

## 無線伝搬モデルを利用したセンサネットワークのための DSDVプロトコルの性能評価

楊 涛<sup>†</sup> デ マルコ ジュゼッペ<sup>††</sup> 池田 誠<sup>†</sup> バロリ レオナルド<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 福岡工業大学大学院工学研究科情報通信工学専攻 <sup>††</sup> 福岡工業大学情報工学部情報通信工学科

あらまし：本稿では無線伝搬モデル (Shadowing, TwoRayGround) とトポロジーを考慮した、センサネットワークのための DSDV プロトコルの性能評価を行う。NS-2 を用いてセンサネットワークのバケットの伝送成功率についてシミュレーションを行い、無線伝搬モデルは DSDV にとの影響があるのか統計的に分析する。評価パラメータとして、バケットの伝送成功率 Goodput を測定し、シミュレーション結果を報告する。

## Performance Evaluation of DSDV Protocol for Sensor Networks using Different Radio Models

Tao YANG<sup>†</sup> Giuseppe DE MARCO<sup>††</sup> Makoto IKEDA<sup>†</sup> Leonard BAROLLI<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology (FIT)

E-mail: {mgm05015, mgm05001}@ws.ipc.fit.ac.jp

<sup>††</sup> Department of Information and Communication Engineering, FIT

E-mail: {demarco, barolli}@fit.ac.jp

**Abstract:** In this paper, for analysing the performance of DSDV protocol, we consider the behaviour of a wireless sensor network from the point of view of the congestion control. This problem is very important in very dense networks and standard solutions are still in their infancy. By means of simulations, we analyse a simple packet repetition scheme as congestion and reliability control. In contrast to other works, we generalise the type of radio model. With these settings in hand, we study the metrics: the perceived goodput at the sink node.

### 1 はじめに

最近センサネットワークやネットワークセンシングという言葉をよく耳にするようになった。元々センサとは、温度、圧力、音、光などの物理量を計測する装置のことで、人間生活にとって欠くことのできないものである。また、センサから得られた情報は、通信ネットワークによって遠く離れた場所に送られ、遠隔監視、制御などに使われている。これは、テレメータと呼ばれ、センサネットワークの一種といえる。しかし、新しいセンサネットワークは、センシング機能だけでなく、情報処理機能と通信機能を備えた多くのセンサノードからなり、それらが互いに通信網によって接続されて、協調動作を行う。センサノードは単にセンシングの高度化をもたらすばかりでなく、今後の情報通信分野や

商品管理、物流、運輸、製造支援、環境測定、セキュリティ、救助活動などの基盤技術に応用できる可能性をもっている。

センサネットワークは、センシング、情報理論、情報伝送、検出、ネットワーク、人工知能、制御理論、システム理論など多方面の分野を融合して成り立つものである。センサネットワークが従来のネットワークと異なる点は、その構成要素である情報源、センサノード出力、ネットワークなどが不安定、不確実、低電力容量、低計算容量、低通信資源量など、厳しい制約条件のもとにあることで、これを前提としてシステムの最適化を図る必要がある<sup>1)</sup>。

本稿では、無線伝搬モデルを利用したセンサネットワークのための DSDV プロトコルの性能に評価を行うためシミュレーションシステムを

実装し、センサネットワークの伝送成功率などの問題について報告する。

本稿の構成は以下のとおりである。まず、2章ではセンサネットワークのしくみを紹介する。3章では関連研究について述べる。4章ではDSDVプロトコルについて説明する。5章では、シミュレーションシステムのトポロジーの設定について説明する。6章と7章では伝搬モデルと輻輳制御を述べ、8章ではシミュレーション結果を報告する。最後はまとめと今後の課題を述べる。

## 2 センサネットワークの仕組みの特徴

センサネットワークでは、基本的に数多くの小型センサノードと比較的少数のシンクノードから構成される。センサネットワークの位置は、あらかじめ決められたものではなく、センシング対象地域(センサフィールド)に散在し、それ自身が移動することもある。センサネットワークの地理的構成例を図1に示す。そこで、幾つかのノードでセンシングが行われ、処理されたデータはシンクノードに送られる。その際、図1に示されるようにデータは幾つかのノードで中継することによりシンクノードに到達され、マルチホップで伝送される。伝送経路は、図2では単独となっているが、複数存在する場合もある。各ノードの位置について柔軟性を持たせるために、ノード間の通信は、アドホックネットワークのように自発的構成される。観測、測定された情報は、最終目的端のシンクノードで利用目的にした形に融合、加工されるが、図1に示されるように、途中でローカルに情報が融合され、冗長性を取り除き、通信負荷を減らすことも考えられる<sup>2)</sup>。

センサノードは、図2に示すように、センシング機能とともに情報処理機能と無線通信機能、そして電源を有するのが通常である。このように複数の機能があるにもかかわらず、形状はできるだけ小型で、消費電力は低く、価格も安いことが望ましいとされている。

## 3 関連研究

文献<sup>3)</sup>ではトポロジーにおけるセンサネットワークの性能評価を行っている。しかし、従来の研究ではセンサネットワークのトポロジーのみに重点が置かれているが、実際には、無線伝搬モデルによってセンサネットワークの性能

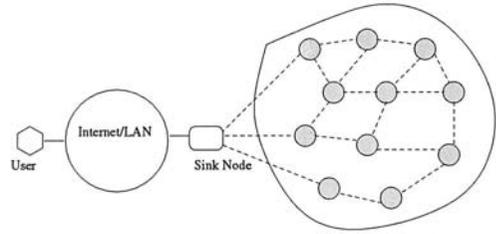


図1 センサネットワークの構成

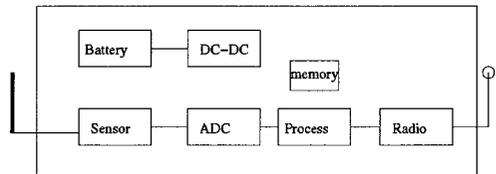


図2 センサノードの機能構成例

に大きな影響があると考えられる。そのため、センサネットワークのケット伝送成功率、エネルギーについて評価した<sup>4, 5)</sup>。しかし、これまでの研究では、フラット型のネットワークプロトコル(AODV, DSR)についてシミュレーションを行った。本研究では、テーブル駆動型ルーティングプロトコルDSDVを考慮してセンサネットワークの性能評価の実験を行う。

## 4 DSDVプロトコル

DSDV(Destination Sequenced Distance Vector)<sup>6)</sup>ルーティングは、古典的なBellman-Fordルーティングアルゴリズムをもとにした、テーブル駆動型ルーティングプロトコルであり、モバイルネットワーク内のルータ間でルーティング情報がループしないように改良が加えられている。モバイルネットワーク中の各ノードは、同一ネットワーク内の到達可能なすべての宛先とその宛先までのホップ数(無線ホップ数)を記録し、ルーティングテーブルを管理しているので、送信元ノードが経路を必要とするしないに関わらず、常に利用可能なルーティング情報が準備されている。

シーケンス番号方式は、経路が新しいか古いかをモバイルホストが判断する。ルーティングテーブルの更新情報は、テーブルの整合性を維持するためにネットワーク全体に定期的に送信

される。従って、ネットワーク中に多くの制御トラフィックを生成し、ネットワーク資源の利用効率を低下させる。この問題を軽減するために、DSDVは2種類のルーティング情報更新用パケットを使用する、1つは、フルダンプ (full dump) である。このパケットは、利用可能なすべてのルーティング情報を格納しており、ネットワークプロトコルデータユニット (NPDU) を複数要求することができる。ノードの移動が時々発生する程度では、このパケットが送信されることはあまりない。もう1つは、フルダンプより小さな差分 (incremental) パケットである。こちらは、最後に行ったフルダンプ以降の更新情報のみを送信するために用いる。

新しいルーティング情報をブロードキャストする時、宛先ノードのアドレス、宛先までのホップ数、そしてそのブロードキャストの新しい一意なシーケンス番号とともに、宛先についての情報を受信した時のシーケンス番号を格納し、最も新しいシーケンス番号を持つ経路が常に使用される。2つの経路更新情報が同じシーケンス番号を持つ場合、ホップ数の少ない経路を選択する。

## 5 トポロジーの設定

アプリケーションのためのセンサネットワークのトポロジーはランダムトポロジー図3(a)とレギュラー図3(b)の2つに大別する<sup>7)</sup>。実際環境において、トポロジーの形状は、センサノードをどんな場所に配置させるかにより変化する。例えば、広大な森林にセンサノードを配置する場合、ノードを飛行機などで地上に大量にばら撒き、ランダムに配置させることでコストを削減させることができる。逆に、インドアモニタリングや橋の安全制御など、特定の幾何型にノードを配置させる場合はレギュラートポロジーを利用する。トポロジーがランダムの場合ノードの密度 $\rho$ は $\rho = \frac{N}{A}$ である。Nは配置されたノードの数、Aはノード配置された面積を示す。レギュラーの場合、図3(b)のノード間の距離はstepと設定し、ノード数は $d = \frac{L}{\sqrt{x}-1}$ となる。Lは正方形の底辺の長さを示す。本研究ではレギュラートポロジーを利用したネットワークを構築し、シミュレーションを行った。シミュレーションのパラメータは表1で表す。

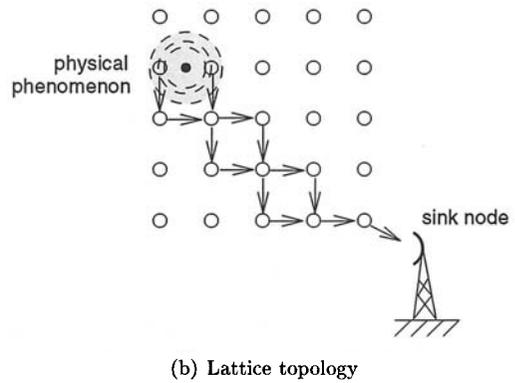
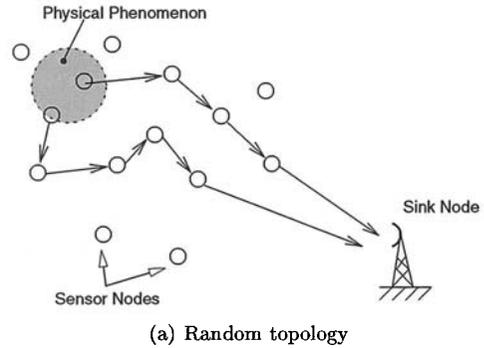


図3 WSNのトポロジーモデル

## 6 無線伝搬モデル

本研究では、無線伝搬モデルとしてTwoRay-GroundとShadowingを利用する。

### 6.1 TwoRayGround 伝搬モデル

TwoRayGround 無線伝搬モデルは図4で示すように中心から放射状になっている。このモデルの特徴は同時に同じパワーで届け、距離のRange(伝送半径)は等しい<sup>8, 9)</sup>。TwoRay-Ground 伝搬モデルは障害物がない環境によく適応する。

距離dの場合、受信パワー $P_r$ と設定する。受信パワーは式(1)で表す。

表 1 シミュレーションパラメータ

GRID	
Service area size	$L^2 = (800 \times 800)(m^2)$
Number of nodes	$N = 16/256$

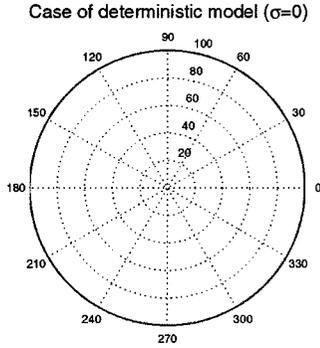


図 4 TwoRayGround 伝搬モデル

$$P_r(d) = P_t - \beta \quad (1)$$

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

$G_r, G_t$  は宛先ノード、送信元ノードのアンテナの (gain) である。λ は信号の波長、L はアンテナ回路で挿入損失である。β は無線伝搬パスロスである。アンテナは Omni の場合、 $G_r = G_t = 1$  である。信号の減衰は距離  $d_2$  に比例する。TwoRay-Ground は送信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。受信パワーもアンテナの高さとパスロスに影響する<sup>10)</sup>。

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

$h_r, h_t$  は宛先と送信元のアンテナの高さである。β によって  $P_r$  を減少し安い。距離  $d > d_c$  の場合、送信元からより遠くなる。

## 6.2 Shadowing 伝搬モデル

Shadowing 伝搬モデルを図 5 で示す。パスロスを 2 つの値で表示する、固定値とランダム値

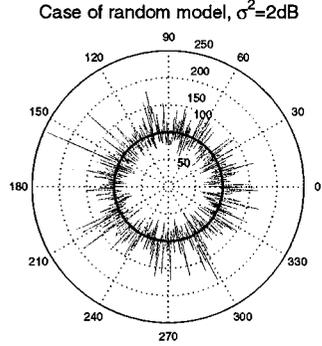


図 5 Shadowing 伝搬モデル

(r.v) によって、参考距離は  $d_0$  と設定する。

$$\beta(d) = \beta_0 + X_\sigma \quad (3)$$

$$\overline{P_r(d)} = P_r(d_0) - \beta_0 \quad (4)$$

$$= P_r(d_0) - 10\alpha \log(d/d_0)$$

α は環境の種類によって決まるジェネリックパスロス指数である。Eq.(5) 受信パワーは平均値である。実際の受信パワーは  $P_r(d) = \overline{P_r(d)} + X_\sigma$ 、 $X_\sigma$  の値は r.v に設定する。Gaussess 分布の値は  $\sigma^2$  である。パスロスは Log-normal 分布になる。パスロスの変化量は方向によって不規則になる。信号の半径  $r_0$  は信号が到達できない距離と定義する。パスロス β はパスロス Threshold (最小値)  $\beta_{th}$  である。この値は宛先ノードの感度  $RX_{tr}$  に直接影響する、パスロスの Log-normality 半径の値も高くなる。

$$r_0 = 10^{\frac{\beta_{th} - \alpha}{10\alpha}}$$

例えば、 $\beta_{th} = 40dB$ 、伝送半径は 200m でほぼ 2 倍となる。Shadowing の特性によって、送信元から近いノードが信号を受け取れず、逆に送信元から遠いノードが信号を受け取れる可能性もある<sup>11)</sup>。

## 7 輻輳制御

無線センサネットワークの規模が大きくなると、多くのセンサノードからデータを集めるために、輻輳制御が必要である。輻輳制御は、イ

イベントの信頼性のレベルに直接関係し、アプリケーションに依存する。例えば、モバイルを追跡するのに応用する場合、ユーザーは高い精密度の追跡を望む。周囲の環境の変化により精密度が異なる。信頼性はまたハードウェアにも依存する。WSNにおいて、イベントの探知は複数のセンサノードで実行される。従って、常に不十分な資源であるバンド幅資源が、全てのセンサノードの間で十分に使用されなければならない。

TCPはWSNsの独特の必要条件に適合しない。実際、TCPは輻輳ウィンド支配に基づき、任意パケットは受信者からACKパケットで認められることが必要である。送られたパケットと認められたもののシーケンス数の不適当な組み合わせは、ノードを送り届けるバッファの超過のために輻輳を知らせる。パケットロスのため、TCPは輻輳ウィンドを減らし、データの再伝送が始まる。この過程はWSNsで最適ではなく、パケットロスはラジオ媒体とラジオ不規則性に影響される。このデータを中心とするモデルはESRT(Event-to-Sink Reliability Transport)と呼び、このモデルはシンクノードといくつかのセンサノードからなる。センサノードは物理的なイベントをセンシングしてシンクノードにパケットを伝送する。センサノードのReporting Frequencyは時間単位につき出されるパケットの数と定義する。この頻度はセンサの量子化ステップ、現象のタイプ、シンクノードの乱れに依存する。検知されたデータの空間での相互関係を利用することによって、Reporting Frequencyは目的として、できるだけ信号の乱れを無くすため、Reporting率が最大値のノードのサブセットを選択する。また、パケットロスがあるためReporting率の低い値は密度が高いノードに伝送し、そこで、センサに信頼性パケット通信を行う。センサノードがイベントをセンシングする場合、シンクとの間にUDPリンクを作り、パケットを繰り返し伝送する。

## 8 シミュレーション結果と評価

本研究では $N_s \cdot 2^{12}$ を利用して、センサネットワークのGoodput(パケットの伝送成功率)について実験を行った。式(5)のようにシンクノードが受信したパケット率と伝送パケット率を割ったGoodputを定義する。

表2 ラジオモデルのパラメータ

RADIO MODEL	SHADOWING
Pathloss Coefficient	$\beta = 2.7$
Variance	$\sigma_{dB}^2 = 16(\text{dB})$
Frequency	916(MHz)
Antenna	Omni

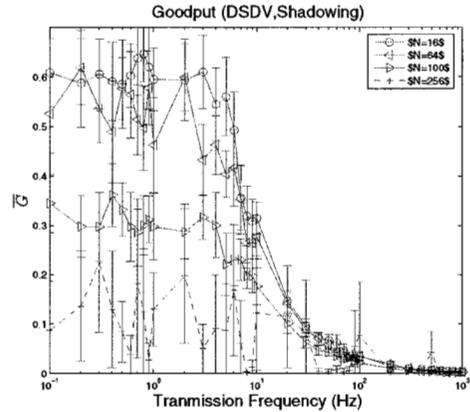


図6 Shadowingモデルを使用したGoodputの平均値

$$G(\tau) = \frac{N_r(\tau)}{N_s(\tau)} \quad (5)$$

$N_r(\tau)$ はシンクノードが受信したパケット率、 $N_s(\tau)$ はイベントを検知したノードがシンクに伝送するパケット率である。時間は $\tau$ と設定する。本研究ではイベントの信頼率のアプローチを用いて輻輳制御を行う。このメトリックはシンクノードの乱れた信号を測定することができる。シンクノードは特別なメッセージで乱れた信号を収集する。

図6はShadowingモデルとDSDVプロトコルを用いてセンサネットワークのGoodputの平均値を示す。Goodputの値は期間 $T_r$ ( $10^{-1}$ から $10^1$ )の間、ノード数が増えるとネットワーク伝送成功率が低くなる。ノードが256個の時、ネットワークGoodputの値相当低くなっている。これはネットワークの不安定状態になっていることを示す。TwoRayGroundモデルを利

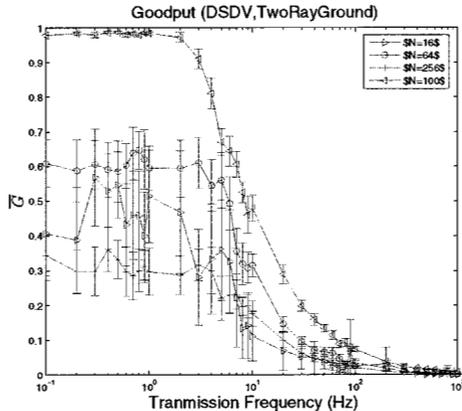


図7 TwoRayGroundモデルを使用したGoodputの平均値

用する場合、結果は図7に示す。Goodputの値はShadowingの場合より少し高くなった。例えば、ノードが16個の場合、TwoRayGroundのGoodputの値は比較的高い値である。その後徐々に下がり、ネットワークが不安定になってきたことを示す。原因としてDSDVプロトコルテーブルを維持するためにネットワークの多くの制御トラフィックが発生したことと考えられる。

## 9 まとめと今後の課題

今回の研究は、無線伝搬モデルの不規則性を利用して、センサネットワークのためのDSDVプロトコルの評価を行った。伝搬モデルとトポロジーの変化によってネットワークの性能に大きな影響がある。無線センサネットワークの輻射制御はネットワークMACプロトコルとルーティングプロトコルに影響される。今回ESRT輻射制御を実施したが、シミュレーションの回数が少なかった。今後の課題としてシミュレーションの回数が増やしシミュレーションを行う予定である。また、DSDVについてセンサネットワークのエネルギーの消費量、パケットロス、ルーティングの効率などの問題について研究していきたい。

## 参考文献

1) S. Giordano and C. Rosenberg, "Topics in Ad-hoc and Sensor Networks", IEEE Communi-

cation 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) S. Tilakand, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman, "Infrastructure Tradeoffs for Sennsor Network", Proc. of ACM WSNA 2002 (USA), pp.49-58, September 2002.
- 4) T. Yang, G. De Marco, M. Ikeda, 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.
- 5) T. Yang, G. De Marco, M. Ikeda, L. Barolli, "Performance Analysis of the Event-Reliability Approach for a Lattice Wireless Sensor Network with Radio Irregularities", Proc. of IEEE TENCON-2006 (Hong Kong), CD-ROM, 4 pages, November 2006.
- 6) 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.
- 7) C. Cooper, "A Note on the Connectivity of 2-regular Digraphs", Random Structures Algorithms, Vol.4, pp.469-472, 1993.
- 8) B. Bollobas, "Random Graph", Academic Press, 1985.
- 9) A. Salhieh and L. Schwiebert, "Power-aware Metric for Wireless Network", International Journal of Computers and Applications, Vol.26, No.4, 2004.
- 10) 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.
- 11) G. Zhou, and L. Tong, S. Krishnamurthy, and J. A. Stankovic, "Impact of Radio Irregularity on Wireless Sensor Networks", Proc. of 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys-2004) (New York, USA), pp.125-138, 2004.
- 12) NS-2, Network Simulator 2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.