

大規模センサネットワークにおける 移動型収集ノードを用いたデータ収集方式

義久 智樹^{†1} 西尾 章治郎^{†1}

近年、センシング領域を移動して各センサからデータを収集する移動型収集ノードを用いたセンサネットワークが注目されている。移動型収集ノードを用いることで、センサネットワーク内の通信量や維持コストを削減でき、大規模なセンサネットワークの構築が可能になる。短時間で多くのデータを収集するために幾つかの移動型収集ノードを用いた手法が提案されているが、公平性が考慮されておらず、移動型収集ノードと各センサとの通信時間に偏りが生じるという問題があった。そこで、本研究では、公平性を考慮したデータ収集方式を提案する。提案方式では、移動型収集ノードが周辺のセンサを探索し、発見したセンサと通信する。センサとの通信時間に上限を設けることで、通信時間の偏りを軽減する。評価を行った結果、提案手法は公平性を確保できることを確認した。

A Data Collection Method for Large-Scale Sensor Networks with Mobile Sink

TOMOKI YOSHIHISA^{†1} and SHOJIRO NISHIO^{†1}

Recent studies on wireless sensor networks exploit mobile data sinks. A mobile sink travels through the sensor field and collects data from each sensor. By using the mobile sink, we can develop large-scale sensor networks since it can reduce the network traffic and the maintenance cost. Although some data collection strategies have been proposed, they do not consider the fairness for communication time among sensors. In this paper, we propose a data collection method considering fairness. In our proposed protocol, the mobile sink polls neighboring sensors and then starts communicating with one of them. Setting a limit on the communication time enables the communication time for each sensor to be fair. Evaluation of this protocol demonstrated its ability to ensure fairness.

1. はじめに

近年、カメラや温度センサといった小型のセンサで構成される無線センサネットワークに注目が集まっている。従来のセンサネットワークでは、シンクノードと呼ばれる端末がセンサネットワークを経由してデータを収集している。この方式では、センサネットワーク内で多くの通信が発生し維持コストの増大につながる。このため、大規模なセンサネットワークを構築するために移動型収集ノードを用いた方式が研究されている。

移動型収集ノードを用いた方式では、図1に示すように、移動型収集ノードがセンシング領域を移動して各センサからデータを収集する。この例では、シンクノードを備えたバスが街中を移動し、移動型収集ノードとしての役割を果たしている。環境内には複数のセンサがあり、移動型収集ノードが移動して各センサと通信し、データを収集する。移動型収集ノードには、シンクノードをもつ車やロボット、動物といった幾つかの種類がある。詳細な議論は3.1節で行う。

移動型収集ノードを用いた方式には大きく分けて二つの利点がある。まず、移動型収集ノードがセンサから直接データを収集するため、ネットワーク内で発生する通信を削減でき、維持コストを抑えられる。また、従来の手法ではシンクノード付近のセンサは他のセンサのデータを転送する必要がある。しかし、移動型収集ノードを用いることで、データが直接転送されるため、転送するデータ量を削減できる。このため、通信時間を短縮でき、センサの消費電力の削減につながる。

しかし、移動型収集ノードを用いた方式では、データを効率的に収集しなければ十分なデータを収集できないという問題が発生する。データの収集戦略には、経路選択と通信プロトコルの二つの点が重要になる。まず、収集できるデータ量は移動型収集ノードの経路に依存する。経路とは、ネットワークの経路ではなく、移動型収集ノードが実際に動く経路を意味する。例えば、移動型収集ノードの経路上の通信範囲内にセンサが一つもなければ、データを収集できない。次に、収集できるデータ量は移動型収集ノードとセンサの通信プロトコルに依存する。移動型収集ノードは、まずセンサを探索し、発見したセンサの一つと通信する。通信が終了すると、次に通信するセンサを探索する。移動型収集ノードは、適切な通信プロトコルを用いなければデータを効率的に収集できない。

^{†1} 大阪大学
Osaka University

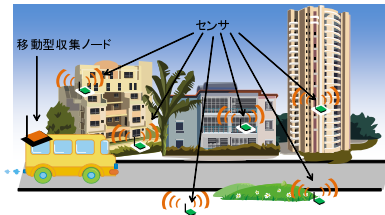


図1 移動型収集ノードを用いたセンシングシステム
Fig.1 A mobile data sink system

移動型収集ノードを用いた方式には多くの研究課題があるため、現段階ではまだ体系立てられていない。このため、これまでのデータ収集方式は、直感的で簡単なものが多い。短時間で多くのデータを収集するために幾つかの移動型収集ノードを用いた手法が提案されているが、公平性が考慮されておらず、移動型収集ノードと各センサとの通信時間に偏りが生じるといった問題があった。センサネットワークにおいて公平性は重要であり、収集ノードが移動しない状況での公平性について研究が行われている^{1),6),9)}。例えば、移動型収集ノードがすべてのセンサからデータを収集しようとする、通信時間が非常に長くなる。このため、移動型収集ノードを用いたデータ収集方式においても公平性を考慮することは重要である。

そこで、本研究では、公平性を考慮したデータ収集方式を提案する。提案方式では、移動型収集ノードが周辺のセンサを探索し、発見したセンサの一つと通信する。公平性を制御するために、センサとの通信時間に上限を設け、通信時間の偏りを軽減する。計算機シミュレーションで公平性に関する評価を行った結果、提案手法は公平性を向上できることを確認した。

以下、2章で関連研究を説明し、3章でセンサネットワークのモデル化を行う。4章で提案手法を説明し、5章で評価を行う。最後に6章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

移動型収集ノードを用いた手法が幾つか提案されている。

Shahらは *Data MULE* と呼ぶ移動型収集ノードを提案している⁵⁾。Data MULE はランダムに移動し、通信範囲内にセンサがあるとデータを収集する。環境内には幾つかのアクセスポイントがあり、通信範囲内にアクセスポイントがあると、収集したデータを送信し、データの転送を完了する。この論文では、データ転送の成功率を評価している。しか

し、Data MULE がランダムにしか動かず、センサやアクセスポイントの有無で通信を行っている等、研究が初期段階であった。

そこで Sugihara らは Data MULE のスケジューリング問題を明確に定義している⁷⁾。この研究では、Data MULE の経路選択や通信プロトコルを制御できると想定しており、出来る限り短い時間で全てのセンサからデータを収集するための Data MULE の制御方法について議論している。さらに、経路選択について詳しく議論している⁸⁾、この手法では、動的計画法を用いて最適な経路を導出している。初めに適当な経路選択手法で経路を決定し、冗長な経路を短絡していくことで効率の良い経路を作成している。また、Luo らは円状にセンサが配置されている場合の経路について議論している³⁾。この論文では、円状にセンサが配置されている場合、外周に沿って移動型収集ノードが動く場合に、最も消費電力を削減できることが示されている。しかし、これらのいずれの研究においても公平性が考慮されていない。

複数の移動型収集ノードを用いた手法が提案されている²⁾。提案手法では、移動型収集ノードの負荷が公平になるように移動型収集ノードの通信時間を制御している。しかし、センサの通信時間の公平性は考慮されていない。

本論文では、センサの通信時間の公平性を問題視し、公平性を確保するためのデータ収集方式を提案する。公平性を問題視している点が、これまでの研究と異なる。

3. センサネットワークのモデル化

1章で記述したように、移動型収集ノードを用いたデータ収集方式では、経路選択と通信プロトコルが重要になる。本章では、これらについて説明する。

3.1 移動型収集ノードの経路

本節では、移動型収集ノードの経路について説明する。移動型収集ノードには幾つかの種類がある。まとめたものを表1に示す。この表では、経路と同時に制御の有無についても示している。タイプ I は最も基本のタイプであり、移動型収集ノードを制御できず、経路は固定されている。移動型収集ノードは、決められた経路に従って移動する。例として、シンクノードを備えたバスが街中を移動する場合が挙げられる。タイプ II は経路が準固定である。準固定とは、経路が固定されていないが、車が車道しか走れないように何らかの制約があることを意味する。例えば、街中を移動するタクシーが考えられる。タイプ III の経路は自由で、シンクノードをもった動物が牧場を移動する場合が例として挙げられる。タイプ IV の移動型収集ノードは制御が可能で、経路が固定されている。例として、シンクノー

表 1 移動型収集ノードの種類

タイプ	制御	経路	移動体 例	移動場所
I	不可	固定	バス	街中
II	不可	準固定	タクシー	街中
III	不可	自由	動物	牧場
IV	可	固定	ベルトコンベヤー	工場
V	可	準固定	車*	街中
VI	可	自由	ロボット	部屋

*運転者はシステムの関係者

ドを備えた工場内にベルトコンベヤーが挙げられる。経路は固定されているが、方向やスピードを制御できる。タイプ V は制御が可能で経路が準固定の、シンクノードをもった車や自転車、人間が例として挙げられる。ここで、車や自転車の運転者は、センサネットワークシステムの関係者とする。バスやタクシーの運転者はシステムとは無関係な場合が多いため、タイプ IV や V になる。タイプ VI は制御が可能で経路が自由である。例えば、部屋の中の掃除ロボットが挙げられる。

3.2 移動型収集ノードの通信方法

本節では、移動型収集ノードの通信方法について説明する。移動型収集ノードは、一般に以下に述べる三つのステップで通信を行う。

(1) 探索

まず、移動型収集ノードは周辺のセンサを探索する。探索を行うために、ビーコンと呼ぶデータを送信する。ビーコンのデータサイズは非常に小さく、すぐに送受信が完了する。このため、ビーコンの送受信にかかる時間は無視できるほど小さい。センサがビーコンを受信すると、通信衝突を回避するためにランダムな時間だけ待って、ビーコンに対して返信する。この返信のデータサイズも非常に小さく、送受信にかかる時間は無視できる。ランダムな待ち時間は MAC (Media Access Control) 層においてバックオフ時間と呼ばれ、衝突回避のためによく使われる方法である。待ったにもかかわらず衝突が発生すると、バックオフ時間を更新し、再び更新されたバックオフ時間だけ待って返信を行う。探索が終了すると、移動型収集ノードは発見したセンサの一つと通信を開始する。探索を終了するタイミングは通信プロトコルによって異なり、あるセンサが返信した時点で終了することや、探索開始から一定時間待ってから終了し、その間に返信したセンサと通信することが考えられる。

(2) 通信開始

移動型収集ノードは探索終了後、通信を開始する。実際のセンサネットワークと合わ

せて同時に一つのセンサとしか通信を行わない。移動型収集ノードは移動しており、通信開始時には発見したセンサの通信範囲外にいる可能性があるため、探索して発見したセンサと必ずしも通信できるとは限らない。通信できなかった場合、移動型収集ノードは他のセンサとの通信を試みる場合や、再び探索を始めることが考えられる。

(3) 通信終了

通信終了時刻も通信プロトコルによって異なる。例えば、一定期間通信を行うと通信を終了する場合や、センサからすべてのデータを収集してから通信を終了することが考えられる。通信を終了すると、移動型収集ノードは再び探索を始める。

3.3 本論文の目的

本節では、前節までに説明したモデルに基づき、本論文の目的を詳しく述べる。

● 公平性の重要性

収集ノードが移動しない状況での公平性に関する研究が行われている^{1),6),9)}。通信時間が公平でなければ、センサが移動型収集ノードと通信できない可能性があるため、移動型収集ノードにおいても通信時間を公平に与えることは重要である。すべてのセンサは計測したデータを保持しているため、移動型収集ノードは出来るだけ多くのセンサと通信する必要がある。例えば、移動型収集ノードがすべてのセンサからデータを収集しようとすると、通信時間が非常にながくなる。よって移動型収集ノードを用いたデータ収集方式において、公平性を考慮することは重要である。

● 目的

本論文の目的は、合計通信時間を維持しつつ、各センサの通信時間が公平になるように通信時間を制御することである。合計通信時間とは、移動型収集ノードと各センサとの通信時間の合計である。上述したように、公平性は重要であるが、一方、合計の通信時間は長いほど多くのデータを収集できることになるため、合計通信時間を維持する方が望ましい。このため、合計通信時間を維持しつつ公平性を確保する必要がある。

● 想定

移動型収集ノードのタイプに応じて 6 種類の想定が考えられる。例えば、移動型収集ノードがタイプ I の場合、制御できず経路が固定の移動型収集ノードを用いてデータ収集することになる。ただし、いずれの想定においても、移動型収集ノードは前節で述べた三つのステップで通信を行う。

● 入力

まず、センサに関して、センサの配置と各センサがもつデータ量が入力となる。また、

移動型収集ノードに関して、通信範囲と通信帯域が入力として考えられる。移動型収集ノードがタイプ I, II, III の場合には、制御できないため、速度のパターンが入力となる。さらにタイプ I, II, IV, V の場合には、経路が固定されているため、移動経路も入力となる。

● 評価指標

本研究の目的は公平性を確保することであり、公平性が直接の評価指標となる。しかし、公平性の定義は様々であるため、本論文では、ジニ係数を用いて公平性を定義する。ジニ係数については 5.2 節で詳しく述べる。

また、合計通信時間を維持する必要がある。合計通信時間とは、移動型収集ノードと各センサとの通信時間の合計である。合計通信時間も評価指標となる。

4. 提案方式

6 種類の移動型収集ノードがあり、それぞれに適したデータ収集方式があるが、本論文では、タイプ I の移動型収集ノードに焦点を当てて方式を提案する。

これは、まず、タイプ IV, V, VI は制御可能であり、タイプ I, II, III に比べて問題が簡単なためである。最も簡単な解決法としては、公平性を確保できるように移動型収集ノードを移動させたり停止させたりして制御することでタイプ IV, V, VI における公平性の確保は可能になる。このため、タイプ I, II, III の移動型収集ノードにおいて公平性を確保するデータ収集方式を提案することが必要である。

次に、タイプ I, II, III のうち、タイプ II, III は経路が準固定か自由である。1 章で述べたように、移動型収集ノードの制御においては経路選択と通信プロトコルが重要である。経路選択については、既存研究で幾つか手法が提案されており、これらの手法を応用できる⁸⁾。このため、タイプ I, II, III において適切な通信プロトコルが必要とされている。通信プロトコルの観点から見ると、タイプ I, II, III はタイプ I と同じであるため、本論文は基本的なタイプ I に焦点を当てる。

最後に、それぞれのタイプに適切なデータ収集方式を提案することも可能だが、この場合 6 個の方式を提案することになり、論文としてのまとまりが悪くなると考えられる。このため、タイプ I にのみ注目する。本論文の提案方式は、タイプ I だけではなく他のタイプにも大幅な変更を行うことなく応用可能で、有効と考える。

4.1 PCFC

本節では、提案手法 PCFC (Polling and Communicate with Fairness Control) 方式

について説明する。PCFC 方式では、周辺のセンサを探索し、発見したセンサと通信を行う。公平性を確保するために、各センサとの通信時間に上限を設ける。この上限を CLT (Communication Limit Time) で示す。あるセンサとの通信時間が CLT に達すると、そのセンサとの通信を終了する。PCFC 方式では、 CLT を調整することで、通信時間の公平性を制御できる。

まず、移動型収集ノードの通信プロトコルについて説明し、次にセンサの通信プロトコルについて説明する。

4.1.1 移動型収集ノードの通信プロトコル

PCFC 方式における移動型収集ノードのフローチャートを図 2 に示す。

● 探索

移動型収集ノードが周辺のセンサを探索する。あるセンサが返信すると、移動型収集ノードはそのセンサと通信を試みる。

● 通信開始

センサが通信範囲内になく通信が失敗すると、移動型収集ノードは、探索開始時刻 p から探索周期 P まで待ってから再び探索を開始する。すなわち、現在時刻が $p + P$ 以下であれば他のセンサの返信を待つ。センサの返信を受信すると、移動型収集ノードはそのセンサと通信を試みる。通信を開始できると、そのセンサからデータを収集する。

● 通信終了

通信時間が CLT を越えるかセンサからすべてのデータを受信すると、そのセンサとの通信を終え、次の探索周期まで他のセンサの返信を待つ。通信終了時点ですでに探索周期を越えていると、通信終了後すぐに探索を開始する。

4.1.2 センサの通信プロトコル

センサには二つの役割がある。一つは環境をセンシングすることであり、もう一つは移動型収集ノードと通信することである。センシングの役割は通信の役割と独立しているため、提案方式では、センサの通信の役割に関してのみ取り扱っている。PCFC 方式におけるセンサのフローチャートを図 3 に示す。まず、センサはビーコンの到着を待つ。センサがビーコンを受信すると、バックオフ発生器 B を初期化する。バックオフ発生器とは、衝突回避のためのバックオフ時間 b を計算するための値であり、初めは $B_{initial}$ で与えられる。 B を用いて b は $b \times r$ ($0 < r < 1$) で与えられる。バックオフ時間にはランダムな要素があり、センサ毎に異なるため、衝突回避が可能になる。しかし、それでも衝突が発生すると、バックオフ発生器を更新し、バックオフ時間だけ待ってから返信を行う。バックオフ発生器は以

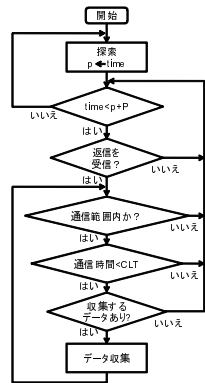


図2 移動型収集ノードのフローチャート

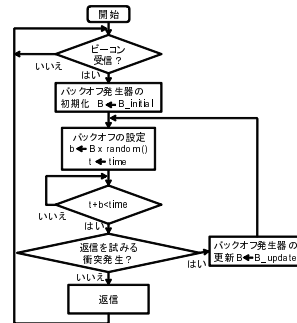


図3 センサのフローチャート

下の式で更新される。

$$B_{update} = 2.0 \times B. \quad (1)$$

B_{update} は更新された B であり, B は更新前の値である. この式は多くの MAC 層のプロトコルで用いられている一般的な更新の式である. 衝突が発生しなければ, センサは移動型収集ノードに返信する. 移動型収集ノードとの通信開始時には, ビーコンの返信と同様にバックオフを用いる. この処理については説明が冗長になるため省略する.

5. 評価

提案する PCFC 方式を計算機シミュレーションで評価した. 以下に評価について述べる.

5.1 評価環境

5.1.1 移動型収集ノード

移動型収集ノードはセンシング領域を移動し, データを収集する. その後, 収集したデータをサーバにアップロードする. このアップロードは事務所等で行われると考えられ時間的な制約は特にない. このため, シミュレーションでは, 移動型収集ノードが移動を開始してから終了するまでのみをシミュレートする.

本論文では, 経路が固定されているタイプ I の移動型収集ノードを想定している. 固定経路には様々な経路が考えられるが, 構成要素はストレートとカーブになる. カーブ自体は移動型収集ノードの性能には関係なく, カーブにおいて速度が減少することが通信時間に影響を及ぼす. すなわち, カーブはストレートにおける速度減少と同じと考えられる. このた

め, 本論文では移動型収集ノードの経路はストレートで直線的に移動する.

5.1.2 センサ

センサはセンシング領域内にランダムに配置されている. センシングを行いながら移動型収集ノードと通信を行う. 一般に, センサはセンシングしたデータをバッファに蓄えており, バッファには容量がある. このため, 各センサがもつデータ量に上限を設定する.

移動型収集ノードの経路とセンサの配置を図4に示す. 円は各センサの通信範囲を示し, 中心にセンサがある. バスの周りの円は移動型収集ノードの通信範囲である. 移動型収集ノードは, 黒の直線に沿って左から右に移動する.

5.1.3 パラメタ

PCFC 方式のパラメタとして, 通信時間の上限である CLT や探索周期 P がある.

シミュレーションのパラメタとして, まず, センサの密度がある. センサの密度とはセンシング領域に何個のセンサがあるかを示しており, 例えば, 密度 $Density = 0.03$ であれば, 100 m^2 に 3 個のセンサがあることを示す. また, 移動型収集ノードの速度もパラメタとして与える. 移動型収集ノードは直線的に移動すると想定しているため, 速度に方向はない. 例えば, 速度 $Velocity = 8.33 \text{ m/sec}$. であれば, 移動型収集ノードが 1 秒に 8.33 m 移動することを意味する. これは, 時速 30 km と同じで, タイプ I の例であるバスの一般的な速度である. 最後に, センサがもつデータ量をパラメタとして与える. センサは, この値を上限として移動型収集ノードにデータを送信できる.

5.2 公平性の定義

本論文では, 公平性を以下で定義する.

$$Fairness = 1 - Gini, \quad (2)$$

ここで $Gini$ はジニ係数である⁴⁾. ジニ係数は統計的な分散具合を示しており, 収入格差の指標としてよく用いられている. ジニ係数は不公平性を示すための指標として有名であり, 本研究でも利用する. 平均や分散は, 最大値等にも依存するため, 公平性を示すためには不適切である. $Gini$ は 0 以上 1 以下の数である. $Gini$ が小さいほど公平であることを示し, 大きいほど不公平であることを示す. 評価値を分かりやすくするため, 本研究では $1.0 - Gini$ を公平性として定義した. これにより $Fairness$ が大きいほど公平であることを示す.

$Gini$ と $Fairness$ はローレンツ曲線を用いて計算できる. ローレンツ曲線では, センサの総数に対する割合が x 軸に示されており, 合計通信時間に対する割合が y 軸に示されている. 通信時間が短い順にセンサを数えて全体の $xN\%$ のセンサの通信時間の合計が, すべてのセンサの合計通信時間の $yN\%$ に等しいことを示す. ここで, N はセンサの数である.

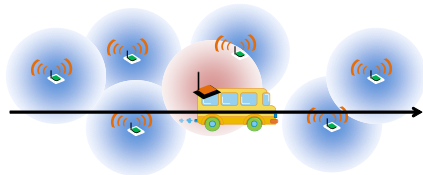


図 4 シミュレートした状況

表 2 シミュレーションに用いたパラメタ

パラメタ	値
速度	8.33 m/sec.
移動距離	2km
通信帯域	256 Kbps
初期バックオフ発生器, $B_{initial}$	620 μ sec.
探索周期*, P	0.1 sec.
通信半径	10 m
データ量*	無限

*パラメタの影響を調べるため、他の節では変更している。

完全に公平で全てのセンサの通信時間が等しい場合には、通信時間の短いセンサから数えて $X\%$ のセンサの通信時間が合計通信時間の $X\%$ になることになり、 $y = x$ の直線で示される。この直線を均等分布線と呼ぶ。ローレンツ曲線より下の領域の面積を A 、ローレンツ曲線より上で均等分布線より下の領域の面積を B とすると、 $Gini$ は $B/(A+B)$ で与えられ、

$$Fairness = \frac{A}{A+B} \quad (3)$$

となる。ローレンツ曲線が均等分布線と等しく、通信時間が全て等しい場合には $Fairness = 1.0$ となる。また、ローレンツ曲線が x 軸と等しく、一つのセンサの通信時間が合計通信時間と等しく、他のセンサと通信が行われていない場合には、 $Fairness = 0.0$ となる。このように、 $Fairness$ を用いることで公平性を示せる。

5.3 密度に関する評価

センサの密度が提案手法の性能に影響を及ぼすと考えられるため、表 2 に示すパラメタを用いて密度に関する評価を行った。

街中を移動しているバスを想定して速度を 8.33 m/sec.、移動距離を 2km とした。通信時間は移動距離に比例し、公平性は移動距離がこれより長くなっても変わらないことを確認したため、2km で固定した。移動型収集ノードとセンサ間の通信帯域は 256 Kbps、初期バックオフ時間は 620 μ sec. (10^{-6} sec.)、通信半径は 10 m とした。これらは実際の無線通信のパラメタを考えて設定しており、現実的である。探索周期を 0.1 sec. 以下にしても性能に大きな差が見られなかった(5.4 節)ため、探索周期は 0.1 sec. とした。また、評価結果のばらつきをなくすため、通信半径はすべて 10 m とした。移動型収集ノードは、この半径以内にあるセンサと通信できる。データ量に関して制限を設けない条件で評価を行った。後に制限した上での評価を 5.5 節で示す。

5.3.1 評価結果

合計通信時間と密度に関する評価結果を図 5 に示す。横軸は密度、縦軸は合計通信時間

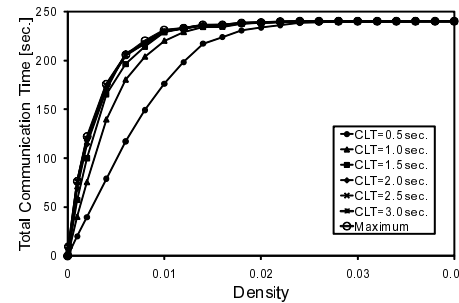


図 5 合計通信時間と密度

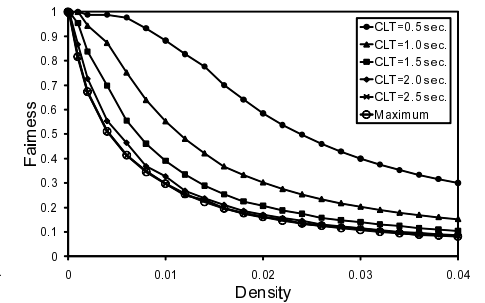


図 6 公平性と密度

を示す。 CLT は通信時間の上限である。“Maximum” は合計通信時間の最大値であり、移動型収集ノードが通信終了後すぐに周辺にある他のセンサと通信を開始する場合の合計通信時間を示している。Maximum では、 CLT や P を無視している。

このグラフより、密度が大きくなるにつれて合計通信時間が長くなるのがわかる。これは、多くのセンサがある場合、移動型収集ノードが通信終了後すぐに周辺にある他のセンサと通信できるためである。この評価ではセンサのもつデータ量を制限していないため、移動型収集ノードはセンサが通信範囲外になると通信が終了する。このため、センサの数が少ないほど移動型収集ノードが通信せずに移動する時間が長くなる。密度が十分に大きくなると、移動型収集ノードがほぼ常に通信している状態になるため、合計通信時間が収束している。また、 CLT が長くなるほど合計通信時間が長くなっている。これは、 CLT が短ければ各センサとの通信時間が制限されるためである。 CLT が 2.5 と 3.0 のときで合計通信時間が変わっていないのは、各センサとの最大通信時間が 2.5 秒より短いためである。最大の通信時間は、移動型収集ノードがセンサの通信範囲の直径を移動する場合に与えられ、この通信時間を MCT (Maximum Communication Time) と呼ぶ。 MCT は直径を速度で割ることで求められ、この場合 $MCT = 20/8.33 = 2.4$ 秒になる。このため、 CLT が 2.4 以上であれば合計通信時間は変わらない。

$CLT = 2.5, 3.0$ の合計通信時間が Maximum とほぼ等しくなっており、提案する PCFC 方式では、 CLT が MCT より大きい場合に最大の合計通信時間を与えられることが分かる。公平性と密度に関する評価を図 6 に示す。横軸は密度で縦軸は式 (2) で与えられる公平性を示す。“Maximum” は図 5 で合計通信時間を最大にする場合の公平性を示す。

このグラフより、密度が大きくなるにつれて公平性が少なくなることが分かる。これは、

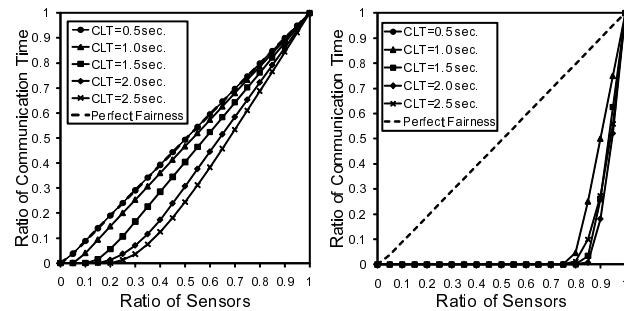


図7 ローレンツ曲線 (左: Density=0.002, 右: Density=0.03)

密度が大きい場合、通信範囲が重なるセンサの数が増えて通信時間のばらつきが大きくなるためである。CLT が短くなるほど、通信時間が制限されてより多くのセンサと通信できるようになり、公平性が増す。

これらの結果から、密度が小さく、CLT が短くなるほど公平性が増加し、逆に密度が大きく CLT が長くなるほど合計通信時間がながくなることが分かる。よって CCT を調整することで PCDC 方式は公平性を制御できるといえる。

Fairness の定義を分かりやすくするために、図7にローレンツ曲線を示す。左側は密度が疎な場合の代表として $Density = 0.002$ の場合の結果であり、右側は密度が密な場合の代表として $Density = 0.03$ の結果である。横軸はセンサの割合であり、縦軸は通信時間の割合である。“Perfect Fairness” は均等分布線を示す。例えば、 $Density$ が 0.002 で CLT が 1.5 の場合、通信時間が短い順に下位 50% の合計の通信時間は全体の通信時間の 40% になっている。この場合、ローレンツ曲線より下側の面積 A は 0.42 で、ローレンツ曲線より上側で均等分布線より下側の面積 B は 0.08 である。このため、公平性は $0.42 / (0.42 + 0.08) = 0.84$ となる。このようにして Fairness が計算される。

5.4 探索周期

探索周期を長くすると、移動型収集ノードがセンサとの通信範囲外になる可能性が高くなるため、合計通信時間が短くなる可能性がある。そこで、探索周期について評価を行った。結果を図8に示す。横軸は探索周期 P を対数軸で示したものであり、縦軸は合計通信時間である。他のパラメタは 5.3 節と同じである。このグラフより、探索周期が長くなると合計通信時間が短くなっていることが分かる。特に、探索周期が MCT より長くなると急激に短くなっている。これは、移動型収集ノードが、探索開始時刻から MCT を越えてから返

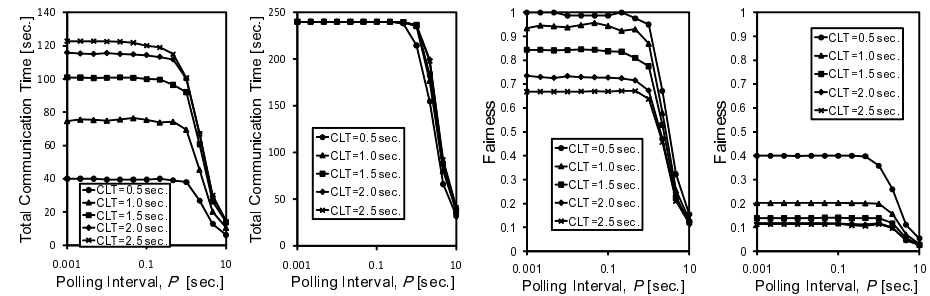


図8 合計通信時間と探索周期 (左: Density=0.002, 右: Density=0.03)

図9 Fairness and polling interval (left: Density=0.002, right: Density=0.03)

信するセンサとは通信できないためである。このため、 MCT より長い探索周期は意味がないといえる。一方、探索周期が短くても合計通信時間が変化していない。これは、探索周期が短くなるほど探索回数が増えるためである。探索周期が短くなるほど移動型収集ノードが返信を受信する確率は小さくなるが、探索の回数が増えるため、結果として通信できるセンサの数は変わらない。本シミュレーションでは、回路内遅延等のハードウェアの制約を無視している。しかし、探索周期が極端に短い場合にはこれらの影響が現れる。このため、探索周期はハードウェア性能の影響が出てくるほど短くすぎないように出来るだけ短くすることが望ましい。密度が大きい場合、すべての CLT に対する通信時間が等しくなっている。これは、密度が大きい場合移動型収集ノードが常に通信している状態にあるためである。

公平性の評価結果を図9に示す。探索周期が長くなるほど移動型収集ノードと通信できないセンサの数が多くなるため、公平性が低下している。

5.5 データ量

以上のシミュレーションでは、各センサがもつデータ量を特に制限していなかった。しかし、センサは保存している以上のデータを送信できないため、データ量が性能に影響を及ぼすと考えられる。そこで、シミュレーションで評価を行った。合計通信時間とデータ量の関係を図10に示す。横軸はデータ量であり、縦軸は合計通信時間である。他のパラメタは 5.3 節と同じである。データ量が多くなると合計通信時間が収束していることが分かる。これは、合計通信時間が、与えられた密度や速度、CLT で求まる最大値に達したためである。センサの密度が高い場合、すべての CLT に対して合計通信時間がほぼ等しくなっている。

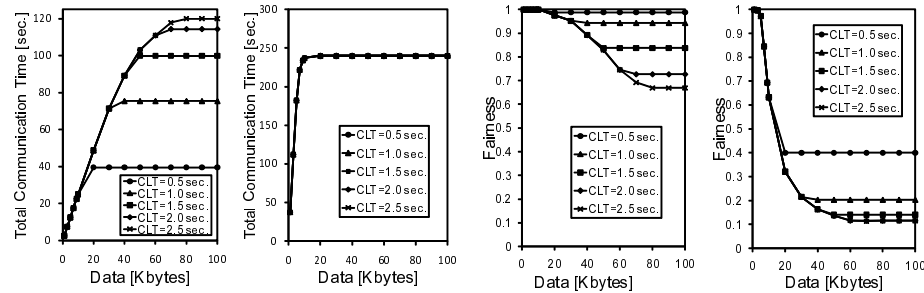


図 10 合計通信時間とデータ量 (左: Density=0.002, 図 11 公平性とデータ量 (左: Density=0.002, 右: Density=0.03)

これは、密度が高い状況では、移動型収集ノードは通信終了後、すぐに他のセンサと通信を開始できるためである。データ量が少なければ移動型収集ノードはすべてのデータを収集できており、合計通信時間は減少している。

公平性とデータ量の関係を図 11 に示す。横軸はデータ量であり、縦軸が公平性である。データ量が多くなるほど、各センサとの通信時間が長くなるため、公平性が低下している。移動型収集ノードは一つのセンサからデータを収集するために長い時間がかかるためである。また、データ量が増えると公平性が収束している。これは、すべてのデータを収集する前に通信範囲内にセンサがいなくなって通信できなくなるためである。例えば、CLT が 1.5 のとき、移動型収集ノードは一つのセンサから最大で 48 K バイト ($1.5 \times 256 \text{ Kbps} / 8$) のデータを収集できることになる。このため、CLT が 1.5 の場合では、データ量が 48K バイトを越えると公平性に変化がなくなる。

6. ま と め

本論文では、移動型収集ノードを用いたデータ収集方式について議論を行い、制御不可で経路固定のタイプ I の移動型収集ノードを対象としたデータ収集方式、PCFC 方式を提案した。PCFC 方式では、移動型収集ノードが周辺のセンサを探索し、発見したセンサの一つと通信を行う。通信時間に上限を設けることで、センサ間の通信時間が公平になるように制御できる。ジニ係数に基づいて公平性を定義し、評価した結果、提案手法が公平性を制御できていることを確認した。

今後、複数の移動型収集ノードを用いた手法や周期的にセンシング領域を巡回する移動型

収集ノードを用いたデータ収集方式を考案する予定である。

謝辞 本研究の一部は、平成 21 年度総務省委託研究「ユビキタスサービスプラットフォーム技術の研究開発」の研究助成による成果である。また一部は、科学研究費補助金基盤研究 (S) (課題番号: 21220002) および、基盤研究 (A) (課題番号: 20240007), 若手研究 (B) (課題番号: 21700108) によるものである。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) C. Ee, and R. Bajcsy, "Congestion control and fairness for many-to-one routing in sensor networks," in Proc. ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys), pp. 148-161, Nov. 2004.
- 2) D. Jea, A. A. Somasundara, and M. B. Srivastava, "Multiple controlled mobile elements (data mules) for data collection in sensor networks," in Proc. IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), pp. 244-257, June 2005.
- 3) J. Luo, and J.-P. Hubaux, "Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks," in Proc IEEE International Conference on Computer and Communications (INFOCOM), pp. 13-17, March 2005.
- 4) N. Ntarmos, P. Triantafyllou, and G. Weikum, "Distributed hash sketches: Scalable, efficient, and accurate cardinality estimation for distributed multisets," ACM Transactions on Computer Systems (TOCS), Vol. 27, Issue 1, Article 2, Feb. 2009.
- 5) R. C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, "Data MULEs: Modeling a Three-tier Architecture for Sparse Sensor Networks," in Proc. International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, pp. 30-41, May 2003.
- 6) A. Sridharan, and B. Krishnamachari, "Maximizing network utilization with max-min fairness in wireless sensor networks," Springer Wireless Networks, Vol. 15, No. 5, pp. 585-600, July 2009.
- 7) R. Sugihara and R. K. Gupta, "Scheduling under Location and Time Constraints for Data Collection in Sensor Networks," in Proc. IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS), Dec. 2007. Available: <http://cse.ucsd.edu/rysugihara/papers/rtsswip07.pdf>
- 8) R. Sugihara and R. K. Gupta, "Improving the Data Delivery Latency in Sensor Networks with Controlled Mobility," in Proc. IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), pp. 386-399, June 2008.
- 9) A. Woo, and D. Culler, "A transmission control scheme for media access in sensor networks," in Proc. ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom), pp. 221-235, July 2001.