

位相調整制御を用いた周期センサトラフィック平滑化による無線周波数利用効率向上手法

坂東 力[†] 杜 平[†] 中尾 彰宏[†]

[†] 東京大学, 東京都文京区本郷 7-3-1, 113-0033

E-mail: [†]tricky1231@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, ^{††}duping@iii.u-tokyo.ac.jp, ^{†††}nakao@nakao-lab.org

あらまし IoTにおいて無線センサーは周期的に環境センシングを行うことが多い。複数のセンサーからの周期的トラフィックの位相が偶然一致すると高いピークトラフィックが発生し、パケットロスや輻輳を回避するためには高い周波数帯域を必要とする。本稿では、各センサーからの周期トラフィックの位相を調節し、トラフィックを平滑化することで必要周波数帯域を制限し、無線周波数の利用効率を向上する手法を提案する。網内で位相推定を行う手法と効率的に各センサーの初期位相の組を探索する手法など複数の手法を提案し利害得失を議論する。

キーワード 周期トラフィック, IoT, 無線センサーネットワーク, 位相調整制御

A Method for Improving Wireless Frequency Utilization by Flattening Periodic Sensor Traffic Using Shift-Phase Manipulation

Riki BANDO[†], Ping DU[†], and Akihiro NAKAO[†]

[†] The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-Tokyo, 113-0033, Japan

E-mail: [†]tricky1231@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, ^{††}duping@iii.u-tokyo.ac.jp, ^{†††}nakao@nakao-lab.org

Abstract In many cases of IoT, wireless sensor sends data periodically. If accidentally traffic of some sensors have the same phase, high peak traffic arises and higher frequency bandwidth is necessary to avoid packet loss. In this paper, we propose methods to utilize radio frequency efficiently by adjusting a periodic traffic phase of each sensor and flattening the aggregated traffic. Our methods include the one to estimate traffic phases in the network and searches to determine initial phases of sensors efficiently. We discuss the advantage and disadvantage of the methods.

Key words Periodic traffic, Wireless sensor network, Phase-shift scheduling

1. はじめに

IoT技術の発達により、2020年代には500億台の機器がネットワークに接続され、トラフィックも爆発的に増加する[1]ことが予測される。周期的なトラフィックを扱う無線センサーネットワークでは、各センサトラフィックの位相が偶然重なるとピークトラフィックが増大し、輻輳やパケットロスによって帯域利用が非効率になるという問題がある。静的に位相を調整してセンサーネットワークを構築するという方法もあるが、拡張性やスケーラビリティの面では動的にトラフィックを平滑化できる必要がある。

本稿では、周期的にデータを送信するセンサーノードに対して、受信するシンクノード側で各センサーの位相を遅延付加により調整し、トラフィックの平滑化を行う複数の手法を提案・比較検討する。

2. 関連研究

無線センサーネットワークにおける輻輳回避は重要な課題であり、これまでに多くの研究が成されてきた[2]。輻輳回避のためのプロトコルは、シンクノード側で制御する中央集権的なものと、センサーノード側で分散的に制御するものの二つに分かれる。前者としては、センサーノードからシンクノードへの経路選択を輻輳状況によって最適化するDirected Diffusion[3]、決められた範囲内の各センサーノードのバッファからネットワークの輻輳状況をシンクノードに通知するESRT[4]や、輻輳に応じてシンクノード側で各センサーへの帯域を割り当てるRCRT[5]がある。後者としては適切なフロー制御・ソーストラフィックの律速・prioritized MACによりパケットドロップを防ぐFusion[6]や、電力消費を抑えて輻輳検知・パケットスケジューリング・転送速度制御を行うECODA[7]が挙げられる。

現行の WiFi で利用されている IEEE 802.11 DCF に代表される、トラフィックにランダムなバックオフ時間を与える方法は、偶発的なパケット衝突を回避するのに有効なアプローチである。しかし周期的なトラフィックにおいては、衝突が確率的に繰り返されるためその効果は限定的である。

本研究に近いアプローチとして、[8] がある。これは 15 個程度のセンサーノードが周期的トラフィックを送る無線ネットワークにおいて、各ノードがパケットの再送情報を元に衝突状況を把握しシンクノードに通知することで、該当するトラフィックのソースノードに固定値の遅延調整要求を通知してパケット衝突や再送の頻度を減少させるものである。

このように無線センサーネットワークにおける帯域利用効率化のための研究は多く存在するが、多数のセンサーノードが周期的なトラフィックを送る場合に動的な平滑化を行う研究はほとんど成されていない。そこで、本研究では次章で述べる位相調整制御を用いた手法を提案する。

3. 提案手法

3.1 想定アーキテクチャ

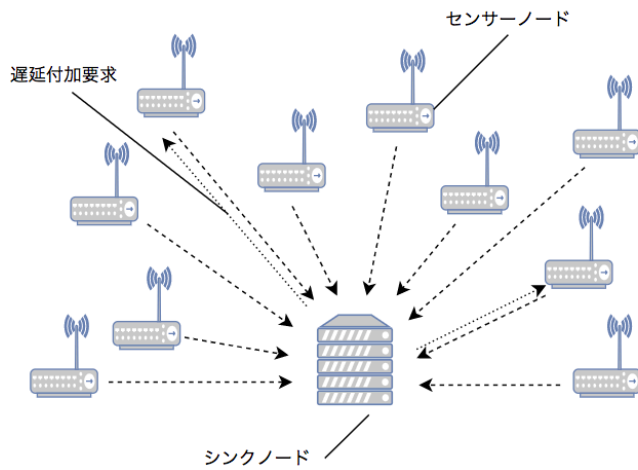


図 1 想定アーキテクチャ

本稿で想定するアーキテクチャは図 1 の通りである。多数のセンサーノードが一つのシンクノードに観測したデータを周期的に送信する。シンクノード側では届くトラフィックのフローは識別できるが、それがどのセンサーノードによるものかは区別できない。また帯域は時分割で離散的にスロットに分けられており、各センサーノードが送るパケットサイズは全て等しく、フレーム長はスロット間隔と一致するものとする。送信タイミングが重なってもパケットロスを起こらず、パケットが同時にシンクノードに運ばれる。またシンクノード側からセンサーノードにスロット間隔を単位量として遅延付加要求を送り位相を調整することができる。このアーキテクチャ下でのトラフィック平滑化は、輻輳として各スロットのフレーム数の最大値を最小化するというタスクに単純化できる。

センサー数を N 、周期を T 、初期位相を θ 、スロット間隔を δ 、遅延付加回数を M とする。またシンクノードでの遅延付加とトラフィック観測、乱数生成は全て $O(1)$ の計算量で実行さ

れると仮定する。ここで周期の種類によってタスクを独立に分割できるため、扱う周期は一種類としても一般性を失わない。

平滑化後の理想的な輻輳の値は、一周期内のスロットのフレーム数の平均値であり、

$$\frac{\text{センサー数}}{\text{一周期内のスロット数}} = \frac{N}{\frac{T}{\delta}} = \frac{\delta N}{T}$$

より、 $\lceil \frac{\delta N}{T} \rceil$ 個となる。

3.2 提案手法

以下では比較検討した平滑化手法について述べる。提案手法は大きく二つに分かれる。最初に述べる手法は、シンクノード側で各センサーの未知の初期位相を推定し、平滑化状態との位相差を計算し平滑化を行う。それ以降の手法は、各センサーの位相の組合せを解空間として探索を行い、付加すべき遅延量ベクトルを得るものである。

3.2.1 初期位相推定手法

この方式では、シンクノードで遅延を加えた結果を基に、各センサーノードの初期位相を推定し、平滑化状態との差分の遅延を付加することでトラフィックの平滑化を達成する。この方式は三つのフェーズに分かれる。一つ目は周期推定、二つ目は初期位相推定、三つ目は平滑化状態との位相差計算である。

まず各センサーノードの周期が未知である場合、トラフィックのフローに着目して該当ノードのデータ送信周期を推定する必要がある。シンクノードでのデータ受信間隔をサンプリングし中央値を取ることで周期が分かる。これを N 回繰り返して全センサーノードのデータ送信周期を把握する。

次に各センサーの初期位相の推定を行う。推定位相 x を θ に近づけることを考える。周期と初期位相が分かれば $O(N)$ でトラフィックが生成できるため、推定位相から生成されるトラフィックと実際の観測トラフィックを比較して近づけていく。具体的には、各センサーに単位量の遅延を加えることで生じるフレーム数の変化を推定トラフィックと観測トラフィックで比較することで、初期位相のズレが分かる。これを N 回繰り返すことで、全てのセンサーの初期位相を推定できる。

Algorithm 1: 初期位相推定

Result: 推定初期位相 x

x を初期化する;

for 各センサー **do**

 推定トラフィックを生成する;

 トラフィックを観測する;

 該当センサーに単位量の遅延を加える;

 該当センサーの推定初期位相に単位量の遅延を加える;

 トラフィックを観測する;

 推定トラフィックを生成する;

 推定トラフィックの差分と、観測トラフィックの差分を比較して推定初期位相のズレを得る;

 位相のズレを x に反映する;

end

最後に平滑化状態との位相差の計算を行う。平滑化状態の初期位相は、周期の小さいセンサーから順にセンサー個数の少ないスロットを初期位相に割り当てていくことで計算できる。得られる初期位相と推定位相の差分を最後に遅延量として付加することで平滑化が達成される。

手法全体として $M = N + 1$ 回の遅延付加が必要となる。初期位相推定がボトルネックとなり、各センサーに対し $O(N)$ の推定トラフィック生成を行うため、計算量は $O(N^2)$ となる。

3.2.2 ランダム探索手法

区間 $[0, T)$ から幅 δ で N 個の乱数を生成し、全センサーにランダムな遅延量を付加していく方法である。試行の中で輻輳の最小値が更新されれば与えた遅延量を記録しておき、全試行後にその時点での初期位相に戻す。 N 個の乱数の生成に $O(N)$ かかり、遅延量ベクトルを生成して付加する操作が M 回行われるため、全体で $O(NM)$ の計算量を要する。

3.2.3 モンテカルロ木探索手法

モンテカルロ木探索とは、乱数を用いた試行を繰り返すモンテカルロ法を用いた探索のことである。一度に遅延付加できるセンサー数一つ、遅延量を単位量に限定すると、平滑化タスクは始状態の初期位相を根としてより輻輳の小さい葉を探す木探索と見なせる。この手法ではトラフィックの輻輳の値を評価関数として、単純なモンテカルロ木探索によって輻輳の減少する方向へ探索していく。具体的には、現状態からセンサーを一つ選んで単位量の遅延を加え、さらにランダムに一つセンサーを選んで遅延を付加するという試行を複数回行い、次状態として輻輳の値が最も小さいものに遷移する。通常のモンテカルロ木探索では、試行ごとに終状態に遷移するまでランダムにシミュレーションを行う (プレイアウト) が、ここでは遅延付加回数に対して平滑化効率が落ちるためランダムな探索は 1 回に留めている。

ここで各ノードで全てのセンサーについて試行を行うのではなく、

$$\frac{\text{センサー数}}{\text{理想的な輻輳の値}} = \frac{N}{\frac{\delta N}{T}} = \frac{T}{\delta}$$

より、ランダムに $\lceil \frac{T}{\delta} \rceil$ 個のセンサーで試行を行えば十分である。なぜなら、輻輳を減少させることは最もフレーム数の多いスロットにあるセンサートラフィックの位相をずらすことを意味し、その重複フレーム数を k とすると、必ず

$$k \geq \frac{\delta N}{T}$$

を満たす。1 つのセンサーを選んで、そのトラフィックが輻輳 k のスロットに含まれる確率は $\frac{k}{N}$ なので、

$$\frac{k}{N} \geq \frac{\delta}{T}$$

よって $\lceil \frac{T}{\delta} \rceil$ 回の試行を行えば輻輳 k のスロットにあるセンサーを確率的に少なくとも 1 回ずらすことができる。また輻輳が悪化するような探索は枝刈りを行うことで、効率よく重複状態にあるセンサーノードをずらし輻輳を改善することができる。

探索の深さが $\frac{M}{\lceil \frac{T}{\delta} \rceil}$ でセンサーの選択に $O(\lceil \frac{T}{\delta} \rceil)$ 、輻輳が最小のものを選択するのに $O(\log \lceil \frac{T}{\delta} \rceil)$ かかるので全体の計算量は $O(M \log \lceil \frac{T}{\delta} \rceil)$ だが、枝刈りでこれよりも小さな計算量で探索を行うことができる。

3.2.4 最良優先探索手法

ランダム探索手法では一度に多くの状態に遷移できるが、センサー同士で与えた遅延が相殺されて非効率な探索となる場合がある。また一度に全てのセンサーに遅延を加えては、試行ごとの輻輳の変動が大きく、探索中の帯域利用が非効率となる。この手法ではモンテカルロ木探索手法と同様、1 回の試行でランダムに $\lceil \frac{T}{\delta} \rceil$ 個のセンサーを選び、また複数の試行をキューに保持して一番結果の良いものを採用し後は棄てることを繰り返して、輻輳を段階的に減らすことができる。キューサイズを K とすると、計算量は $O(\lceil \frac{T}{\delta} \rceil M \log K)$ となる。

4. 性能評価

Python により擬似的なシミュレーションを行い、各手法の性能を評価した。 $N=1000$ 個, $T=15s$, $\delta = 0.5s$, $K=10$ 個とし、センサーノード数は変化せず、各ノードは周期的にデータを送信し続け、受信時のデータ間隔にゆらぎは無いものとする。理想状態の輻輳は $\lceil \frac{N\delta}{T} \rceil = 34$ 個となる。

始状態として、全てのセンサーの初期位相が一致している最悪状態と、各センサーの初期位相を乱数生成したランダム状態の二つを考える。

4.1 最悪状態から始める場合

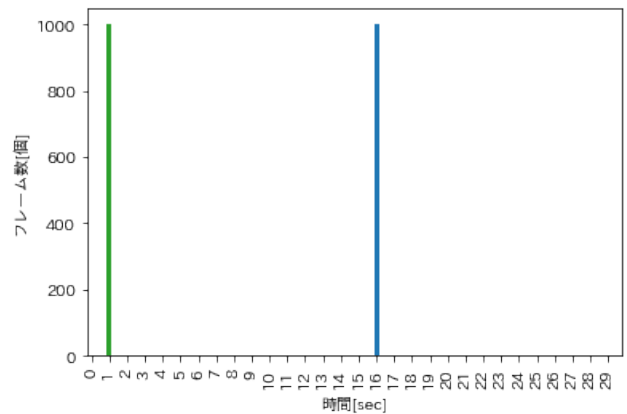


図 2 最悪状態の始状態

図 2 は最悪状態の平滑化前のトラフィックを表す。最悪状態から初期位相推定手法を用いた場合と、その他の手法で同じ遅延付加回数 ($N+1=1001$ 回) で平滑化を行った場合を比較した。

図 3 において、最良優先探索手法、モンテカルロ木探索手法は段階的に輻輳を減少させているが十分な平滑化ができていないと言えない。一方で、ランダム探索手法は平滑化開始直後に輻輳を大幅に改善した後ほぼ一定となっている。初期位相推定手法では、輻輳が $\frac{N}{2}$ 回の遅延付加で半分程度まで線形に減少した後、また $\frac{N}{2}$ 回かけて対称的に増加した後トラフィックが平滑化され輻輳が急激に減少する、という特徴的な変動を見

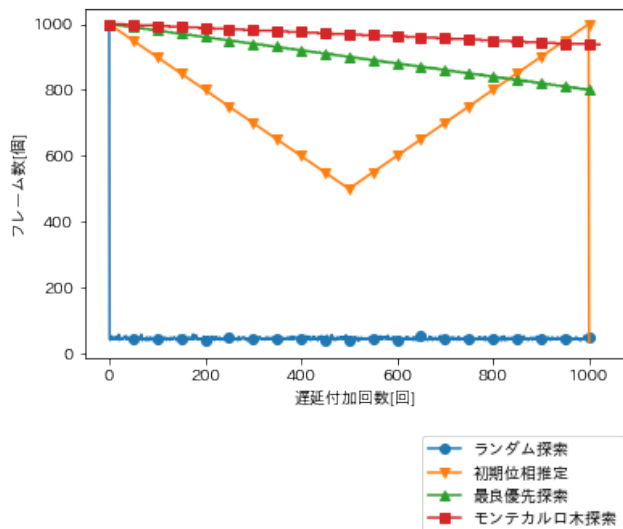


図 3 平滑化中の輻輳推移

せている。また図 4 から分かる通り、初期位相推定手法では最終的にランダム探索手法よりも輻輳の小さい状態を実現しているが、探索中の輻輳はランダム探索手法の方が始状態に比べてはるかに小さく抑えられている。

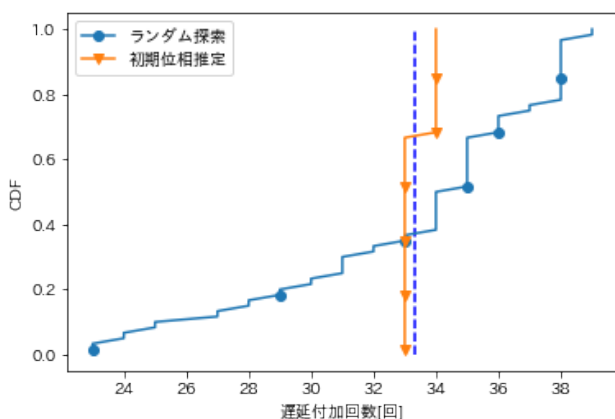


図 4 ランダム探索と初期位相推定による平滑化後の CDF
(縦の点線は輻輳の理想値)

以上より、始状態での輻輳が非常に大きい場合は、初期位相推定手法かランダム探索手法を用いるのが良いと分かる。具体的には、最終的な輻輳の改善度合いを重視するなら前者だが、探索中も効率的な帯域利用が求められる場合は後者を用いるべきである。ただし初期位相推定手法を用いることができるのは遅延付加回数として $N + 1$ 回を許容できる場合に限る。ランダム探索が有効な理由は、最悪状態から始める場合、他の探索手法で遅延付加を用いた計算によって得られる平滑化効果より、同じリソースでランダムにセンサーをずらして得られる効果の方が高いからである。

4.2 ランダム状態から始める場合

図 5 はランダム状態の平滑化前のトラフィックを表す。ランダム状態から初期位相推定手法を用いた場合と、その他の手法

で同じ遅延付加回数 ($N+1=1001$ 回) で平滑化を行った場合と比較した。

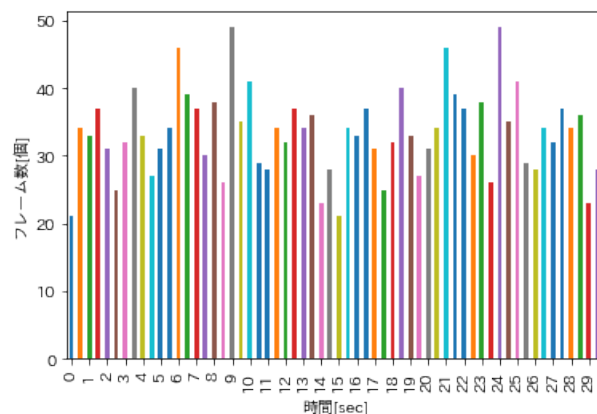


図 5 ランダム状態の始状態

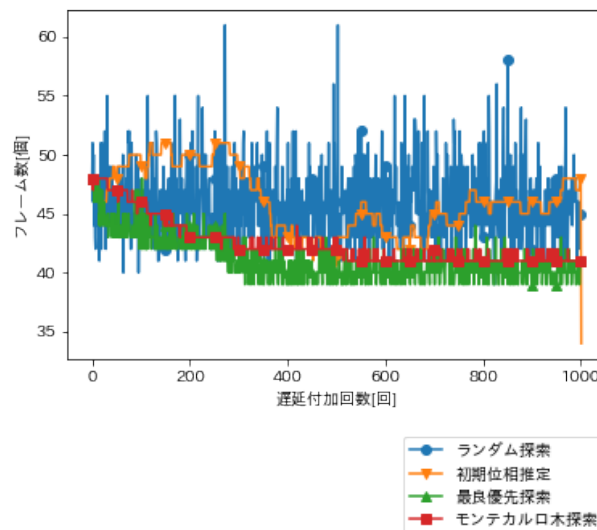


図 6 平滑化中の輻輳推移

図 6 において、ランダム探索手法では輻輳が大きく振動し、その最大値は始状態のおよそ 1.4 倍程度になっている。モンテカルロ木探索手法と最良優先探索手法は輻輳を段階的に減少させており、前者の方が振動幅が小さい。

また図 7 より、初期位相推定手法の次に平滑化効果が高いのはランダム探索で、その後に最良優先探索、モンテカルロ木探索が続く。最悪状態とは違って、始状態のトラフィックの偏りが比較的小さい場合は、ランダム探索手法と最良優先探索手法の平滑化結果に大きな差はなく、探索中の帯域利用効率を優先して後者を用いるべきである。また制約として一度に多くのセンサーに遅延を加えることが望ましくない、もしくはトラフィックの急激な変化を避けたい場合は、一つずつセンサーの位相をずらして平滑化を行うモンテカルロ木探索手法が選択肢になり得る。

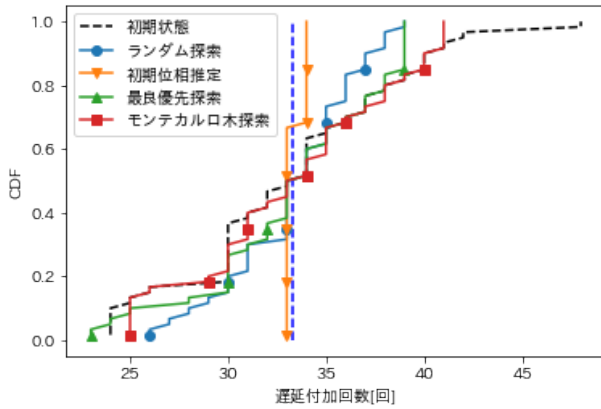


図 7 各手法による平滑化後の CDF
(縦の点線は輻輳の理想値)

4.3 始状態の輻輳を変化させた場合

始状態の輻輳を変化させて、ランダム探索手法・初期位相推定手法・最良優先探索手法を用いて平滑化を行った結果が図 8 である。遅延付加回数は $M=1001$ 回とした。

図 8 より、初期位相推定手法とランダム探索手法は全ての場合について安定して平滑化ができていますが、最良優先探索がランダム探索と同程度に平滑化できているのは輻輳が高々 300 個までの場合であり、それ以降はモンテカルロ木探索と同様に線形に結果が悪化している。また始状態の輻輳が小さい場合は最良優先探索手法・ランダム探索手法・初期位相推定手法の平滑化結果に差がないことも確認できる。

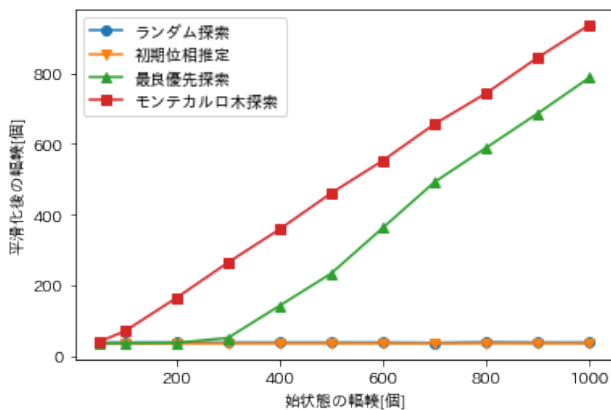


図 8 始状態の輻輳を変化させた場合の平滑化結果

4.4 計算量比較

$M = N + 1 \approx 10^3$, $\lceil \frac{T}{\delta} \rceil = 30$ に注意すると、表 1 より各手法の計算量の大小は以下の通り。

モンテカルロ木探索 < 最良優先探索 < ランダム探索 = 初期位相推定

特に今回の状況設定では $\lceil \frac{T}{\delta} \rceil \approx \sqrt{N}$ であり、モンテカルロ木探索の計算量は $O(N \log \sqrt{N})$ と他の手法に対して高速である。モンテカルロ木探索手法は純粋な平滑化効果では他の手法に劣るが、実際のセンサーネットワークで用いる場合は、輻輳

提案手法	計算量	長所	短所
ランダム探索	$O(N^2)$	平滑化効果が高い	探索時の輻輳の変動が大きい
モンテカルロ木探索	$O(N \log \sqrt{N})$ 以下	探索時の輻輳の変動が最も小さい	平滑化効果が低い
初期位相推定	$O(N^2)$	平滑化効果が高い	$N+1$ 回の遅延付加が必要
最良優先探索	$O(N\sqrt{N})$	探索時の輻輳の変動が小さい	始状態の輻輳が大きいと平滑化効果が低い

表 1 各手法の計算量・長所・短所の比較

が大きい状態から小さな状態に改善する際は初期位相推定手法、その後輻輳が比較的小さい状態で保つなど、利用可能なリソースや輻輳状況に応じて適切な手法を使い分けることで効率的な帯域利用を達成できる。

5. 結 論

本稿では、時分割された帯域におけるゆらぎの無い周期的なセンサーデータのフレーム数を、遅延付加による位相調整制御で平滑化する手法について比較検討を行った。得られた結論としては、始状態の輻輳状況によらず、 $N+1$ 回の遅延付加が許容できる場合は初期位相推定手法が有効である。許容できない場合は、ランダム探索手法が有効であるが、特に始状態のトラフィックの偏りが小さい場合は最良優先探索手法を用いて探索時の輻輳の変動を抑えることが可能である。また計算量の小さいモンテカルロ木探索手法を用いれば、多数のセンサーに対しても高速にトラフィック平滑化を実施することができる。

実世界のセンシングにおいては、帯域が時分割されパケットロスが起こらない、かつ受信データにゆらぎがないという状況設定はあまり現実的ではない。またセンサーノード数も時時刻々と変化し、初期位相に加えて様々な変数を考慮する必要がある。様々なトラフィックパターンやトポロジーに対応した、現実的な無線センサネットワークに適用可能なトラフィック平滑化手法の検討が今後の課題である。

文 献

- [1] 総務省, “平成 28 年版情報通信白書 第 2 部 基本データと政策動向 第 7 節 ict 研究開発の推進,” 2016. <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/html/nc267210.html>.
- [2] S.A. Shah, B. Nazir, and I.A. Khan, “Congestion control algorithms in wireless sensor networks: Trends and opportunities,” Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, vol.29, no.3, pp.236–245, 2017.
- [3] C. Intanagonwivat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva, “Directed diffusion for wireless sensor networking,” IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.11, no.1, pp.2–16, Feb 2003.
- [4] Y. Sankarasubramaniam, O.B. Akan, and I.F. Akyildiz, “Esrt: Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks,” Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Comput-

- ing, MobiHoc '03, New York, NY, USA, pp.177–188, ACM, 2003.
- [5] J. Paek and R. Govindan, “Rcrt: Rate-controlled reliable transport protocol for wireless sensor networks,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol.7, no.3, pp.20:1–20:45, Oct. 2010.
 - [6] B. Hull, K. Jamieson, and H. Balakrishnan, “Mitigating congestion in wireless sensor networks,” *Proceedings of the 2Nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '04*, New York, NY, USA, pp.134–147, ACM, 2004.
 - [7] L.Q. Tao and F.Q. Yu, “Ecoda: enhanced congestion detection and avoidance for multiple class of traffic in sensor networks,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol.56, no.3, pp.1387–1394, Aug 2010.
 - [8] 堂村裕史, 谷川陽祐, and 戸出英樹, “ワイヤレスセンサネットワークにおける周期的なトラヒックの動的な位相調整制御 (ネットワークシステム),” *電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report : 信学技報*, vol.114, no.206, pp.7–12, sep 2014.