

間欠通信 WSN におけるノードのストレージ容量を考慮した通信方式の提案

瀬戸勇輝¹ 安達直世² 滝沢泰久²

近年, Internet of Things や M2M といったモノとモノがインターネットにつながるという考え方が注目されており, それを実現する技術の1つとして無線センサネットワーク(WSN)がある. WSNでは, 無線センサノードの省電力のためノード間通信は間欠通信となる. このような通信環境でスループット向上の研究が進められているが, ノードのストレージ容量制約に関して十分な考慮が検討されていない. 本稿では, ノードのストレージ容量制約を考慮しつつ, WSN の間欠通信による時間的・空間的に断続する経路においてスループットの向上を図る通信方式を提案する.

1. はじめに

近年, Internet of Things (IoT) や Machine-to-machine(M2M)といった実世界の物理情報をインターネットへ取り込み新たなサービスを提供する試みが注目されている. これらを実現するためには, 実世界の物理情報を取得する無線センサネットワーク (WSN)[1] が必須となる.

無線センサネットワークの特徴の1つとして, ネットワークを構成するセンサノードはバッテリー駆動であるということが挙げられる. 実世界において, これら分布させたセンサノードに対してバッテリー交換や定期的な充電を行うことは非常に困難である. そのため, 実世界に分布されたこれらセンサノードが使用できる電力には制限がある.

2つ目の特徴としては, 構成されたネットワークを用いた計測期間が長期であることが挙げられる.

上記の理由により, このネットワーク構成において, センサノードやセンサネットワーク全体のライフタイムを長くするためには, 消費電力を抑制する技術が必要となる.

無線センサノードの省電力として有効な方式のひとつは, 無線センサノードを任意の期間においてスリープ状態とし電力消費を抑制する方式である. この場合, 無線センサノード間の通信は隣接ノードが同時にアクティブ状態になる場合に可能であるため, その通信は間欠通信となる. 一方, 無線センサネットワークはシンクノードまでの経路をマルチホップ経路として構成する. 従って, 無線センサネットワークのシンクノードまでの経路は時間的・空間的に断続する経路となり, データ転送においてスループット

の低下や到達率の低下が発生する問題がある. この問題の解決方式は次の2つに大別できる.

- 継続的な経路を期待せずに, フラットニングによりデータ転送を行う.
- 断続的な経路において隣接ノード間のアクティブ状態の同期制御(状態同期)を実施し, データ転送する.

前者はフラットニングを用いるため, データの冗長な複製が発生する. 一方, 後者は隣接ノード間での状態同期が完了するまでの期間, データを保持する必要がある. すなわち, いずれの方式も無線センサノードにデータを保存する適量なストレージ容量を必要とする. しかし, 無線センサノードのストレージ容量は非常に限定的である場合が多い. この場合, 前述の方式においては待機パケットを保持するバッファ容量不足からパケット破棄が発生し, スループットと到達率が低下する可能性が高い.

本稿では, ストレージ容量が限定的である無線センサノードを前提として, 間欠通信により構成されるネットワークにおいて, データ転送のスループット向上と到達率向上を図る手法を提案する

2. 関連研究

2.1 GPSR

間欠通信環境に適用できる位置ベースルーティング手法の一つとして, GPSR(Greedy Perimeter Stateless Routing)[2]がある. 前提として, 各ノードはGPS等を利用して自身の位置情報を取得し, それを定期的にブロードキャストすることで通信範囲内にいるノードの位置情報

1 関西大学大学院理工学研究科

2 関西大学環境都市工学部

を相互に把握できるものとする。また、パケットの宛先ノードの位置情報も既知のものとする。これにより、ノードの移動や休止、故障の際にも柔軟に経路探索が行うことができる。データの送信の際は、GPSRでは Greedy Forwarding と Perimeter Forwarding という 2 種類の転送方法で通信を行う。Greedy Forwarding は、宛先ノードが自ノードの無線半径内に存在しない場合、自ノードの無線半径内にあるノードのうち、宛先ノードに最も近いノードを選んで転送していく。無線半径内のどのノードよりも自ノードの方が宛先ノードに近いが、無線半径が宛先アドレスまでの距離より小さく、直接宛先へ転送できない場合には Perimeter Forwarding が用いられる。Perimeter Forwarding では以下図 1 のように、自ノードと宛先ノードを結ぶ直線を中心に、反時計方向の近隣ノードを探し、転送する。より宛先に近いノードが見つければその時点で再び Greedy Forwarding を開始する。ただし、位置情報を取得するための装置を搭載するには相当のコストがかかり、センサノードの電力消費も増加させる。また、位置取得方法においては GPS を使う場合、使用環境が制限される。さらに、位置情報の精度が十分でない場合、データ転送の経路長が長くなり、さらには到達度が低下してしまう。

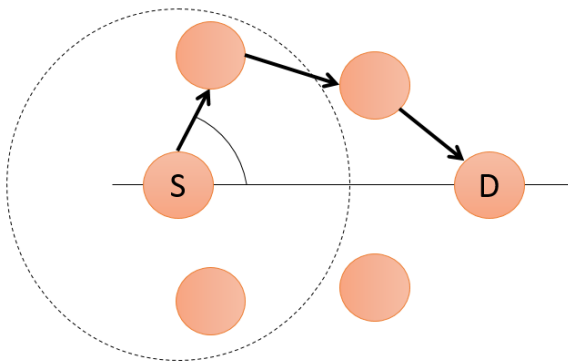


図 1 GPSR 方式

3. 2 LPL

間欠通信アドホックネットワークシステムに、Low Power Listening (LPL) [3]方式がある。LPL 方式における間欠動作は図 2 に示すように送信側始動型の動作を行う。受信可能ノード A, B は一定間隔毎に listen 状態となりチャンネルの状況を調べ、チャンネルがビジー状態であることを確認した場合には受信待機状態となりパケットの受信を待ち、自分宛のデータ受信後には ACK を返す。また、ビジー状態でない場合には再びスリープ状態に戻る。

送信側ノードがノード A にパケットを送信したい場合には、まず間欠周期以上の長さのプリアンプルを送信し、チャンネルをビジー状態にすることでデータ送信を行うことを周囲に通知する。その後ノード A に対してパケットを送信し、ACK の受信を確認して通信を終了する。ただし、LPL 方式では、送信ノードが一定時間プリアンプルの送信によりチャンネルを占有する、特定のノードにしか通信を行えないなど制約が多い。従って、ノードは送信機会が非常に少なくなり送信データを長時間待機させることになる。すなわち、送信ノードにおいて待機パケット数が増える。このような状況は、ストレージ容量に制約がある無線センサノードでは、待機パケット容量不足からパケット破棄を発生させる可能性が高くなる。

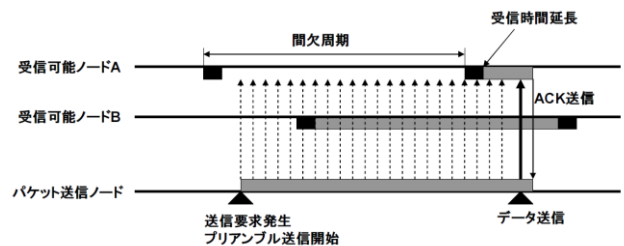


図 2 LPL 方式

2. 3 IRDT

LPL 方式での制限を無くすために考え出された受信側始動型通信方式として IRDT[3,4]方式がある。IRDT 方式では、各ノードがスリープ状態からアクティブ状態へ復帰時に自身の ID をブロードキャスト送信し、自身が受信可能状態であることを通知する受信側始動型の方式である

(図 3) . 送信側ノードは送信パケット発生後、ID 受信を待機し、受信した ID が通信先として適当なノードのものであればリンクを確立してパケットを送信する。パケット送信側ノードは ID を受信後、パケット送信のための SREQ (Send Request) を受信側ノードへ送信する。それを受け取ったノードはパケット受信のための RACK

(Receive Ack) を送信。それを受けた送信側ノードはパケットを送信する。そしてパケットを受信したノードは DACK (Data Ack) を送信し、これを送信側ノードが受信することで、パケットの送信が完了する。IRDT 方式では LPL に見られるようなチャンネルの占有は生じず、負荷に応じて ID 送信間隔を各ノードが変更することと、複数のノードを通信先候補として待ち受けることが可能となっており、信頼性の向上と、待機に要する起動時間の減少が見込める。しかし、IRDT ではノードの間欠時間が増加

すると、LPLよりもパケット到達率が減少してしまう[3,4]。すなわち、ストレージ容量の制約がある無線センサノードでは受信ノードがパケットを保持できない場合が多くなり、データ送信のための状態同期周期が増大する。従って、送信ノードにおいてパケット破棄が発生する可能性が高い。

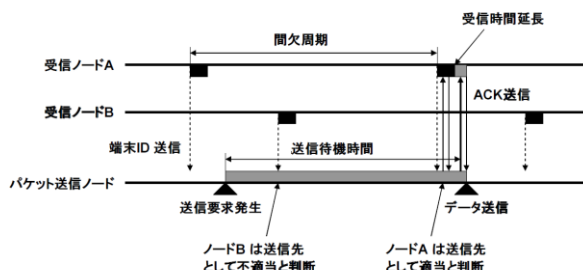


図3 IRDT 手法

2. 3 IRDT のルーティング

IRDTはマルチホップ転送を前提としており、各ノードはパケットの中継処理を行う。この際には、消費電力の増加を防ぐために宛先ノードまで最小ホップとなるようなノードにパケットを転送することが望ましいが、端末の故障/休止等の理由から不可能な場合が存在する。本方式では、最小ホップ経路以外の迂回経路も柔軟に選択するようなルーティングプロトコルを用いることで、信頼性の向上を図っている。各ノードは構成情報管理テーブルを持っており、ネットワークの経路情報を定期的に交換することでテーブルを更新し、最新の経路情報を常に保持している。このテーブルから各ノードはパケットの宛先となるシンクノードまでの中継ホップ数を求めることができる。あるノードSから宛先ノードDまでの最小ホップ数がHである時、ノードSに隣接するノードからノードDまでの最小ホップ数はH-1, H, H+1のいずれかとなる。以降ではこれらをそれぞれ前向きノード、横向きノード、後向きノード、それぞれへの転送を前向き転送、横向き転送、後向き転送と呼ぶこととする(図4)。パケットの転送先としては、最小ホップで転送を終えるために前向きノードが優先される。データ送信時に前向きノードからのIDを受信した場合にはそのままSREQを返信し、横向き転送は全ての前向きノードとの通信が失敗した時に、後向き転送は全ての横向きノードとの通信が失敗した時に行う。ここで通信の失敗とは、RACK, DACKが確認できない場合

としている。また、データの中継回数にはあらかじめ上限を与えており、この最大中継回数を超えない限りは横向き/後向き転送を行う。ただし、横向き/後向き転送を行うとシンクノードまで到達できないような場合にはSREQを返信しない。ただし、最新の経路を維持するために経路情報の定期的な交換を行うが、これによりノードの消費電力が増すと考えられる。

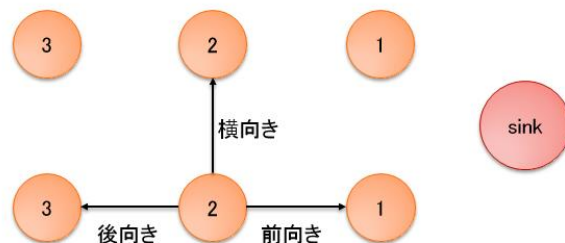


図4 IRDT のルーティング

3. 提案方式

前章で述べたように、隣接ノード間で状態同期を図りデータ転送する場合、受信側ノードのスリープ状態が長い場合、送信側ノードは送信機会が長時間得られないことになる。この場合、ストレージ容量の制約が強いセンサノードでは、送信側ノードにおいて待機パケットのバッファ容量不足からパケット破棄が発生する。また、受信側ノードがアクティブ状態であるにも関わらず、ストレージ容量の制約が強い場合、受信パケットを保持するバッファ容量不足から送信側ノードとの状態同期をとることは困難になる。すなわち、送信側ノードは送信機会がさらに減少し、パケット破棄の可能性が高まる。間欠通信を想定したルーティングでは、送信側ノードにより多くの送信機会を与えるため、データ転送先ノードを複数用意する経路制御を行うが、この経路を維持するため定期的に制御パケットを送信するため電力消費において不利となる。

以上のことから、本稿では次の方式を提案する。

- 複数の転送先の保持および定期的経路維持は行わず、ノードの電力消費を抑制する。
- 厳密な隣接ノード間の状態同期を行わず、送信側ノードが受信側ノードと状態同期が確立している期待できる場合に送信を実施し、パケット待機時間と待機パケット数を減少させ、ストレ

ージ容量制約に伴う待機パケット容量不足からのパケット廃棄を抑制する。

- 上記の通信において受信側ノードがスリープ状態である場合、受信側ノードの隣接ノードが代替転送を行い、パケット損失を抑制する。

3. 1 隣接ノード状態判別方式

IRDTは確実な状態同期をとるため、アクティブ状態にある送信側ノードは受信側ノードのポーリングメッセージを受信するまで待機する。受信側ノードはアクティブ状態に遷移し、かつパケット受信可能（パケット保持可能）であれば、ポーリングメッセージを配信する。従って、ストレージ容量制約による待機パケットバッファ容量が少ない場合、状態同期に時間を要し、結果として経路上の送信側ノードにおいてパケット廃棄を発生させる。

提案方式は各ノードにおいて状態遷移した場合にそれぞれスリープメッセージとアクティブメッセージを隣接ノードへ配信する。送信側ノードは転送先ノードから配信の場合その状態を保持する。この状態保持により送信側ノードは転送先ノード（受信側ノード）がアクティブ状態と判断できる場合、受信側ノードのポーリングメッセージを待たずにパケット送信を実施する。これにより、パケットの待機時間と待機パケット数を抑制し、パケット廃棄を防止する。しかしこの場合、送信側ノードが保持している受信側ノードの状態と実際の受信側の状態が一致しない場合が発生する。以下図5のように、ノードAが「ノードBはアクティブ状態」と状態保持しスリープ状態へ遷移し、その後ノードBからスリープメッセージが送られてきたときは、それを受け取ることができないので、ノードAがアクティブ状態に復帰後、ノードBのスリープ状態を把握できずにパケットを送信してしまう。

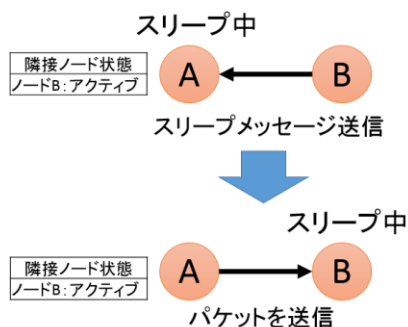


図5 ノードのスリープ状態を検知できない場合

3. 2 Opportunistic 代替経路

前節で述べた問題を解決する通信方式として、隣接ノードのスリープ/アクティブ状態を保持したうえで、パケットのユニキャスト送信時のオーバーヒアリング[5]を利用し、複数の転送先を経路として保持することなく、代替経路により転送を行う。

ノードがパケットをユニキャスト送信した際、送信先ノード以外のノードにもオーバーヒアリングとしてパケットが届く。この場合、通常は自ノードがMACにおいて宛先ノードでないため、送られてきたパケットは破棄される。しかし今回提案する方式では、送られてきたパケットのMACにおける宛先ノードが自ノードでなくても、宛先ノードがスリープ状態である場合、パケットを受信し自ノードが所持しているルーティングテーブルにしたがって受信パケットを転送する。

以下図6に示すように説明する。ノードBはスリープ状態であり、ノードC・Dはそれを知っているものとする。ノードAは、前節で述べたような、ノードBのスリープを知らない状態であり、ノードE宛に、ノードBを経由してパケットを送信している。しかし、ノードBはスリープ状態であるためパケットは届かず、オーバーヒアリングによりノードC・Dへパケットが届いたとする。この時ノードC・Dはまず受信パケットの次ホップノードを確認し、それが自ノードまたはスリープ中のノードの場合のみ、受信パケットを転送する。それ以外の場合はパケットを破棄する。なお、図6の場合ノードEは同じパケットを二つ受信することになるが、後から受け取ったものをシンクノードで破棄する。代替転送したノードの転送先がスリープ状態の場合、代替転送したノードの隣接ノード（オリジナルの転送元ノードは除く）が代替転送を実施する。図6にそれ例を示す。ノードsは、転送先ノード2へユニキャストするが、ノード2はスリープ状態で受信できない。しかし、ノード1と3はノード2がスリープ状態であることを知っている場合、ノード2を代替してそれぞれの転送先ノード5,6へ代替転送する。さらに、ノード5,6がスリープ状態である場合、それを知っているそれぞれの隣接ノード4,7がそれぞれノード5,6の代替として自身の転送先ノードへノード8,10へ転送する。このように経路が断絶している場合は代替経路が見つかるまで前述の条件を満たす隣接ノードによるオーバーヒアリングを繰り返し、結果としてアクティブな経路を探索し、データを転送する。この方式により、代替経路を作成することなく、受信側ノードがスリープ状態であったとして

も、その時点で利用可能な代替経路により宛先へ到達させることができる。結果、総パケット到達率とスループットの向上を図ることができる。この方式を、以降は opportunistic 代替経路方式と呼ぶ。

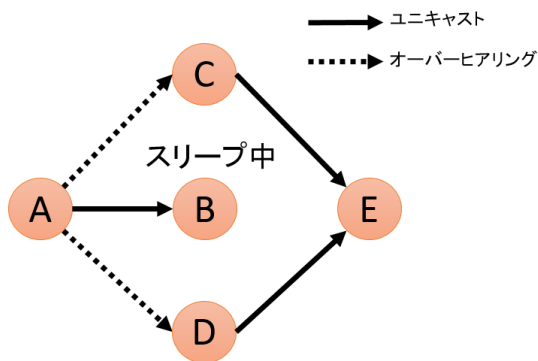


図6 代替経路の利用

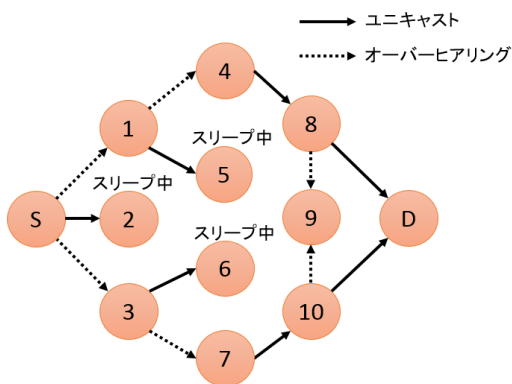


図7 多ホップでの代替経路の利用

4. 実験と評価

4.1 実験条件

以下の三つの方式について実験し、比較・評価を行う。

- opportunistic 代替経路方式
- IRDT 方式
- 経路を保持せず、パケット伝送を全てブロードキャストのみで行う方式

上記三つの方式に対して、表1に示す条件で各センサノードにおけるシンクノードでのスループットの総和とデータ到達率を各センサノードの待機パケットバッファ容量において比較する。ただし、スループットと到着率はセンサノード稼働率で正規化している。なお、実験環境はネットワークシミュレータの QualNet を利用する。評価トラフ

ックは CoAP[6]使用する。シンクノードから各ノードに CoAP の Request メッセージ、各ノードからシンクノードに CoAP の Response メッセージが送られることを想定してシンクノードと各ノード間において双方向 VBR トラフィックを発生させる。また、間欠周期 4(10)s とは 10 秒間に 4 秒スリープするという意味であり、4 秒間スリープした後 6 秒間アクティブ状態になる。使用したルーティングプロトコルは AODV[7]である。

表1 評価条件

評価空間	1000m × 1000m
シミュレーション時間	500s
ノード数	30
パケットサイズ	20~40byte
パケット送信間隔	1s
MAC	IEEE802.15.4
ネットワーク	IP
トランスポート	UDP
待機パケットバッファ容量	120~320byte
間欠周期	4(10)s,8(10)s(シンクノードは除く)

4.2 結果と評価

図8と9に間欠周期 4(10)のスループットと到達率、図10と11に間欠周期 8(10)のスループットと到達率、図12に間欠周期 4(10), 8(10)のセンサノード稼働時間を示す。各方式を比較すると、間欠周期 4(10), 8(10)のいずれの場合もストレージ容量が 120~280byte のとき、opportunistic 代替経路方式がパケット到達率及びスループットが最も良い結果となった。しかし、ストレージ容量が 280~320byte の場合は、IRDT 方式がパケット到達率及びスループットが最も良い結果となった。ノードの総稼働時間は IRDT 方式が最も長く、他の2方式は互いに同じ結果となった。

まず、ブロードキャストのみの方式は、パケットのフラグメンテーションにより過剰な複製データの転送により、パケット衝突と待機パケットバッファ容量不足によるパケット破棄が原因となり、パケット到達率及びスループットが大きく下がっている。

IRDT 方式では送信先からのポーリングメッセージを受信するまでパケットの送信を待機するため、その間に新たなパケットが発生することで待機パケットバッファ容量が圧迫された。また、受信側でポーリングメッセージを出し

た後、複数のノードからパケットが送られた場合も待機パケットバッファ容量の制限によりパケットを破棄したため、スループットと到達率が下がった。特に、間欠周期が長く待機パケットバッファ容量が少ない場合、opportunistic 代替経路のスループットおよび到達率より大きく下回る。また、パケットの送信を待機している間スリープ状態にならないため、ノードの総稼働時間が他方式よりも約 10%増加する。

次に、opportunistic代替経路方式では送信先ノードがスリープ状態でも代替経路の利用によって宛先までパケットを届けることができ、間欠周期が長く、かつ待機パケットバッファ容量が少ない場合で他の方式よりもスループットと到達率が高くなり、その制約が厳しいほど他の方式との差が明確になる。すなわち、他の2つの方式と比較するとopportunistic代替経路はセンサノードにおける消費電力制約とストレージ容量制約が厳しい状況で有効であると考えられる。しかし、スループット、到達率のいずれも十分な値を確保できていない。

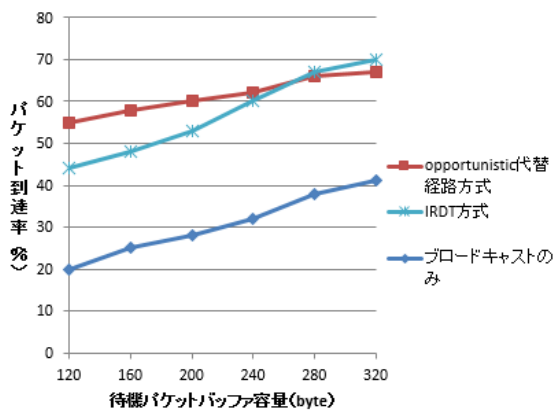


図 8 間欠周期 4(10)でのパケット到達率

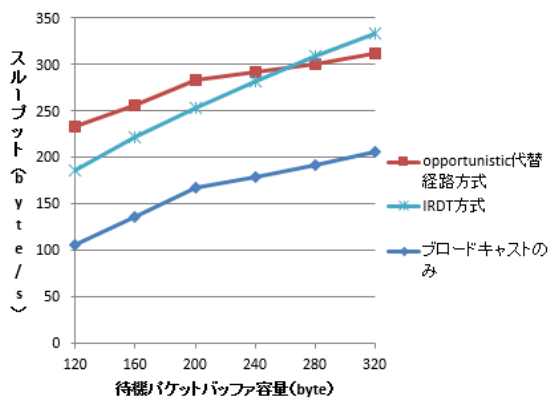


図 9 間欠周期 4(10)でのスループット

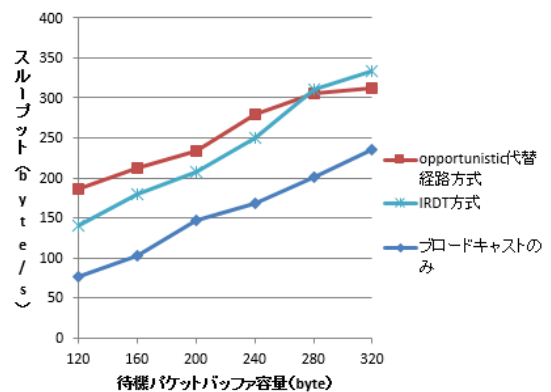


図 10 間欠周期 8(10)でのパケット到達率

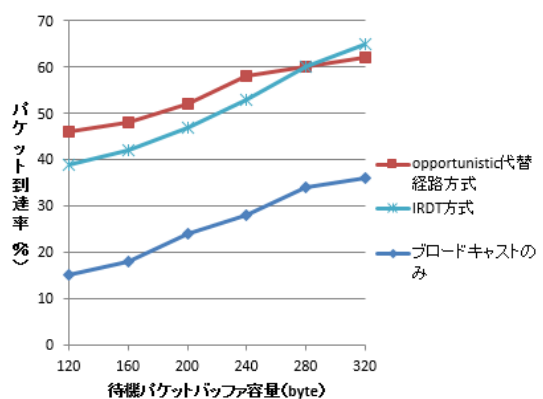


図 11 間欠周期 8(10)でのスループット

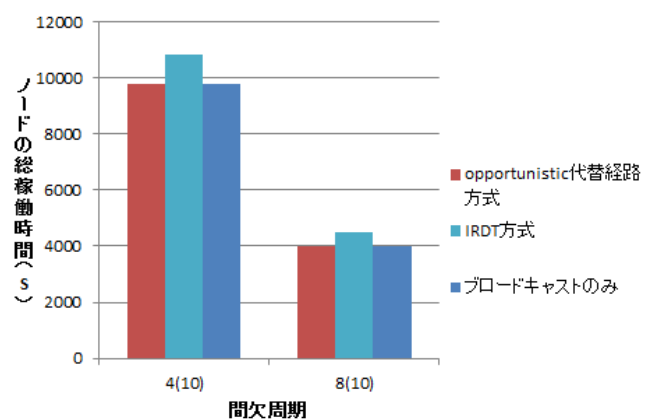


図 12 ノードの総稼働時間

5. まとめと今後の展望

本稿では、無線センサネットワークの間欠通信環境にて、opportunistic 代替経路方式を提案し、IRDT方式と、データパケットの送信をブロードキャストのみで行う方式を、それぞれシミュレーションを行い、パケット到達率、スループット及びノードの総稼働時間を比較・評価を

行った。結果、ノードの待機パケットバッファ容量が少なく間欠周期が長い場合では opportunistic 代替経路方式がパケット到達率とスループットが最も良いものとなった。しかし、そのスループットと到達率は十分な値とはいえない。

以上の結果から、今後はノードの待機パケットバッファ使用量をさらに抑制する改善を行う予定である。

参考文献

- [1] 寺島明男：無線センサネットワークの研究動向，2004
- [2] Brad Karp and H. T. Kung. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. In Mobile Computing and Networking, pp.66-75,1998.
- [3] 小南大智，菅野正嗣，村田正幸，梶内孝明，福山良和，四蔵達之：受信端末始動型間欠動作データ転送方式の性能評価，社団法人電子情報通信学会
- [4] 梶内孝明，四蔵達之，木代正巳，福山良和：メッシュネットワークの周辺ノード数と通信路マージンに関する検討，電子情報通信学会 2007 年ソサイエティ大会(2007)
- [5] Akimitsu Kanzaki, Yuuki Iima, Takahiro Hara, Shojiro Nishio : Overhearing-based Data Transmission Reduction Using Data Interpolation in Wireless Sensor Networks, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University Nomura Research Institute, Ltd., p1-8
- [6] Z. Shelby, K. Hartke, C. Bormann : Constrained Application Protocol(CoAP)draft-ietf-core-coap18, Vol.118, pp5, June 28, 2013
- [7] Charles E Perkins, Elizabeth M Royer : Ad hoc On Demand Distance Vector Routing(1997)