

通信タイミング最適化による センサネットワークシステム消費エネルギー削減の検討

田中 維人^{1,a)} 中田 尚¹ 中村 宏¹

概要：センサネットワーク全体で消費エネルギーを削減するためにはセンサでのセンシングやタスクの処理に加えて個々の通信も考慮した構成を考える必要がある。通信部分での消費エネルギーを削減するには、送信回数を減らしデータをまとめて送信することなどが考えられ、受信側でも省略された送信に応じて適切な挙動をすることで通信での消費エネルギーを削減することができる。本研究では特に、末端デバイスでのセンシングからデータを集約するデバイスまでの通信を一定の期間内に行うことを保証した場合のタイミングを考慮した効率的な通信を提案し、個々のデータの送受信におけるエネルギー消費量を踏まえて全体の消費エネルギーを削減する。

1. はじめに

センサネットワークシステムはすでに様々な分野での利用されているが、将来的には社会環境・自然環境の情報をリアルタイムに収集しサービスにつなげることでさらに広い分野での利用が期待されている。具体的には、家電協調動作のための住宅におけるモニタリング、社会インフラの自動検針、施設整備状況や自然災害を監視する防災モニタリング、利便性向上につながる交通状況のモニタリング、ヘルスケアのための生体情報モニタリング、などである。このような大小さまざまなセンサネットワークシステムは、移動性や利便性の観点から電池式で駆動することが望ましい。電池式で駆動する場合、消費エネルギー削減は電池の長寿命化に直結し、メンテナンス性の向上につながる。センサネットワークシステムは、それぞれのデバイスにおいてはセンシングやデータ通信など簡易な動作しか行わないため、全体の消費エネルギーに対して通信時消費エネルギーの影響が大きい。よって、センサネットワークシステムの消費エネルギー削減には取得したデータを効率的に集めて通信エネルギーを削減することが重要である。本研究では、センシングデバイスとセンシングデータを集約するために中継のデータ通信を行う中継デバイスに着目した。それぞれの通信時の動作を最適化し消費エネルギーを削減する手法を提案する。

本研究の目的は、与えられたシステムの構成から通信タ

イミングを含めた通信方式を考慮して、ホストデバイスを除いた電池式で稼動するデバイス群の合計消費エネルギーを最小化することである。

2. 背景

Landsiedel らの論文 [1] でも述べられているように、センシングデバイスでは実装によっては通信が消費エネルギーにおいて大きな割合を占めていることがある。本研究でも次節において、エネルギーモデルを元に通信エネルギー割合が大きいことを確認する。

本研究では通信エネルギーに着目し、末端デバイスでのセンシングからデータを集約するデバイスまでの通信を一定の期間（以降、許容遅延時間と呼ぶ）内に行うことを保証した場合のタイミングを考慮した効率的な通信方式を提案する。

2.1 本研究で取り扱うセンサネットワークシステム

図 1 にセンサネットワークシステム的具体例を示す。セ

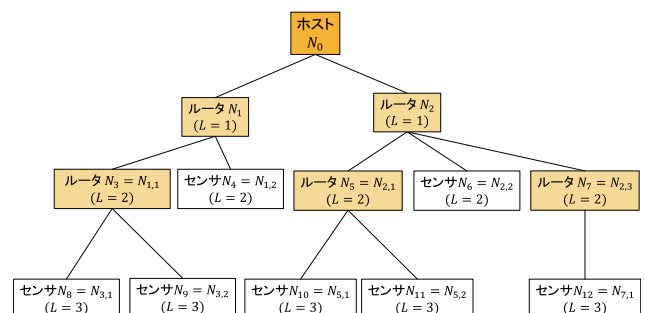


図 1 センサネットワークシステム的具体例

¹ 東京大学
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan
^{a)} yukito@hal.ipc.i.u-tokyo.ac.jp

ンサネットワークシステム全体のデータを集約するデバイスをホストデバイスと呼ぶ。センシングを行うデバイスをセンシングデバイスまたはセンサと呼び、センシングデバイスからホストデバイスまでの通信を中継するデバイスを中継デバイスまたはルータと呼ぶ。ホストデバイスも含めたセンサネットワークシステムのすべてのデバイス数を $NodeNum_{all}$ とし、センサネットワークシステムの各デバイスを $N_i (1 \leq i \leq NodeNum_{all})$ のように呼ぶことにする。 N_0 はホストデバイスとする。ホストデバイスは電源から電力を供給されているものとし、その他のデバイスは電池式で駆動するものとする。電池で駆動しているデバイスの消費エネルギーを削減することがメンテナンス性の観点からも重要であるので、ホストデバイスの消費エネルギーは本研究では考慮しない。デバイス N_i の消費エネルギーを E_{N_i} とすると、センサネットワークシステム全体での消費エネルギー E_{all} は以下ようになる。

$$E_{all} = \sum_{i=1}^{NodeNum_{all}} E_{N_i} \quad (1)$$

センサネットワークシステムでは、データ中継動作とセンシング動作を兼ねるデバイスも考えられるが、本研究では実装上の複雑さなどの問題があるため対象外とする。センシングの対象はすべてのセンシングデバイスで同じものとする。センシング周期もすべてのセンシングデバイスで等しく T_{cycle} であるとする。また、センサネットワークシステム全体でセンシング周期 T_{cycle} よりも長い一定周期ごとに、各デバイス間の時刻のずれを解消するために時刻同期通信を行うものとする。時刻同期通信の手法については Maróti らの手法 [2] など様々な手法が考えられるが、本研究においては研究対象外とする。

2.1.1 消費エネルギーの割合

温度データのみを計測するセンサネットワークシステムのエネルギーモデルを構築した。中継デバイス 1 台とセンサデバイス 50 台分のそれぞれにおいて、4.1 節で述べるエネルギーモデルによって通信に関わるエネルギーを見積もり、マイコンやセンサの基本的動作などに使用される通信以外のエネルギーと比較した。結果を表 1 に示す。このような温度だけを計測するセンサネットワークシステムのモデルにおいても、消費エネルギーのうち通信が占める割合が高い。

2.1.2 システムの規模とトポロジ

センサネットワークシステムのトポロジは多様なトポロ

ジが考えられるが、データを集約する必要性や一対多通信が主となることに加え大規模なネットワークにおいて消費エネルギーを抑えるためにツリートポロジのような階層構造が適していると考えられている [3]。また、階層構造はシステムの規模による拡張も可能である。規模によって中継デバイスが必要かどうかや中継デバイス同士の通信が発生するかが決まる。デバイス N_i がホストデバイスにデータを送信するまでにデバイス間で通信を行う回数を L_i と定義し、そのデバイスを L_i 層のデバイスと呼ぶ。直接通信するデバイス N_i と N_j がある場合、 $L_j < L_i$ ならばデバイス N_j を親デバイス、デバイス N_i を子デバイスと呼ぶ。特に、すべてのデバイスに対して最大の L_i を L_{max} と定義する。末端のデバイスは必ずセンシングデバイスであるので、 $L_i = L_{max}$ となるデバイス N_i は必ずセンシングデバイスである。また、 $NodeNum_i (\geq 1)$ を中継デバイス N_i がデータを受信する下層のデバイス数とし、デバイス N_i にデータを送信する下層のデバイス N_j との対応関係を $N_{i,k} = N_j (1 \leq k \leq NodeNum_i)$ のように表記する。 $N_{i,0} = N_i$ とする。図 1 は $L_{max} = 3$ のセンサネットワークシステムの具体例となっている。

2.1.3 センシングデバイスのモジュール

センシングデバイスは、マイコン、センサ、不揮発メモリ、無線モジュールの各モジュールを搭載しているものとする。

不揮発メモリの容量を Mem_{max} とする。一度のセンシングにおいて取得する最大データサイズを $Data_{sense}$ とすると、 $Mem_{max}/Data_{sense}$ 回分のセンシングデータを蓄積できることになる。

2.1.4 中継デバイスのモジュール

中継デバイスは、マイコン、不揮発メモリ、無線モジュールの各モジュールを搭載しているものとする。

中継デバイスにおいても、不揮発メモリの容量 Mem_{max} と最大センシングデータサイズ $Data_{sense}$ を定義すると、 $Mem_{max}/Data_{sense}$ 回分のセンシングデータを蓄積できることになる。

2.1.5 通信の仕様

センサネットワークシステムは一対多通信が主となるので、通信の衝突を避ける通信方式を採用する必要がある。通信の衝突を避けるには周波数分割通信方式なども考えられるが、送信側のデバイスの消費エネルギーに対して受信側の消費エネルギーが増大する [4] ため、受信側のデバイスが多数存在する階層構造のセンサネットワークシステムには適切でない。よって、通信はスロットと呼ばれる細かい期間に分割して行う時分割多重通信方式を採用する。通信モジュールは各デバイスにつき 1 つしか持たないので、同じデバイスによる受信と送信は同一スロットでは行えないものとする。同じスロット内で複数のデバイスからの送信が存在すると衝突が生じ通信が失敗するが、受信側は無効な

表 1 センシングデバイス 50 台と中継デバイス 1 台の消費エネルギー (1 日あたり)

	通信エネルギー [mWh]	通信以外のエネルギー [mWh]
センシングデバイス (50 台)	21.0	19.7
中継デバイス	28.4	0.5

データを受信するので衝突が生じたことは把握できる。また、送信側は ACK（肯定応答）が返ってくるかどうかで通信の成否は把握することができるものとする。衝突を避けるために受信側から送信側へ指定のスロットへの再送の要求を通知するためにも 1 スロットを要するものとする。

2.1.6 センシングの許容遅延時間

センシングデバイスにおいてセンシングが行われてからホストデバイスでデータを集約するまでの許容遅延時間を考える。センサネットワークシステムは、応用先によってリアルタイム性の重要性が異なるので、センシング周期 T_{cycle} を用いると、許容遅延時間 T_{dl} によって以下の 3 種類のパターンに分類することができる。

(1) 許容遅延時間が短い場合

$$T_{dl} \leq T_{cycle}$$

(2) 許容遅延時間が中程度の場合

$$T_{cycle} < T_{dl} \leq (Mem_{max}/Data_{sense} - 1)L_{max}T_{cycle}$$

(3) 許容遅延時間が長い場合

$$T_{dl} > (Mem_{max}/Data_{sense} - 1)L_{max}T_{cycle}$$

1 の場合は、センシングデバイスはセンシングを行ってもデータを蓄積することなく上層のデバイスにデータを送信する必要があり、中継デバイスはすべての子デバイスからのデータ受信を終了するとそれらすべてのデータを蓄積することなく上層のデバイスにデータを送信する必要がある。2 の場合は、それぞれのセンシングデバイスと中継デバイスにおいて、センサネットワークシステム全体の消費エネルギーが最小になるように適切にデータを蓄積集約し上層のデバイスにデータを送信する必要がある。2 の場合においては、センサネットワークシステム全体の消費エネルギーが最小になるようなデータ集約のアルゴリズムを検討する必要がある。簡単のためデータ量は 1 スロットで送信可能なデータ量よりも十分小さく、まとめ送りを行っても 1 スロットで送信が完了すると仮定する。3 のように許容遅延時間 T_{dl} が十分に長い場合は、各デバイスにおいてメモリ容量の限界までデータを蓄積しまとめて送信することができる。

2.1.7 中継デバイスの周期的動作

センシングデバイスがセンシングやデータ通信などの動作を連続的に行わなければ、各動作のためにアイドル状態から復帰するためにオーバーヘッドエネルギーを消費することになる。よって、センシングデバイスはセンシング周期に合わせてすべての動作を連続的に行うことが望ましい。センシングデバイスはセンシング周期に合わせてデータ通信を行うので、センシングデバイスからのデータを受信し上層のデバイスに送信する中継デバイスも当然センシング周期に合わせて動作することが望ましい。センサネットワークシステムはデバイスのアイドル状態が長い場合、Van らの研究 [5] などにおいても受信側のデバイスは周期的に動作するモデルとして考えられている。

3. 関連研究

3.1 通信の集約

通信エネルギーを削減するには、通信回数の削減とそれに伴う通信時間の削減が重要である。通信回数を削減するために、センシングデバイスにおいて時系列データを圧縮することが検討されている。

センサネットワークシステムにおいて通信回数を削減するために、センシングデータを圧縮しまとめて通信することが考えられる。そこで本研究では、これまでの研究 [6] と同様に観測値時系列を誤差閾値内で線形近似し、制御点のみを送信する方式（線形近似圧縮）を採用する。この手法は直前までの観測値の変化を一次式で近似するため、メモリ利用効率および CPU 使用効率に優れた方式である。

3.2 既存の通信方式とその課題

図 1 のようなセンサネットワークシステムにおいて通信エネルギーを最小化するためには、1 つの受信デバイスと複数の送信デバイスから構成される 1 組のデバイス群における通信を効率化することが重要である。以下、1 組のデバイス群における既存の通信方式について述べる。

3.2.1 全待機方式

同じスロットにおいて複数のデバイスからの送信が存在すると通信が衝突し受信側のデバイスで正しくデータを受信できなくなる。衝突が生じるために同じスロットに複数のデバイスからの送信が競合することは望ましくない。このような考えから、ある中継デバイス N_i が集約するすべてのデバイスに対して個々にスロットを割り当てる図 2 のような全待機通信方式が考えられる。すなわち、全待機方式では毎周期 $NodeNum_i$ 個のスロットを確保することが必要になる。

通信エネルギー最小化のアプローチとして、線形近似圧縮を採用した場合、圧縮を行うと実際に送信を行わないデバイスがあるにもかかわらず、受信側のデバイスにおいて受信待機する不要なスロットが生じる。4.1 節で述べるエネルギーモデルでは、受信待機を行うスロットの消費エネルギーは高いことが確認できる。よって、中継デバイスの通信所要スロット数 $SlotNum$ を小さくすることは消費エネルギー削減につながる。 $SlotNum$ を小さくするということは、1 スロットあたりのデータ受信効率が向上するということでもある。

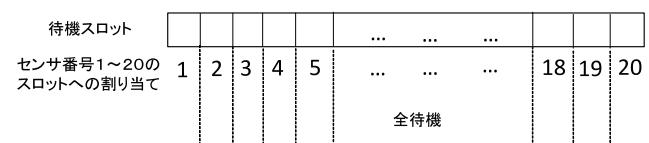


図 2 全待機方式の例 ($NodeNum_i=20$)

3.2.2 間歇全待機方式

許容遅延時間がセンシング周期よりも十分長い場合には、センシングしたデータをセンシングデバイスで一旦保存し、複数周期分をまとめて送信する方式が考えられる。特に 2.1.6 節の 3 の場合にはメモリ容量の上限までまとめて送信することが最善であると考えられる。

4. モデリング

4.1 エネルギーモデル

エネルギーモデルはこれまでの研究 [6] を中継ノードに拡張したものを用いた。マイコンは TI 社製 MSP430F5438[7]、無線モジュールは立山科学ワイヤレステクノロジー社製 TKU-T108[8]、RTC は Ambiq 社製 AM18XX[9] のそれぞれのカタログ値を元に各エネルギーパラメータを算出した。

一般に通信に必要なスロット数が小さいほど消費エネルギーは小さくなる。つまり、中継デバイスの通信所要スロット数 $SlotNum = SlotNum_{recv} + SlotNum_{wait}$ を小さくすれば、センサネットワークシステムの通信における消費エネルギーは小さくなり、センサネットワークシステム全体の消費エネルギーも小さくなる。ここで、 $SlotNum_{recv}$ は実際にデータを受信したスロット数、 $SlotNum_{wait}$ は受信待機のみを行ったスロット数である。

4.2 線形近似圧縮の確率モデル

過去に計測された 4 箇所での 22 日間毎分温度データの合計 88 系列の温度データから 2 つずつすべての組み合わせについて相互相関係数を求めた結果、元データには強い相関があるものの、線形近似圧縮後の制御点の発生場所には相関がないことが確認された。このことから以降では線形近似圧縮後のデータの送信タイミングは一様分布であると仮定する。

5. 提案

ここでは 1 組の通信デバイスに注目し、省電力通信方式を検討する。2.1.6 節のパターン 1 のように許容遅延時間が短く、1 センシング周期以内に全データの通信完了を保証する必要がある場合について考える。

5.1 通信の改良

4.1 節で述べたように、通信にかかる平均所要スロット数を削減することが消費エネルギーの削減につながる。

エクスポネンシャルバックオフという既存の通信アルゴリズムを基に、中継デバイスにおける待機を複数の段階に分ける手法を考案した。エクスポネンシャルバックオフにおいて、バックオフを打ち切り最大リトライ回数を定めることで性能向上につながるという指摘がある [10]。中継デバイスにおける待機においても、無限にバックオフを行ってスロットを確保することは性能低下につながる可能性が



図 3 ステップ待機の例 ($NodeNum_j=20$, $m_1=3$)

ある。提案する通信方式では、送信を行う子デバイス数が少ない場合には早い段階で通信を終了し、送信を行う子デバイス数が多い場合には確実にすべての子デバイスからのデータを受信できることを目指す。この章の以後、一連の通信を複数の段階に分割して考える。1 つの段階には複数のスロットが存在するが、各センサノードは 1 段階につき 1 回のみ送信を行うことが出来るとする。また、中継デバイスを N_j とし、 i 段階目の待機スロット数を m_i とし提案手法を説明する。

5.1.1 リトライ待機方式

この方式では一定時間内に確実にすべての子デバイスからのデータ受信を保証できるわけではないが、段階的な待機において平均所要スロット数が少なくなることを確認するために比較対象として用いる。リトライ待機方式とはまず中継デバイスは任意の m_1 個のスロットを確保する。子デバイスは送信要求があった場合、1 番目から m_1 番目までのスロットからランダムに 1 つを選び送信する。1 段階目の受信で衝突が発生すれば、次に $m_2 = m_1$ 個のスロットを確保し子デバイスがランダムに決めたスロットで受信する。これを 2 段階目の受信と呼ぶ。同様に i 段階目の $m_i = m_1$ 個のスロットで受信する。

5.1.2 ステップ待機方式

本方式を図 3 の例を用いて説明する。まず 1 段階目として、任意の m_1 個のスロットを確保し、各センサを番号ごとに m_1 で割った剰余の番号のスロットに割り当てる。1 段階目での衝突を検出した場合、2 段階目として $m_2 = \lceil NodeNum_j / m_1 \rceil$ 個のスロット ($\lceil x \rceil$ は x の天井関数) を確保し、各センサを番号ごとに m_2 で割った剰余に応じた番号のスロットに割り当てる。再び衝突検出のスロットを確保し 2 段階目においても衝突を検出した場合は、新たに 3 段階目として $m_3 = \lceil NodeNum_j / m_1 \rceil + 1$ 個のスロットを確保し、各センサを番号ごとに m_3 で割った剰余に応じた番号のスロットに割り当てる。以下同様に、確保した衝突検出のスロットで i 段階目における衝突を検出した場合は、新たに i 段階目として $m_i = \lceil NodeNum_j / m_1 \rceil + i - 2$ 個のスロットを確保し、各センサを番号ごとに m_i で割った剰余に応じた番号のスロットに割り当てる。 $m_l = \lceil NodeNum_j / m_1 \rceil + l - 2 = NodeNum_j$ となる l 段階目においては $NodeNum_j$ 個のスロットを確保しているので、データを受信に失敗しないことを保証している。

5.2 一組のデバイス群における通信方式の比較

5.2.1 各通信方式の各段階におけるスロット数

$N = 20, p = 0.2$ の場合に、それぞれの通信方式において待機段階におけるスロット数を例として示したのが表 2 である。

5.2.2 通信方式と最大遅延時間

任意の段階において子デバイス数 $NodeNum_j$ 以上のスロットを確保しているかどうかによって、一定のスロット数以下で通信が終了することを保証できるかどうかが決まる。通信が終了することを保証できなければ、最大遅延時間を保証することができない。リトライ待機方式において送信に失敗する、すなわち通信の衝突が発生するかどうかは確率的なふるまいとして考えることができるため、最悪送信失敗回数を保証することはできない。よって、最大遅延時間の上限を保証する必要がある場合にはリトライ待機方式を使うことは出来ない。

5.2.3 最適な通信方式を選択する手法

4.1 章で述べたように、通信部分での消費エネルギーは通信スロット数に比例する。よって、消費エネルギーの期待値が最小となる通信方式とは、通信を終了するまでに必要なスロット数の期待値が最小となるものである。各通信方式におけるスロット数の期待値を求めるためには、どの段階で通信が終了するのかを考慮する必要がある。まず、子デバイスごとに各段階で通信が終了する確率から受信スロット数の期待値を求めることを考えるが、子デバイス同士で独立な試行ではないので正確な期待値を求めることはできない。なぜなら、ある子デバイス $N_{j,k}$ の送信が衝突し次の段階で再送する確率は

$$p^{j,k}(i) \neq 0$$

であり、他のすべての子デバイスの送信が衝突しない確率は

$$1 - \prod_{k=2}^{NodeNum_j} \left(1 - \frac{p^{N_{j,k,2}}}{m_1}\right) (1 - \delta_{k,k,2}) \neq 0$$

にも関わらず、ある子デバイス $N_{j,k}$ からの送信だけが衝突し、他のどの子デバイスからの送信も衝突しないことはない。よって、何段階目までデータを再送するかという試行は子デバイス同士で独立ではない。そこで、本研究では各デバイスの送信要求確率モデルからモンテカルロシミュレーションによって、各通信方式におけるスロット数の期待値を求める手法を用いる。送信要求率の確率モデルから

表 2 $N = 20, p = 0.2$ の場合の各通信方式における待機段階とスロット数

待機方式	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	$\dots$	m_{15}	$\dots$
全待機	20	-	-	-	-	-	-	-
リトライ待機	3	3	3	3	3	$\dots$	3	$\dots$
ステップ待機	3	7	8	9	10	$\dots$	20	-

$NodeNum_j$ 個のデバイスが送信要求を行うかどうかを示した系列群を生成し、各系列における必要スロット数を求め、その平均を求めた。

6. 評価

6.1 平均所要通信スロット数評価

これまで述べたように通信にかかる平均所要スロット数を削減することが消費エネルギーの削減につながる。したがって、まずはそれぞれの通信方式における平均所要通信スロット数を比較する。

モンテカルロシミュレーションによって $NodeNum_j = 50, p_{sens} = 0.2$ のときの平均所要通信スロット数を求めた。その結果が表 3 である。ここで、1 段階目のスロット数 m_1 は可能性のあるすべてのパターンの中から平均所要通信スロット数を最小となるものを選択した。

センシングデバイスの送信要求率 p_{sens} が変動した場合には最適な通信方式が変わる可能性がある。そこで、 $NodeNum_j = 50$ に固定し p_{sens} を変動させた場合の平均所要通信スロット数を求めた。その結果を図 4 に示す。このグラフから、送信要求率 p_{sens} が変動した場合にもステップ通信方式が最適であることがわかる。また、ステップ通信方式において、 p_{sens} の増加に伴う平均所要スロット数の増加が起きなくなる p_{sens} が存在する。これは、一段階目から $m_1 = NodeNum_j$ 個のスロットを確保し全待機を行った方がその通信方式よりも受信効率が良くなる場合に生じており、実際に、平均所要通信スロット数の最大値は設定した $NodeNum_j = 50$ であることを確認した。

表 3 $NodeNum_j = 50, p_{sens} = 0.2$ のときの一段階目スロット数と平均所要通信スロット数

待機方式	1 段階目のスロット数	平均所要通信
	m_1	スロット数
全待機	50	50
リトライ待機	8	33.8
ステップ待機	13	28.4

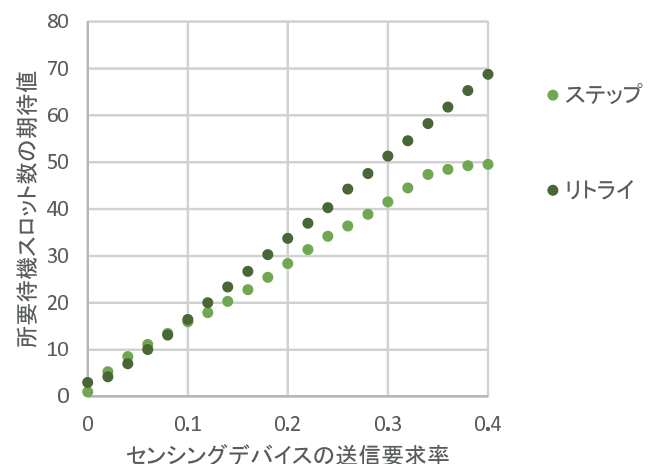


図 4 p_{sens} に対する平均所要通信スロット数

同様に、子デバイス数 $NodeNum_j$ が変動した場合にも最適な通信方式が変わる可能性がありうる。そこで、 $p_{sens} = 0.2$ に固定し $NodeNum_j$ を変動させた場合の平均所要通信スロット数を求めた。その結果を図 5 に示す。このグラフから、子デバイス数 $NodeNum_j$ が変動した場合にもステップ通信方式が最適であることがわかる。

6.2 消費エネルギー評価

平均所要通信スロット数の削減が消費エネルギーの削減につながっていることを確認するために、エネルギーモデルを用いて各通信方式における消費エネルギーを比較した。

平均所要通信スロット数の評価と同様に、 $NodeNum_j = 50, p_{sens} = 0.2$ のときの子デバイスの平均送信回数と 4.1 章で述べたエネルギーモデルを用いて消費エネルギーを算出した。結果を表 4 に示す。

この結果より、提案したステップ待機方式において、全待機方式での通信エネルギーと比較して 49.0%削減できることが確認できた。また、平均所要通信スロット数が小さいときは通信エネルギーも小さいという対応が確認でき、通信スロット数による見積もりが有効であることが確認できた。

7. まとめ

本研究ではセンサネットワークシステムの消費エネルギー削減を目的とした。その中でも特にデータ通信時に消費するエネルギーが多くを占めていることに着目した。通信エネルギーを削減するには、通信回数の削減とそれに伴う通信時間の削減が重要である。センシングデバイスにおいてデー

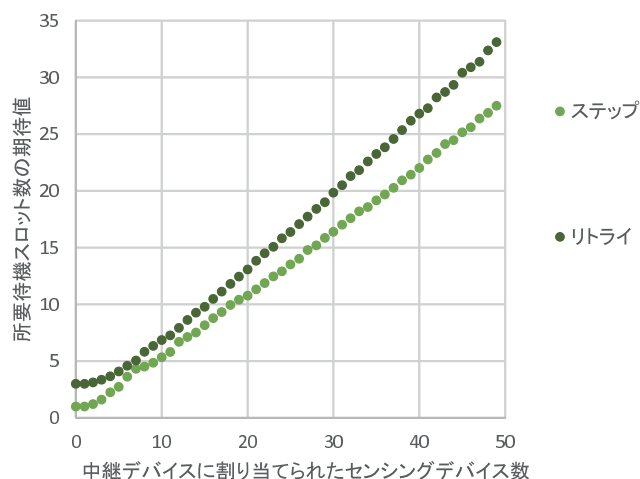


図 5 $NodeNum_j$ に対する平均所要通信スロット数

表 4 各通信方式における 1 周期あたりの通信エネルギーの比較

待機方式	平均所要通信 スロット数	子デバイス の平均送信 回数	1 周期あたりの 通信消費 エネルギー [Ws]
全待機	50	0.2	96.0
リトライ待機	33.8	0.504	61.3
ステップ待機	28.4	0.432	49.9

タを集約して通信回数を削減する既存の手法である線形近似圧縮を紹介した。具体的には、線形近似圧縮という観測値時系列を誤差閾値内で線形近似し、制御点のみを送信する手法である。線形近似圧縮を行うと、制御点から観測値を誤差閾値内で推定できるため、制御点のみを許容遅延時間内に送信すればよい。線形近似圧縮において、制御点が生じる確率すなわち送信要求率は一様分布で近似出来ることを示した。平均所要通信スロット数を削減し、できるだけ効率的に受信することで消費エネルギーの削減を目指し、ステップ待機方式を提案した。各通信方式の平均所要通信スロット数をモンテカルロシミュレーションによって評価し、提案方式において一組のデバイス群における通信エネルギーは 49.0%削減できることが確認できた。

今後は実機を用いて消費エネルギー削減効果を評価する必要がある。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 25540018, ならびに NEDO「ノーマリーオフコンピューティング基盤技術開発」の助成により行われたものである。

参考文献

- [1] Olaf, L., Klaus, W. and Stefan, G.: Accurate prediction of power consumption in sensor networks, *Proc. of the Second Workshop on Embedded Networked Sensors* (2005).
- [2] Maróti, M., Kusy, B., Simon, G. and Lédeczi, Á.: The flooding time synchronization protocol, *Proc. of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 39–49 (2004).
- [3] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, *Proc. of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1–10 (2000).
- [4] Shih, E., Cho, S.-H., Ickes, N., Min, R., Sinha, A., Wang, A. and Chandrakasan, A.: Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks, *Proc. of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 272–287 (2001).
- [5] Van Dam, T. and Langendoen, K.: An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, *Proc. of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 171–180 (2003).
- [6] 中田 尚ほか：時空間圧縮と階層化によるセンサネットワークの省電力化，信学技報 CPSY2014-40, Vol. 114, No. 155, pp. 179–184 (2014).
- [7] テキサス・インスツルメンツ：MSP430F5438.
- [8] 立山科学ワイヤレステクノロジー：MSP430F5438.
- [9] Ambiq Micro: AM18xx.
- [10] Kwak, B.-J., Song, N.-O. and Miller, M.: Performance analysis of exponential backoff, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 13, No. 2, pp. 343–355 (2005).