

イベントの移動性を考慮した WSANs の性能評価

楊 涛[†], 池田 誠[†], バロリ レオナルド^{††}

[†] 福岡工業大学大学院工学研究科知能情報システム工学専攻 ^{††} 福岡工業大学情報工学部情報通信工学科

あらまし 大規模の Wireless Sensor Networks (WSNs) の省エネルギー化とイベントをリアルタイムで処理するために Wireless Sensor and Actor Networks (WSANs) が提案された。WSANs は従来の WSNs にアクタノードを配置させる新たなネットワークの形態である。従来、観測領域内で行っているイベントは固定とされてきた。しかし、実際にはイベントは動く可能性が高い。たとえば、生態環境で生物を観測する場合、生物はランダムに移動する。この場合、WSANs はどう作動して全体のパフォーマンスを調査する必要がある。本稿では、イベントの移動性を考慮し、WSANs のデータの伝送成功率 (Goodput) とルーティング効率 (Routing Efficiency: *RE*) を評価指標として利用する。シミュレーション結果から、AODV を用いてイベントが移動する場合に Goodput の変化は少ないが、*RE* は大きく上がることが分かった。

Performance Evaluation of a Wireless Sensor and Actor Network Considering Event Movement

Yang TAO[†], Makoto IKEDA[†], and Leonard BAROLLI^{††}

[†] Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology (FIT)

E-mail: {bd07003, bd07001}@bene.fit.ac.jp

^{††} Department of Information and Communication Engineering, FIT

E-mail: barolli@fit.ac.jp

Abstract Wireless sensor and actor networks can deal with different events in real-time. The energy-saving is a very important problem for large-scale wireless sensor actor networks. In wireless sensor and actor networks, the sensing and acting are performed by sensor and actor nodes. In the previous work, we considered that the event node is stationary in the observation field. However, in many applications the event node may move. For example, in an ecology environment the animals can move randomly. In this work, we want to investigate how the sensor actor network performs in the case when the event node moves. We compare the simulation results for two cases: when the event node is mobile and stationary. The simulation results have shown that the routing efficiency for the case of mobile event node is better than the stationary event node using AODV protocol. Also, the goodput for the mobile event node case does not change too much compared with the stationary event case.

1 はじめに

近年のネットワーク技術や無線通信技術の発展、センサデバイスの小型化および高性能化により、センサデバイス自体に無線通信機能をもたせたセンサノードから構成するネットワークが登場している。環境監視のようなシステムを構成する Wireless Sensor Networks (WSNs) では、対象とするエリア内の環境を継続的にセンシングし、センシングしたデータを管理ノードへ定期的に送信する。また、無線通信と MEMS 技術の発展によりデバイスサイズは小型化されエネルギー消費量は急激に減少している。これにより、様々な場所で WSNs が利用されている。しかし、小規模で利用する場合には問題は少ないが、規模が拡大するとシンクノードまでの距離が長くなるため、パケットを転送する際の消費電力

が大きくなる。その問題を解決するために Wireless Sensor and Actor Networks (WSANs) が提案された。WSNs における多数のセンサにアクタノードを追加するネットワークを WSANs と呼ぶ。アクタノードは、シンクと似ており計算能力が高く、エネルギーも高い。アクタノードを追加することにより、そのネットワークの応用範囲やデータ処理能力を高めることが可能となり、ビルのコントロールシステム、核攻撃検測、ホームオートシステムや環境観測システムなどに適用することができる^{1, 2, 3, 4)}。

従来、WSANs に適用される環境でイベントを固定と考えている。本稿では、環境モデルとして単一のイベントをランダムに移動可能と想定する。例として、図 1 に示すように始点と終点を指定して、ランダムに移動する。シミュレーションモデル

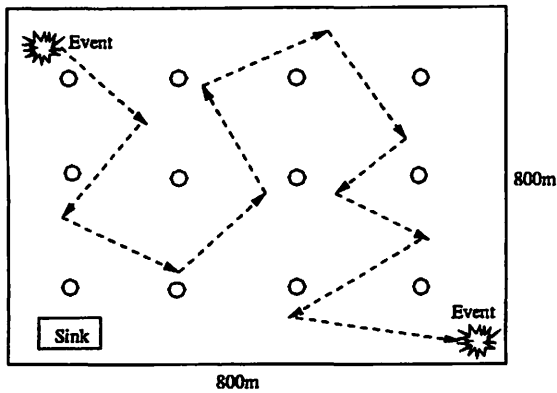


図1 イベントの移動パターン

は無線伝搬モデル Two-ray ground を用いて、Mobile Ad-hoc Network (MANET) プロトコルの Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) と Dynamic Source Routing (DSR) を利用し、WSANs の Routing Efficiency (RE) と Goodput に関する評価を行うためのシミュレーションシステムを実装した。同じ伝搬モデル、イベントをランダムに移動する場合、異なるルーティングプロトコルを利用して WSANs の RE と Goodput の変化を調べる。

本稿の構成は以下のとおりである。2章では WSANs の関連研究について述べ、3章では WSANs の仕組みを述べる。4章ではイベントの輻輳制御について詳述し、5章ではシミュレーション環境について説明し、6章では、評価するパラメータについて説明する。7章ではシミュレーション結果と考察を行い、最後にまとめと今後の課題を述べる。

2 関連研究

文献⁵⁾では WSNs のパフォーマンスについてトレードオフ手法で評価を行った。しかし、従来研究では WSNs はイベントの移動性を考慮しなかった。我々の従来研究では、AODV と DSR を利用し WSNs の Goodput と RE について評価を行った^{6, 7)}。広範囲のモデルの場合、ネットワークのエネルギー消費を減少させるために WSANs が利用されている。文献⁸⁾では WSANs のネットワークトポロジ、伝搬モデル、プロトコルなどから RE の影響について評価している。しかし、イベントの移動性を考慮していない。そこで、本稿ではイベントをランダムに移動させるシミュレーションシステムを実装した。評価指標として WSANs の Goodput と RE について評価する。

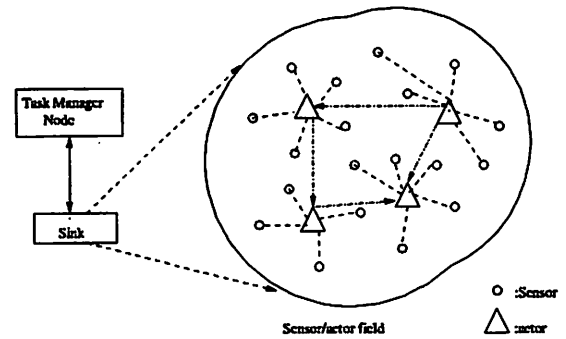


図2 WSANs の仕組み

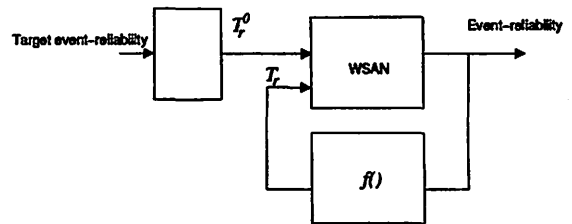


図3 イベント信頼性を考慮する機構

3 WSANs の仕組み

WSANs は図2のように、イベントが発生する範囲にセンサとアクタノードを配置させる。センサノードはイベントをセンシングする。アクタはセンサがセンシングしたデータを処理する。シンクノードはイベント発生地域とは遠く離れているが、センサとアクタと通信が可能のため、ネットワーク全体をコントロールすることが可能である。センサからセンシングした情報は近いアクタを選択し情報を伝える。これにより、一般的な WSNs と比較し、アクタノードを有する WSANs は遅延を短縮し、エネルギー消費の削減が可能である。つまり、ネットワークの生存時間を延ばすことができる。また、WSANs の特徴として、アクタノードは高いデータ処理能力とエネルギーを持ち、ネットワークの通信能力が高い。そのため、センサノードとアクタノードの距離が、センサノードとシンクまでの距離よりも近い場合、イベントが発生時の処理時間が短縮できる。アクタの配置する数はイベントによって動的に変更し配置することができる。さらに、ノード密度が低い部分ではアクタノードをスリープモードにすることでエネルギーの節約や、アクタ間通信を利用することでトラフィックの削減をすることが可能となる。

4 イベントの輻輳制御

本稿では、広域モデル⁹⁾を利用して、シンクまでに転送されるパケット数を制御する。センサノード

ドはセンシングしたデータをアクタまたはシンクまで転送する。しかし、アクタとシンクノードから近い場所でイベントが発生した場合、センサノードはイベントを感知するとその情報を送るがイベントがアクタ、シンクに近い場合は大量のバケットが発生し輻輳が起こる。そのため、輻輳によるバケット棄却を減らすために、データ転送手法に信頼性が要求される。この信頼性を提供するための機構について、図3に具体例を示す。大量なデータが発生してシンクとアクタノードでオーバーフローが発生した場合、コントロール関数 $f()$ で処理が起こり、センサノードにデータ伝送速度を下げる要求を送る。

5 シミュレーション環境

5.1 MANET プロトコル

DSR は完全オンデマンド型の経路制御プロトコルであり、MANET の研究としては初期段階に提案された始点制御ルーティングプロトコルである。動作メカニズムとして、フラディングを用いる経路発見プロセスと経路維持プロセスから構成されており、全てのデータバケットのヘッダに送信元から通信相手までの経路情報を保持して、経路制御を行う。この経路情報は各中継端末がキャッシュすることで、経路発見時間の短縮や経路切断時の回復などに用いて効率化を計る。DSR の最適化に関する機能もいくつか提案されている。たとえば、ネットワークインタフェースカードをプロミスキューモードにすることで、自分宛以外の通信バケットを監視し、より多くのキャッシュ情報を取得して経路制御の最適化を行う。一般的に DSR の実装には OS のカーネル部分の変更が必要となることがあり実装が複雑である。

AODV は、通信要求の発生毎に宛先の探索を行う。また、特徴として各ノードはネットワークの全体像を知らず、宛先ノードと次ホップの情報のみでルーティングを行う距離ベクトル型のルーティングプロトコルである。このように通信開始時に宛先をフラディングで探索するため、頻繁に通信が発生する環境では輻輳が発生しやすく経路表を更新するのにオーバーヘッドになる恐れがある。しかし、距離ベクトル型のプロトコルは動作がシンプルのため改良を施すことでセンサネットワークなどの近距離無線技術に適用することが可能だと考える^{10, 11)}。

5.2 トポロジの設定

図4にシミュレーションモデルのレギュラートポロジを示す¹²⁾。ノード間の距離を $d = \frac{L}{\sqrt{x-1}}$ と定義する (L は正方形の底辺の長さ、 x はノード数を

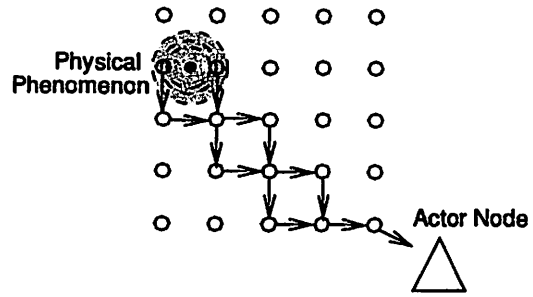


図4 レギュラートポロジ

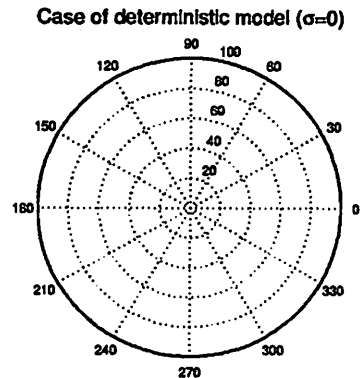


図5 Two-ray ground 伝搬モデル

示す)。シミュレーション・パラメータとして、観測範囲を $800 \times 800[m^2]$ 、ノード数を 12, 64, 100, 256 で評価を行った。

本稿では、イベントの移動環境を模擬するため、イベントの発生位置は始点から終点に向かってランダムに移動する。移動体として車を想定し、移動速度は等速ではなくランダムである。各シミュレーションのイベント開始点と終点を固定し途中の移動パターンはランダムである。シミュレーション時間は 30 秒と設定した。ネットワークシミュレータとして、ns-2¹³⁾ を利用し、ルーティングプロトコルは MANET の AODV と DSR を用いる。

5.3 無線伝搬モデル

本稿では、無線伝搬モデルとして Two-ray ground を利用する。図5に Two-ray ground 無線伝搬モデルの特徴となる伝送距離を示す。このモデルは伝送距離が中心から放射状に円を描くため、伝送距離は等しく障害物が少ない環境に適応力が高い。Two-ray ground の受信電力 (P_r) の計算式を式(1)に示す¹⁴⁾。

$$P_r(d) = P_t - \beta \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

$$r = 10 \log \left(\frac{(4\pi d)^2 L}{G_t G_r \lambda^2} \right)$$

G_r, G_t は宛先ノード、送信元ノードのアンテナの利得である。 λ は波長、 L はアンテナの挿入損失である。 β は無線伝搬 Path Loss である。 オムニアンテナの場合、 $G_r = G_t = 1$ である。 信号の減衰は距離の二乗に比例する。 そして、 Two-ray ground は送信元ノードから宛先ノードまで、信号地面反射が存在する場合に適用する。 そのため、受信電力もアンテナの高さと Path Loss に影響する¹⁵⁾。 h_r, h_t は宛先と送信元のアンテナの高さである。 β によって P_r は減少しやすくなる。 β と h_r, h_t および G_r, G_t の関係は式 (2) を示している。

$$\beta = 10 \log \left(\frac{(4\pi d)^4 L}{G_t G_r h_t h_r \lambda^2} \right) \quad (2)$$

6 評価パラメータ

イベントが移動するとシンクまでの経路が動的に変わる。そこで、センサからシンクまでパケットを伝送の安定性を調査するため、Goodput をパラメータとして評価した。 Goodput はシンクノードにすべてのノードから送られたパケットの到着率である。式 (3) に Goodput の計算式を示す。

$$\text{Goodput}(\tau) = \frac{N_{\text{receive}}(\tau)}{N_{\text{sent}}(\tau)} \quad (3)$$

また、我々はプロトコルのルーティング効率をパラメータとして評価した。 RE の計算式を式 (4) に示す。

$$RE(\tau) = \frac{N_{\text{sent}}(\tau)}{N_{\text{routing}}(\tau)} \quad (4)$$

時間を τ とし、 $N_{\text{routing}}(\tau)$ はルーティングプロトコルを利用して送信したパケット数、 $N_{\text{sent}}(\tau)$ は全センサノードが送ったパケット数を表している。単位時間内でルーティングプロトコルを利用して送ったパケット数が多い場合、 RE が高くなる。 RE は経路制御部だけではなく周囲の環境などに大きな影響を受ける。そこで、本稿ではトポロジ、プロトコル、無線伝搬モデルから WSAWs にどのような影響があるかを調査するとともに、トポロジ、プロトコルおよび伝搬モデルのトレードオフ関係を調べる。

7 シミュレーション結果と評価

図 6 (a) に AODV を用いて、イベントが動いてない場合の WSAWs の RE の平均値を示している。横

軸は伝送レートを示す。ノード数が多くなると、 RE 値は低くなった。これは、ノード数が多くなったため、経路構築に時間がかかったためである。次にイベントが動いた場合の結果を図 6 (b) に示す。 RE 値はイベントが固定している場合と比較するとイベントが動く場合のほうが高くなることが分かった。

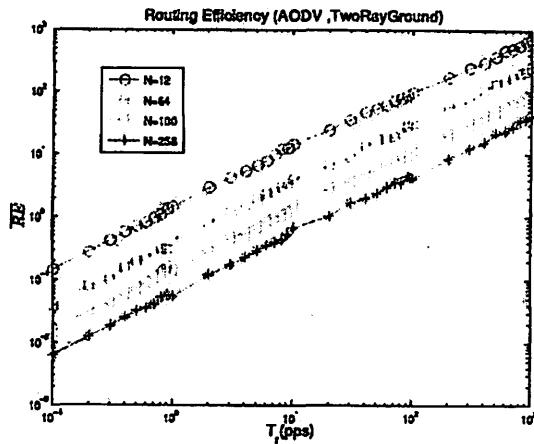
図 7 (a) はイベントを固定した場合の Goodput の平均値で、図 7 (b) はイベントが動く場合の Goodput の平均値である。シミュレーション結果から、イベントが動き、ノード数が増加した場合に、Goodput が下がることが分かった。そして、イベントを固定した場合は Goodput が安定した。

次に、DSR を用いた場合のイベントが動く場合と固定する場合の RE の結果を図 8 (a), (b) に示す。結果として、 RE はイベントを固定する場合のほうが安定している。イベントが動く場合は図 9 (b) に示すように、伝送レートが低く、ノード数が増えると RE がかなり不安定になっている。しかし、伝送レートが 10pps を超えると RE は安定した。つまり、 RE はイベントを固定した場合よりランダムにしたほうが高くなることが分かった。DSR を用いた場合のイベントが動く場合と固定する場合の Goodput の結果を図 9 (a), (b) にそれぞれ示す。 Goodput はイベントが動く場合よりイベントを固定する場合のほうが安定して高くなっている。イベントが動く場合はノード数が増えると、Goodput はかなり下がっていることが分かった。

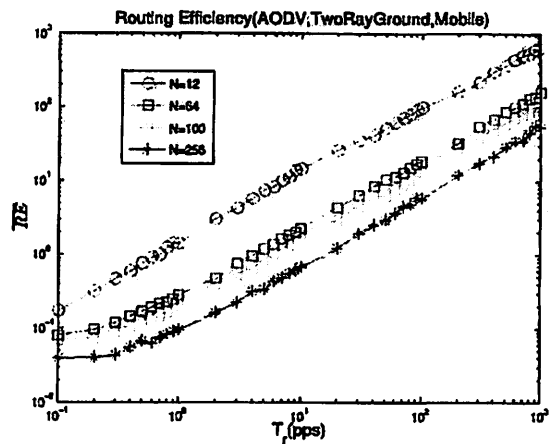
総括として、AODV は全てのノードの経路表を更新するために大量のルーティングパケットを必要とするため RE の値が低くなったと考えられる。 Goodput については DSR より AODV のほうが高くなった。パケットの転送は、経路表に従って行うのではなく、パケットの発信元があらかじめ全体の経路を指定する方式を用いている。そのため、通信が開始するまでに時間がかかり、パケット棄却も発生した。

8 まとめと今後の課題

本稿では WSAWs のイベントの移動性についてネットワークの Goodput と RE の二つのパラメータを利用して定量的に評価を行った。結果として、イベントが移動する場合に DSR より AODV を利用した場合のほうが WSAWs の Goodput が安定した結果となった。また、ノード数が増加した場合にも Goodput は高くなることが分かった。さらに、イベントを固定する場合よりイベントが動く場合のほうが RE の値のほうが高くなることが分かったが、

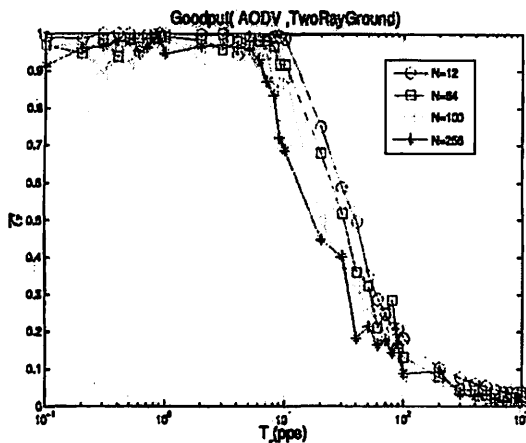


(a) 固定イベント

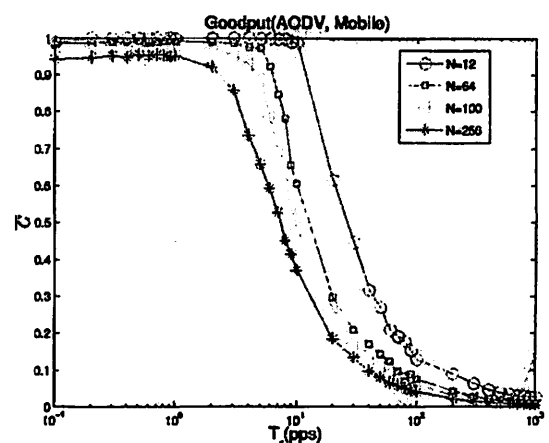


(b) 移動イベント

図 6 AODV を用いた場合の RE の結果



(a) 固定イベント



(b) 移動イベント

図 7 AODV を用いた場合の Goodput の結果

AODV を用いた場合のほうが RE は安定した。これにより、DSR ではトラフィックが多く発生した場合でも WSNs に適用できることが分かった。

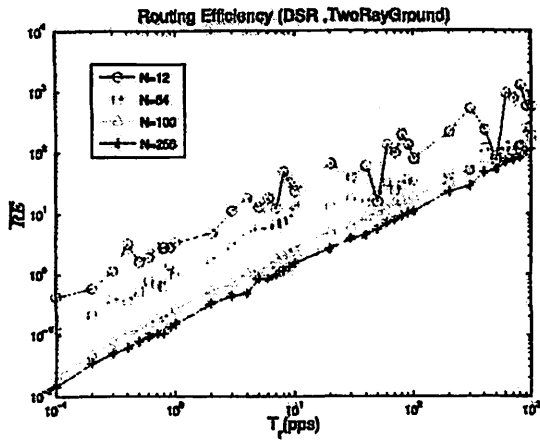
今後の課題として、DSR を用いた場合のトラフィック数が少ない場合に RE が不安定になる問題と、イベントが動く場合に Goodput が下がる問題を解決するために、イベントの移動性に対応したアクタノードの移動手法について提案していく。また、イベントの移動性を考慮した WSNs のエネルギー消費問題、新たなアクタノードの配置、イベントによってのアクタノード数およびモバイルアクタについて研究を進めていく。

謝辞

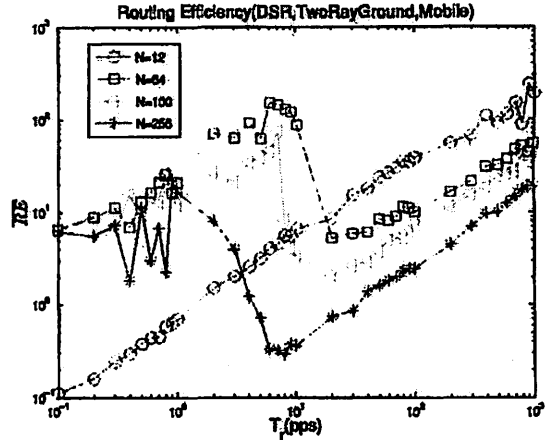
本研究は日本学術振興会と財団法人国際コミュニケーション基金からの研究費による成果である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) S. Giordano and C. Rosenberg, "Topics in Ad-hoc and Sensor Networks", *IEEE Communication Magazine*, Vol. 44, No. 4, pp. 97-97, 2006.
- 2) J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey", *IEEE Wireless Communication*, Vol.11, No. 6, pp. 6-28, December 2004.
- 3) I. F. Akyildiz and I. H. Kasimoglu, "Wireless Sensor and Actor Networks: Research Challenges", *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, Vol. 2, No. 4, pp. 351-367, 2004.
- 4) O. Younis and S. Fahmy, "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.
- 5) S. Tilakand, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman, "Infrastructure Tradeoffs for Sennsor Net-

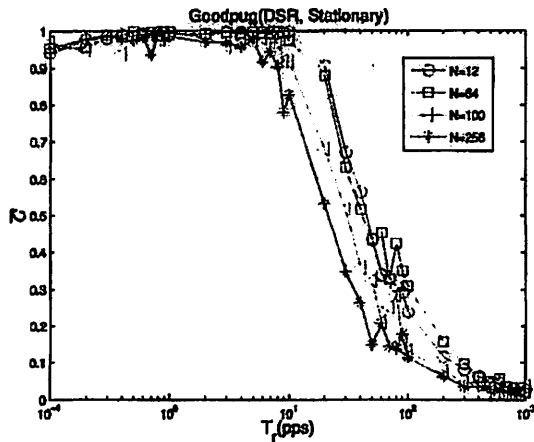


(a) 固定イベント

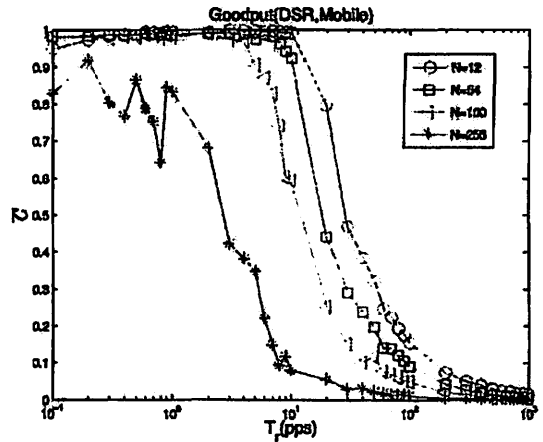


(b) 移動イベント

図 8 DSR を用いた場合の RE の結果



(a) 固定イベント



(b) 移動イベント

図 9 DSR を用いた場合の Goodput の結果

- work”, Proc. of ACM WSNA 2002 (USA), pp. 49-58, September 2002.
- 6) T. Yang, G. De Marco, M. Ikeda and L. Barolli, “Performance Evaluation of a Wireless Sensor Network under Different Radio Propagation Models”, Proc. of FIT-2006 (Fukuoka, Japan), pp. 129-130, September 2006.
 - 7) T. Yang, L. Barolli, M. Ikeda, A. Durresi and F. Khafa, “Performance Evaluation of Reactive and Proactive Protocols for Ad-Hoc Sensor Networks Using Different Radio Models”, Journal of Interconnection Networks (JOIN), Vol. 8, No. 4, pp. 387-405, December 2007.
 - 8) T. Yang, M. Ikeda and L. Barolli, “Performance Evaluation of Routing Efficiency of Sensor and Ad hoc Networks using Different Radio Models”, Proc. of DICOMO-2008 (Sapporo, Japan), pp. 102-107, July 2008.
 - 9) Ö. B. Akan and I. F. Akyildiz, “Event-to-sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 13, No. 5, pp. 1003-1016, 2005.
 - 10) C-K. Toh, 構造計画研究所 訳「アドホックモバイルワイヤレスネットワーク」, 共立出版, 2003.
 - 11) C. Perkins, Editor. “Ad Hoc Networks”, Addison-Wesley, 2001.
 - 12) C. Cooper, “A Note on the Connectivity of 2-regular Digraphs”, Random Structures Algorithms, Vol. 4, pp. 469-472, 1993.
 - 13) ns-2, Network Simulator 2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
 - 14) A. Salhieh and L. Schwiebert, “Power-aware Metric for Wireless Network”, International Journal of Computers and Applications, Vol. 26, No. 2, pp. 119-125, 2004.
 - 15) L. Christensen, T. H. Clausen, G. Hansen and G. Behrmann, “The Optimized Link State Routing Protocol, Evaluation Through Experiments and Simulation”, Proc. of IEEE Symposium on Wireless Personal Mobile Communications, pp. 841-846, September 2001.