6%, 約 44.0%), HEED では (約 73.3%, 約 75.6%, 約 75.0%), 改良 HEED では (約 90.0%, 約 89.1%, 約 90.0%) 電力消費を抑えることができたことがわかった。流速 $[1.2, 1.8]m/s$, 故障確率 (0.0002, 0.0001, 0) の時、常時起動時の電力消費量に比べて LEACH では (約 43.6%, 約 44.1%, 約 44.1%), HEED では (約 71.2%, 約 75.0%, 約 75.7%), 改良 HEED では (約 89.9%, 約 89.8%, 約 89.5%) 電力消費を抑えることができたことがわかった。

LEACH では近隣ノードの数に関わらず自身が起動するかを決定するため、故障確率やノード群の拡散により電力消費量は大きく変化しなかった。HEED では残存電力に応じて起動ノードの選出を行うが、各ノードの残存電力が少なくなった場合には起動ノード選出のための処理が多くなってしまふ。さらに、近隣ノードの故障やノード群の拡散により孤立したノードが生まれてしまった場合にはそのノードの電力消費が大きくなってしまふ。表 4 から故障確率が高く、ノード群が拡散しやすい場合には、他の場合に比べて僅かであるが電力消費量が増えていることが分かる。しかしながら、常時起動時に比べてノード 1 台当たりの平均電力消費量は約 70~75% であり、うまく省電力化できているといえる。

各条件における観測カバー範囲を図 5, 図 6 に、観測点間距離の Fairness Index に関するグラフを図 7, 図 8 示す。

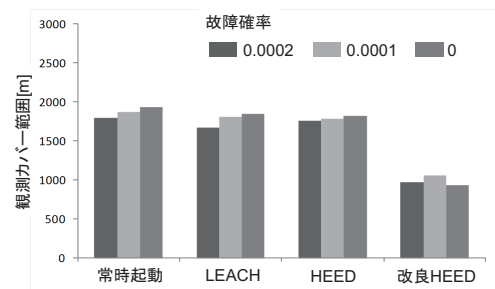


図 5 観測カバー範囲 (流速 1.3-1.7m/s)

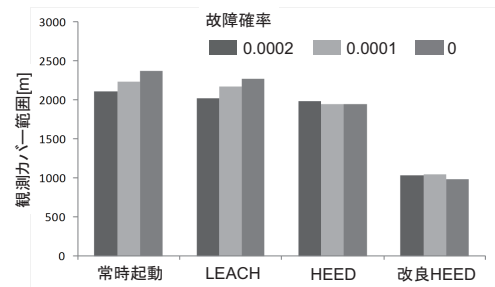


図 6 観測カバー範囲 (流速 1.2-1.8m/s)

LEACH を使用した時に得られた観測カバー範囲は常時起動時とほぼ同じ範囲が得られた。LEACH ではノード群から起動ノードを選択する事によって一部のノードが AP と通信を行うのに対し、常時起動時にはすべてのノードが AP へデータを転送する可能性があるため、AP へ転送されるデータの総量は定時起動時の方が多くなる。しかし、常時起動時では AP の通信範囲を通過した際に、一度に多くのノードが観測データを転送することによって信号が衝突してしまひ、一部のデータが損失してしまうことが考えられる。LEACH では一部のノードのみを起動させ、複数のノードの同時送信による信号の衝突を防いでいると考えられる。今回の評価ではどの手法でも故障確率や流速を変化させた時の観測カバー範囲に大きな違いは見られなかった。これは FIFO で観測データを転送することによって、観測データの地理的な偏りが出てしまっているためである。また、観測データを起動ノードに転送するときや起動ノード交代時におけるデータの引き継ぎ時に、データ転送後も自分のバッファ内のデータを破棄しないため、観測データの重複が生じてしまっているため、観測カバー範囲が 4000m に大きく届いていない。ここから、起動ノードは AP との通信時にデータの重複や複数のデータによる観測範囲の被覆がなるべく生じないようにバッファを管理し、データを転送する必要があることがわかった。

6. まとめ

下水管に小型のセンサノードを複数流し、接続機会が限定される AP を介してデータを収集するシステム「流れるセンサネットワーク」において、通信における詳細な電力消費モデルを用いて、全ノードが常時起動している場合と、3つの起動ノード選出手法に関して電力消費量の評価

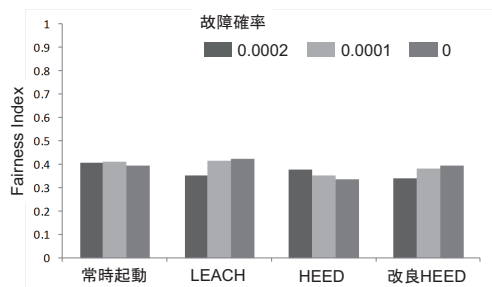


図 7 観測点間距離の Fairness Index (流速 1.3-1.7m/s)

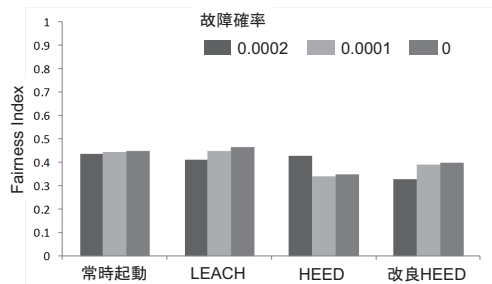


図 8 観測点間距離の Fairness Index (流速 1.2-1.8m/s)

を行った．常時起動時に比べて各起動ノード選出手法が電力消費を抑えていることができたことを確認した．また，観測地点から把握できる領域を観測カバー範囲とし，それぞれの手法における観測カバー範囲と観測地点間の距離の Fairness Index に関して評価した．改良 HEED では他の起動ノード選出手法にくらべて大きく電力消費量を抑えていることができたが，休眠時間が長い分観測カバー範囲が短くなってしまっている．そのため， P_{HEED} ， P_{min_sleep} の他にも，ノード数や起動ノード選出間隔等のパラメータを変化させ，観測カバー範囲が広がるようなパラメータ設定を行うことが必要であることがわかった．

今回行ったシミュレーション評価では常にすべてのノードは FIFO でデータを転送していたために AP の回収したデータに地理的な偏りが出てしまい，どの手法においても Fairness Index が低くなってしまった．データ転送の際には，重複したデータを送らないようにするバッファ管理を行う必要がある．今後は，AP へ転送するデータを選択するためのバッファ管理手法を実装し，センシングを含めた電力消費や時間変化に応じた観測間隔など，詳細なシミュレーション評価を行い，流れるセンサネットワークにおける効果的な制御手法を検討する予定である．

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, Vol.2010, No.22, pp.1-7 (2010).
- [2] 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的評価, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.111, No.386, pp.101-106 (2010).
- [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 (DICOMO2012), pp.1463-1470, 2012.

- [4] 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).
- [5] University of California, Berkeley, Floating Sensor Network Project, <http://lagrange.ce.berkeley.edu/fsn/>
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] Heinzelman, W., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H.: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, *Proc. IEEE 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences 2000*, pp. 1-10 (2000).
- [9] Younis, O. and Fahmy, S.: HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 3, No. 4, pp. 366-379 (2004).
- [10] QualNet <http://web.scalable-networks.com/>
- [11] Jain, R.: Throughput fairness index: An explanation, ATM Forum Contribution 99-0045 (1999).