

確率事象駆動型モデルを利用した 無線ネットワークシミュレーション高速化手法の提案

村中 慎治 廣森 聡仁
山口 弘純 東野 輝夫

本稿では、シミュレーションの実行効率を向上させるために、あらかじめ送受信ノード周辺のトラフィックを確率分布としてモデル化し、その確率分布に基づき MAC 層のパケット送受信の成否を決定する離散事象駆動型モデルを提案する。提案手法では、ノード単位で使用するシミュレーションモデルを切り替えることが可能で、あるノード群には詳細な従来の離散事象駆動型モデルを使用し、残りの部分には提案モデルを使用するなど、評価目的やシミュレーションに使用する計算機資源に応じ、柔軟なシミュレーションを行うことができる。IEEE 802.11 DCF に関する評価実験の結果、ノード数 50 のネットワークに対し、パケット配送に関わるイベント数を 1/50 に削減しつつ、パケットロス率の差を 1% バックオフ時間の差を 0.6ms 程度に抑えることができた。また、提案手法と離散事象駆動型モデルを組み合わせることで、イベント数を 1/10 としつつ、従来のモデルと同等のシミュレーション精度を実現できることを示した。

Fast Simulation Method for Wireless Network using Stochastic Event-driven Mode of CSMA/CA Protocols

SHINJI MURANAKA, AKIHITO HIROMORI,
HIROZUMI YAMAGUCHI and TERUO HIGASHINO

In this paper, we propose a simulation method that allows using a stochastic model of frame transmission event scheduling in CSMA/CA-based MAC protocol for speed-up of an event-driven wireless network simulation. The proposed stochastic event-driven model examines whether each node can send a packet or not with several types of probabilities. In addition, we can use this stochastic model for any set of simulated nodes in a simulation scenario keeping reasonable accuracy, which allows flexible simulation depending on given network scale and required simulation speed with limited computation resources. The simulation results have shown that the proposed method could reduce the required number of events, keeping simulation accuracy by combining the proposed model and the fully event-driven model.

1. はじめに

近年、計算機間の通信だけでなく、様々な社会インフラの一部として無線ネットワークが用いられており、それらの通信特性を評価する必要性が高まっている。無線ネットワークの性能評価手法としては、実機を用いた実環境実験や数式による定性的な評価手法、仮想ネットワークを構築するネットワークシミュレーションなどが挙げられる。実環境実験は、詳細な評価結果を得られる反面、実験環境の構築コストが高く、様々な状況下での性能評価を行うことが困難である。一方、数式による定性的な評価においては、通信方式やそれに関わる様々な手続きが数式により抽象化されるため、評価目的によっては利用できない場合がある。そのため、様々な状況を低コストで再現でき、かつ実環境に近い再現精度をもつネットワークシミュレーションが頻繁に用いられている。

ネットワークシミュレーションにより性能評価を行う際においても、大規模なネットワークを対象とした性能評価やネットワークアプリケーションに対する膨大な数のテストを行うため、ネットワークシミュレーションで必要とされるコストを削減する必要がある。無線ネットワークのシミュレーションにおいては、MAC 層の処理に多くの時間が費やされることが知られており^{2),3)}、MAC 層のシミュレーションを抽象化することで、シミュレーションの効率を向上させる手法がいくつか提案されている。

それらの手法のほとんどは、評価対象としてネットワークフローを想定しており、着目するフローに対しては詳細なシミュレーションモデルを、それ以外のフローに対しては簡略化したネットワークモデルを適用している。しかしながら、評価目的によっては、ネットワークフローだけでなく、ノードに着目したシミュレーションが求められる。例えば、様々な場所に配置されたセンサで計測した情報をセンサネットワークを介して収集するシステムを考える。このシステムの評価では、シンクノード周辺の領域では高い再現精度が求められる一方、周辺のセンサでは高い再現精度は必要とされないため、評価目的に則し、ノード毎にネットワークモデルを選択する方がより適切といえる。

本稿では、シミュレーションの実行効率を向上させるために、MAC 層におけるパケット送受信の成否を確率に基づき決定する確率事象駆動型モデルを提案する。このモデルでは、あらかじめノード周辺のトラフィックを確率分布としてモデル化し、その確率分布に基づきパケット送信やパケット受信の成否を決定する。また、提案モデルと離散事象駆動型モデルは、ノード単位で切り替えることが可能で、評価対象には詳細な離散事象駆動型モデルを使用し、残りの部分には提案モデルを使用するなど、評価目的やシミュレーションに使用する計算機資源に応じ、柔軟なシミュレーションを行うことができる。評価実験では、提案モデルと従来の離散事象駆動型モデルを組み合わせることにより、シミュレーション精度を保ちつつ、パケット送受信に要する処理を大幅に削減できることを示す。

†1 大阪大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

2. 関連研究

一般的なネットワークシミュレーションは、離散事象シミュレーション方式を採用しており、無線チャネルの獲得、パケットの送信および受信など様々な手続きはイベントの系列として表され、イベントを順に実行することにより、ネットワークの状態変化を再現している（離散事象駆動型モデル）。パケット配送に関わる細かな手続きを個々のイベントとして表しているため、シミュレーション結果の正確さは保たれる一方、多数のイベントを処理する必要があるため、現実的な時間でシミュレーションを行うことはできない。

一方、パケットを対象とするのではなく、ノード間で流れるパケットの流れ（フロー）を対象とするシミュレーション手法が提案されている（流体モデル）。この方法では、各ノードのキューに保持されるパケット量を複数の微分方程式により表し、この式を解くことにより、ネットワークに流れるトラフィック量を再現している。このモデルは TCP のスループット評価などネットワーク層における評価には適しているが、個々のパケットを対象としていないため、ネットワークアプリケーションや MAC 層の評価等には適応できず、利用範囲が限られている。また、別の手法として、確率事象駆動型モデルを用いたシミュレーション手法が挙げられる^{5),6),8)}。この手法も離散事象駆動型モデルと同様に離散事象シミュレーションを用いているが、パケット配送に関わる個々の手続きを一つずつイベントとして表すのではなく、いくつかの手続きを一つのイベントとして表す。例えば、チャネル状態の確認、チャネルの獲得、パケット送信といった一つのパケットを送信する際に行う一連の処理を一つのイベントとし、その成否を確率によって判断する。

流体モデルや確率事象駆動型モデルは、シミュレーションの効率の向上には寄与する一方、離散事象駆動型モデルと比較し、シミュレーションの正確さは劣る。この欠点を解決するため、複数のシミュレーションモデルを用いる方法が提案されている^{1),4),7),9),10)}。文献 9) では、離散事象駆動型モデルと流体モデルを組み合わせた複合シミュレータが提案されている。この手法では、フローを実現するモデルとして、離散事象駆動型モデルと流体モデルのいずれかをフロー毎に選ぶことができる。同様の手法が文献 1), 4), 10) でも提案されており、評価の対象となるフローに対しては、離散事象駆動型モデルを適応し、それ以外のバックグラウンドフローに対しては流体モデルを適応することで、シミュレーション結果の正確さを保ちつつ、シミュレーションに要する計算量を削減している。これらの手法については有線ネットワークを対象としていたが、無線シミュレーションを対象としたモデル組み合わせ手法も提案されている⁷⁾。この方法では、バックグラウンドのフローについては確率事象駆動型モデルを適応している。このようにモデルの組み合わせにより、シミュレーション精度を保ちつつ、シミュレーション効率の改善を実現しているが、対象とする評価対象がフローのみであり、パケットレベルでのシミュレーションが求められる評価には適応することができない。

一方、我々が提案する方法は、ノード単位でシミュレーションモデルを選択することがで

きる。提案モデルでは、IEEE 802.11 DCF における様々な手続きを複数の確率に基づき計算し、その確率に基づき、パケットの送受信に関わるイベントを抽象化している。このモデル化により、MAC 層において複数のモデルを使用することを可能とし、パケットレベルのシミュレーションにおいても高速化を実現しつつ、高いシミュレーション精度を達成する。

3. 離散事象駆動型モデルによる IEEE 802.11 DCF のモデル化

本章では、離散事象駆動型モデルにおいて、IEEE 802.11 DCF による送受信処理がどのように実現されているかを説明する。IEEE 802.11 DCF では、CSMA/CA プロトコルに基づき、各ノードは自律的に通信を行う。あるノードがパケットを送信する際には、パケット衝突を避けるために、ランダム時間待機した後にパケットを送信する。この処理をバックオフと呼ぶ。バックオフ中に周辺ノードによるパケット送信を検知した場合には、バックオフを一時中断し、そのパケット送信時間分だけさらにパケット送信を遅らせる。離散事象駆動型モデルでは、このパケット送信処理を「バックオフ終了」イベント、「送信開始」イベント、「送信終了」イベントの三つのイベントの系列で再現している。ここで、図 1 のように、ノード A とノード B がノード C へパケットの送信を試みる例を考える。これらのノードは、ネットワーク層から送信すべきパケットを受け取ると、まずランダム時間後に「バックオフ終了」イベントをスケジューリングする。この例では、ノード A の方がバックオフ時間が長いため、ノード B の「バックオフ終了」イベントが先に実行され、それによってノード B のパケット送信が先に行われている。「バックオフ終了」イベントが実行されると、ノード B は自身のパケット送信を周辺ノードへ通知するために「送信開始」イベントと「送信終了」イベントをスケジューリングする。一方、ノード A は無線チャネルがアイドルになるまで待機するために、自身の「バックオフ終了」イベントを再スケジューリングする。

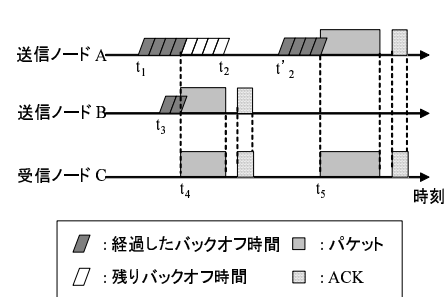


図 1 IEEE 802.11 DCF におけるパケット送信

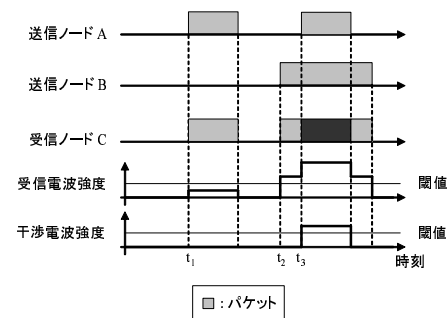


図 2 IEEE 802.11 DCF におけるパケット受信

同様に、「送信開始」イベントと「送信終了」イベントの二つのイベントの系列により、パ

ケット受信を再現している。図 2 は、ノード C がノード A とノード B からパケットを受信する様子を表している。まず、ノード A が周辺ノードへ「送信開始」イベントと「送信終了」イベントをスケジューリングする。これらのイベントによって、ノード C はノード A によるパケット送信を検知し、そのパケットを受信できるかどうかを受信電波強度に基づいて判定する。この例では、物理層のシミュレーションから得られた電波強度が十分強くなかったため、パケットの受信に失敗している。その後、ノード B がパケットを送信したが、ノード A がパケットを再送したことで干渉電波強度が増加したため、ノード C は再びパケットの受信に失敗している。離散事象駆動型モデルでは、ノード C が「送信開始」イベントを受け取ってから「送信終了」イベントを受け取るまでに、他の「送信開始」イベントを受け取っていないか確かめることで、複数のノードがパケットを同時に送信し、パケットの衝突が発生したことを検知できる。

このように、イベント駆動モデルでは IEEE 802.11 DCF の処理を離散事象シミュレーションによって正確に再現することができる。しかし、ひとつのパケット送受信を再現する際、多くのイベントが必要となるため、大規模ネットワークシミュレーションにおいては膨大な計算資源を必要とする。

4. 確率事象駆動型モデルによる IEEE 802.11 DCF

本章では、離散事象シミュレーションの枠組みにおいて、提案モデルがどのように動作するかについて述べる。提案モデルでは、各ノードは自身が保持する確率のみに基づき、バックオフの中断やパケットの衝突判定を行う。そのため、「送信開始」イベントと「送信終了」イベントをスケジューリングする際には、周辺ノード全てではなく、送信先ノードにのみスケジューリングする。このように、周辺ノードに対するイベントを削減することができるため、シミュレーションに要する計算量を大幅に削減することができる。以下、提案モデルに用いる確率の導出方法および使用方法について述べる。

4.1 確率事象駆動型モデルで使用する確率の導出

提案モデルでは IEEE 802.11 DCF の挙動を再現するために二つの確率を用いる。ひとつめの確率は、あるノードがパケット送信前に待機する時間を求めるために使用する確率 $S'_n(t')$ である。 $S'_n(t')$ はノード n とノード n の周辺ノードのうち、少なくとも一つのノードが空スロット t' にパケットを送信する確率を表す。もう一方の確率は、ノード n があるパケットを受信する際に、そのパケットが別のパケットと衝突する確率 L_n である。以下、これらの確率の導出過程について説明する。

ノード n について、タイムスロット t にネットワーク層から MAC 層にパケット送信が依頼される確率を $h_n(t)$ とおく。ここでは、トラヒックに周期性があると仮定し、一定時間トラヒックを計測することで $h_n(t)$ を求める。また、RTS/DATA の送信から ACK の受信またはパケットの衝突の検知までの期間をパケット送信期間とし、平均パケット送信期間を T_n で表す。ノード n とノード n の周辺ノードのうち、少なくとも一つのノードがタイ

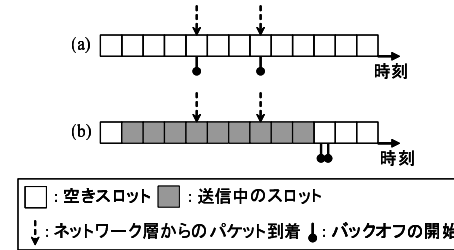


図 3 (a) バックオフをただちに開始できる例 (b) パケットの送信が終了するまでバックオフの開始を待機する例
ムスロット t にパケットを送信する確率を $S_n(t)$ とおく。ノード n がタイムスロット t にバックオフを開始する確率 $g_n(t)$ は、これらの確率を用いると以下のように表される。

$$g_n(t) = \left(\prod_{x=t-T_n+1}^t (1 - S_n(x)) \right) \cdot h_n(t) + S_n(t - T_n) \cdot \sum_{x=t-T_n}^{t-1} h_n(x) \quad (1)$$

最初の項は、ノード n がネットワーク層から送信すべきパケットを受け取るとただちにバックオフを開始する確率を表す(図 3 (a)). 一方、他のノードがパケットを送信している場合、そのパケット送信が終了するまで待機する必要がある。ノード n がタイムスロット t までバックオフの開始が延期される確率を二つ目の項が表している(図 3 (b)).

ここで、いかなるノードもパケットを送信しない空きタイムスロット(空スロット)のみを対象とした確率を考える。以下、このような確率はプライム記号を付加して表記する。タイムスロット t までにちょうど k パケット送信される確率 $C_n(t, k)$ と $g_n(t)$ を用いて、 $g'_n(t')$ を次のように表すことができる。

$$g'_n(t') = \sum_{k=0}^{\infty} C_n(t' + kT_n, k) \cdot g_n(t' + kT_n) \quad (2)$$

$$C_n(t, k) = C_n(t - 1, k - 1) \cdot S_n(t) + C_n(t - 1, k) \cdot (1 - S_n(t))$$

$$C_n(t, -1) = 0 \quad (3)$$

$$C_n(0, k) = \begin{cases} 1 - S_n(0) & (k = 0) \\ S_n(0) & (k = 1) \\ 0 & (k \geq 2) \end{cases} \quad (4)$$

タイムスロット t までに k パケットが送信された場合、 kT_n 時間分だけパケット送信が行われているため、タイムスロット t と空スロット $t - kT_n$ は同じ時間を表しており、 $g_n(t)$ と $g'_n(t - kT)$ は同じとみなせる。タイムスロット t までに k パケットが送信される確率は $C_n(t, k)$ であるため、 $t' \triangleq t - kT_n$ とおくことで式 (2) が得られる。 $C_n(t, k)$ は二つの項から成り、最初の項はタイムスロット $t - 1$ までに $k - 1$ パケットが送信され、タイムス

ロット t にもパケットが送信される確率を表す。二つ目の項はタイムスロット t までに k パケットが送信され、タイムスロット t にはパケットが送信されない確率を表す。

$g'_n(t')$ を用いることで、ノード n が空スロット t' にパケットを送信する確率 $f'_n(t')$ は、以下のように求めることができる。

$$f'_n(t') = \sum_{x=0}^{t'} g'_n(x) \cdot B(t' - x, pc_n) \quad (5)$$

$$B(x, pc_n) = \sum_{i=0}^r pc_n^i \cdot B_i(x) \quad (6)$$

$$B_i(x) = \begin{cases} \frac{1}{2^i \cdot CW_0} \sum_{y=x-2^i \cdot CW_0}^{x-1} B_{i-1}(y) & (i < m) \\ \frac{1}{2^m \cdot CW_0} \sum_{y=x-2^m \cdot CW_0}^{x-1} B_{i-1}(y) & (i \geq m) \end{cases} \quad (7)$$

$$B_0(x) = \begin{cases} 1/CW_0 & (0 < x \leq CW_0) \\ 0 & (other) \end{cases} \quad (8)$$

$B(x, pc_n)$ は、ノード n のパケット衝突率が pc_n である時、 n が x 空スロット後にパケットを送信する確率を表している。ノード n が空スロット t' にパケットを送信する場合、そのノードはある空スロット x にバックオフを開始し、バックオフとして $t' - x$ スロット待機した後にパケットを送信することを意味している。 $B(x, pc_n)$ は、 i 回目の再送時のバックオフを x 空スロット後に終了する確率 $B_i(x)$ の和である。 $B_i(x)$ は $i-1$ 回目の再送時のバックオフがある空スロット y に終了する確率と、 i 回目の再送時のバックオフとして $x-y$ 空スロット待機した後にパケットを送信する確率の二つから成っている。これらの確率はそれぞれ $B_{i-1}(y)$, $1/(2^i \cdot CW_0)$ と表される。ただし、 CW_0 はコンテンションウィンドウの初期サイズである。パケットの送信に失敗した場合、最大 r 回まではパケットの再送を試み、それと同時にコンテンションウィンドウのサイズを倍にする。従って、 i 回目の再送時にはコンテンションウィンドウのサイズは $2^i \cdot CW_0$ 、コンテンションウィンドウの最大サイズは $2^r \cdot CW_0$ となる。

ここで、 $f'_n(t')$ を用いることで、以下の三つの確率を導出できる。

$$K'_n(t') = \sum_{i \in N_n} f'_i(t) \prod_{i \neq j, j \in N_n} (1 - f'_j(t)) \quad (9)$$

$$J'_n(t') = 1 - \prod_{n \in N_n} (1 - f'_n(t')) - \sum_{i \in N_n} f'_i(t) \prod_{i \neq j, j \in N_n} (1 - f'_j(t)) \quad (10)$$

$$S'_n(t') = 1 - \prod_{n \in N_n} (1 - f'_n(t')) \quad (11)$$

N_n はノード n の隣接ノード集合を表す。 $S'_n(t')$ は空スロット t' に少なくとも一つノードがパケットを送信する確率を表し、 $K'_n(t')$ は一つのノードのみが空スロット t' にパケットを送信する確率を表す。 $J'_n(t')$ は空スロット t' に複数のノードがパケットを送信する確率である。

空スロット t' までにちょうど k パケットが送信される確率 $C'_n(t', k)$ と $S'_n(t')$ を用いて $S_n(t)$ は以下のように表すことができる。

$$S_n(t) = \sum_{k=0}^{\infty} C'_n(t - kT_n, k) \cdot S'_n(t - kT_n) \quad (12)$$

$C'_n(t', k)$ は $C_n(t, k)$ と同様の方法で $S'_n(t')$ から得られる。空スロット t' までに k パケットが送信されたとき、空スロット t' はタイムスロット $t' + kT_n$ と同じである。従って、 $S'_n(t')$ と $S'_n(t' + kT_n)$ は同じものを示している。さらに、 $t \triangleq t' + kT_n$ とおくことで式 (12) が得られる。

ノード n の送信するパケットの平均サイズを x_n とすると、送信に成功した場合におけるパケット送信期間 st_n 、および送信に失敗した場合のパケット送信期間 ct_n は、以下のよう表すことができる。

RTS/CTS を用いる場合

$$st_n = RTS + SIFS + CTS + SIFS + x_n + SIFS + ACK \quad (13)$$

$$ct_n = RTS + EIFS \quad (14)$$

RTS/CTS を用いない場合

$$st_n = x_n + SIFS + ACK \quad (15)$$

$$ct_n = x_n + EIFS \quad (16)$$

ここで、各ノードの送信するパケットの平均サイズ x_n は一定時間トラヒックを計測することで得るものとする。このとき、 st_n と ct_n から T_n を以下のように求めることができる。

$$T'_n(t') = \frac{\sum_{i \in N_n} (K'_i(t') \cdot st_i + J'_i(t') \cdot ct_i) \cdot f'_i(t')}{(K'_n(t') + J'_n(t')) \sum_{i \in N_n} f'_i(t')} \quad (17)$$

$$T_n = \frac{\sum_{t'=0}^{\infty} S'_n(t') \cdot T'_n(t')}{\sum_{t'=0}^{\infty} S'_n(t')} \quad (18)$$

$T'_n(t')$ は空スロット t' における平均パケット送信期間を表し、 T_n は各タイムスロットにおいてパケットの送信が行われる確率で重み付けした $T'_n(t')$ の平均である。

さらに、パケットの受信成否判定に用いる、送信パケット数と衝突パケット数の割合 L_n を求める。

$$\begin{aligned}
 L'_n(t') &= \frac{\sum_{k=2}^{\infty} k \cdot p(t', k)}{\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p(t', k)} \\
 &= \frac{\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p(t', k) - 1 \cdot p(t', 1)}{\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p(t', k)} \\
 &= \frac{\sum_{i \in N_n} f'_i(t') - \sum_{i \in N_n} f'_i(t') \prod_{j \neq i, j \in N_n} (1 - f'_j(t'))}{\sum_{i \in N_n} f'_i(t')} \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$L_n = \frac{\sum_{t'=0}^{\infty} S'_n(t') \cdot L'_n(t')}{\sum_{t'=0}^{\infty} S'_n(t')} \quad (20)$$

$L'_n(t')$ はタイムスロット t' における送信パケット数と衝突パケット数の割合である。 $p(t', k)$ はタイムスロット t' にちょうど k ノードが送信する確率を表している。式 (19) の分母と分子はそれぞれタイムスロット t' における送信パケット数の期待値と衝突パケット数の期待値である。各ノードのパケット送信は独立に行われるため、送信パケット数の期待値は送信確率の和とみなせる。そして、 $p(t', 1)$ は 1 ノードのみがタイムスロット t' にパケットを送信する確率である。 L_n は各タイムスロットにおいてパケットの送信が行われる確率で重み付けした $L'_n(t')$ の平均である。

L_n を用いて、パケットを送信に失敗する確率 pc_n を求めることができる。 n_n はノード n の周辺ノード数を表すものとする。

$$pc_n = \frac{\sum_{i \neq n, i \in N_n} L_i}{n_n - 1} \quad (21)$$

式 (1) で用いている $S_n(t)$ を求めるためには、隣接ノードの確率を参照する必要がある。そのため、確率を計算する際には全てのノードの確率を同時に計算する。確率を計算する際には初期値として $S_n(t) = 0$ を与え、 L_n が収束するまで繰り返し計算を行う。これにより、全ノードの $C'_n(t', k)(t)$ と L_n を得ることができる。

4.2 確率事象駆動型モデルにおけるパケット送信

提案方式においてパケットを送信する際には、離散事象駆動型モデルと同じく、現在のコンテンツウィンドウのサイズに基づき、バックオフとして待機する時間 t_b を決定する。ノード n の周辺において、空スロット t' までに送信されるパケット数の期待値 $M'(t')$ を用いて、最終的な送信待機時間 $T_{b,n}(t', t_b)$ は次のように表される。

$$T_{b,n}(t', t_b) = t_b + T_n \cdot (M'_n(t' + t_b) - M'_n(t')) \quad (22)$$

$$M'_n(t') = \sum_{x=0}^{t'} S'_n(x) \quad (23)$$

$M(t')$ は空スロット t' までに送信されるパケット数の期待値であるため、 $M'(t' + t_b) - M'(t')$ はバックオフが終了するまでに送信されるパケット数の期待値となる。つまり、空スロット t' から t_b 空スロットが経過するまでに送信されるパケットの数を表している。提案モデルでは、最終的な送信待機時間 $T_{b,n}(t', t_b)$ が経過した後、送信先ノードにのみ「送信開始」イベントと「送信終了」イベントをスケジューリングする。

4.3 確率事象駆動型モデルにおけるパケット受信

提案モデルでは、パケットの受信成否判定は、電波強度ではなく、式 (20) で求めた確率に基づいて行う。従って、パケットの送信先ノードで「送信開始」イベントを実行する際には、ランダムな値を生成し、その値がこの確率以下であればパケットの受信に失敗したとみなし、パケットの受信処理を終了する。

5. 提案モデルと離散事象駆動型モデルの併用

本章では、提案モデルと離散事象駆動型モデルを協調させ動作させる方法について述べる。提案モデルにより、シミュレーションを高速に実行することができるが、パケットの送信タイミングや受信可否を確率に基づいて決定しているため、従来のモデルと異なる結果を導出する場合が考えられる。そこで、詳細な挙動を必要とする領域には従来の離散事象駆動型モデルを、そうでない領域には提案モデルを使用することにより、シミュレーションの精度を保ちつつ、シミュレーションの実行効率の向上を図る。

まず、離散事象駆動型モデルのノードが提案モデルのノードに与える影響を反映するために、離散事象駆動型モデルのノードにおいても、提案モデルで使用する確率を計算しておく。具体的には、提案モデルのノードと同様に、離散事象駆動型モデルのノードについても 4 章で示した確率を計算し、その結果を周辺の提案モデルのノードの確率計算に使用する。

次に、離散事象駆動型モデルにおけるバックオフ処理について述べる。離散事象駆動型モデルのノードでは、周辺のノードから送られてくる「送信開始」イベントに基き、バックオフの中断時刻を決定する。しかし、提案モデルのノードは、このイベントをパケットの送信先ノードにのみスケジューリングする。提案モデルを使用するノードの一つが空スロット t' にパケットを送信する確率 $s'_n(t')$ を用いて、提案モデルのノードがパケットを送信する時刻を予測する。 $s'_n(t')$ は、離散事象駆動型モデルのノードを除外し、式 (11) を計算することで求められる。また、提案モデルのノードがパケットを送信しないスロット数の期待値は $s'_n(t')$ を用いて以下のように表される。

$$E'(t') = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot \left(s'_n(t' + k) \prod_{x=0}^{k-1} (1 - s'_n(t' + x)) \right) \quad (24)$$

離散事象駆動型モデルのノードは、この式から求めた値に基づきタイマーを設定する。また、周囲の離散事象駆動型モデルのノードがパケットを送信したときには、バックオフと同

様にこのタイマーも中断する。タイマーに設定された時間経過した後、式 (18) で求めた平均パケット送信期間分だけ待機することで、周辺の提案モデルのノードのパケット送信によるバックオフの中断を再現する。

最後に、離散事象駆動型モデルにおいて、パケット受信成否を判定する方法について説明する。送信元ノードが使用するモデルに応じて、二通りの処理が考えられる。送信元ノードが提案モデルである場合、受信ノードは、提案モデルと同様に確率に基づいて受信成否判定を行う。一方、送信元ノードが離散事象駆動型モデルである場合、受信ノードは電波強度と確率の両方に基づいて受信成否判定を行う。まず、電波強度に基づいて受信成否判定を行う。その後、その離散事象駆動型モデルのノードのみがパケットを送信する場合における、送信パケット数の期待値と衝突パケット数の期待値の割合 $L_n^{P(\cdot|e)}(t')$ を用いて受信成否判定を行う。この $L_n^{P(\cdot|e)}$ は、以下のように $L_n^{P(\cdot|e)}(t')$ から求めることができる。

$$\begin{aligned} L_n^{P(\cdot|e)}(t') &= \frac{\sum_{k=2}^{\infty} k \cdot p(t', k|e)}{\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p(t', k|e)} \\ &= \frac{\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p(t', k|e) - 1 \cdot p(t', 1|e)}{\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p(t', k|e)} \\ &= \frac{\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p_e \cdot p'(t', k-1) - p_e \cdot p'(t', 0)}{\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p_e \cdot p'(t', k-1)} \end{aligned} \quad (25)$$

e は離散事象駆動型モデルのノードがのみがパケットを送信する状況、 p_e はその状況が発生する確率を表す。 $p(t', k|e)$ はちょうど k ノードが空スロット t' にパケットを送信する確率である。ノードのパケット送信は独立に発生するため、 $p(t', k|e)$ は $p_e \cdot p'(t', k-1)$ とみなせる。 $p'(t', k)$ は空スロット t' に提案モデルのノードがちょうど k ノードパケットを送信する確率である。式 (25) 中の和 $p'(t', 0)$ は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p_e \cdot p'(t', k-1) &= p_e \sum_{k'=0}^{\infty} (k'+1) \cdot p'(t', k') \\ &= p_e \left(\sum_{k'=0}^{\infty} k' \cdot p'(t', k') + \sum_{k'=0}^{\infty} p'(t', k') \right) \\ &= p_e \left(\sum_{i \in N'_n} f'_i(t') + 1 \right) \end{aligned} \quad (26)$$

$$p'(t', 0) = \prod_{i \in N'_n} (1 - f'_i(t')) \quad (27)$$

N'_n は提案モデルを使用する周辺ノード数である。式 (26) と式 (27) から $L_n^{P(\cdot|e)}(t')$ は次

のように表せる。

$$\begin{aligned} L_n^{P(\cdot|e)}(t') &= \frac{\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p_e \cdot p'(t', k-1) - p_e \cdot p'(t', 0)}{\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p_e \cdot p'(t', k-1)} \\ &= \frac{p_e \left(\sum_{i \in N'_n} f'_i(t') + 1 \right) - p_e \cdot \prod_{i \in N'_n} (1 - f'_i(t'))}{p_e \left(\sum_{i \in N'_n} f'_i(t') + 1 \right)} \\ &= \frac{\sum_{i \in N'_n} f'_i(t') + 1 - \prod_{i \in N'_n} (1 - f'_i(t'))}{\sum_{i \in N'_n} f'_i(t') + 1} \end{aligned} \quad (28)$$

6. 評価実験

提案手法によりシミュレーションを効率的に実行できることを示すために、提案手法をネットワークシミュレータ Scenargie¹¹⁾ 上に実装し、評価実験を行った。

6.1 提案モデルと離散事象駆動型モデルの比較

提案モデルでは、IEEE 802.11 DCF に関わる処理のうち、パケットの受信成否判定とバックオフ処理に確率を用いる。シミュレーションモデルの精度を評価するため、MAC 層におけるパケットロス率とパケットを送信するまでに待機した時間を比較した。また、提案モデルによるイベント数の削減効果を示すため、「送信開始」イベントの数を計測した。評価実験では、互いを無線通信範囲に含むようにノードを配置し、生成するパケットのサイズはすべて 512 バイトとした。

まず、周辺ノード数がイベント数削減量、シミュレーション精度に及ぼす影響を調査した。一回のパケット送信に対する評価を行うため、ソースノードは一つとし、0.5 秒おきにシンクノードへパケットを送信した。周辺ノード数を 10 ノードから 50 ノードまで変化させ、「送信開始」イベントの数、MAC 層におけるパケットロス率、パケットを送信するまでに待機した時間を計測した。図 4 は、ソースノードの周辺に 10 ノードを配置した場合の「送信開始」イベント数を基準としたイベント数の比を示している。離散事象駆動型モデルの場合、周辺ノード数の増加に伴い、イベント数も線形に増加していることがわかる。一方、提案モデルでは送信先ノード以外に「送信開始」イベントをスケジューリングしないため、ノード数によらずイベント数は一定であることがわかる。また、この評価実験では一つのノードのみがパケットを送信しているため、パケットの衝突やバックオフの中断が起らず、パケットロス率およびパケットを送信するまでに待機した時間について、モデル間の誤差は非常に小さいものであった。これらの結果から、提案モデルにおける「送信開始」イベント数は周辺のノード数の影響を受けないことが確認できた。

次に、通信量とノード数がイベント削減効果、精度に及ぼす影響を調査した。この評価実

験では、すべてのノードが 0.5 秒おきにパケットをシンクノードへ送信する。ノード数を 10 から 50 ノードまで変化させ、「送信開始」イベントの数、MAC 層におけるパケットロス率、パケットを送信するまでに待機した時間を計測した。図 5 は、10 ノードを配置した際の「送信開始」イベント数を基準としたイベント数の比を表している。この結果から、提案モデルを利用することにより、多くのノードがパケットを送信する場合に、イベント数をより多く削減できていることがわかる。図 6 は MAC 層におけるパケットロス率を示している。電波強度のゆらぎなどの影響により、ノード数が増加するにつれて離散事象駆動型モデルと提案モデルとの誤差は増加しているが、50 ノードの場合においてもその誤差は非常に小さい。図 7 はパケットを送信するまでに待機した時間を示しているが、この場合にも、離散事象駆動型モデルに近い結果が得られている。しかしながら、多数のノード数が存在する場合では若干の誤差が生じていることがわかる。

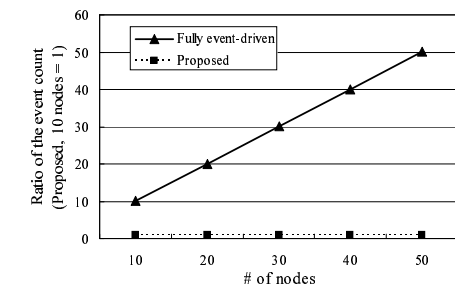


図 4 ノード数のみを変化させた場合の「送信開始」イベント数の比

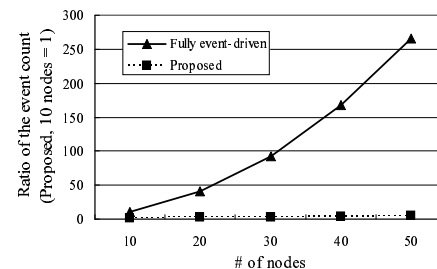


図 5 ノード数とパケット量を変化させた場合の「送信開始」イベント数の比

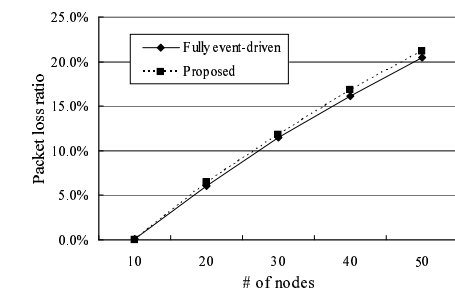


図 6 ノード数、トラヒック量変化時における MAC 層のパケットロス率

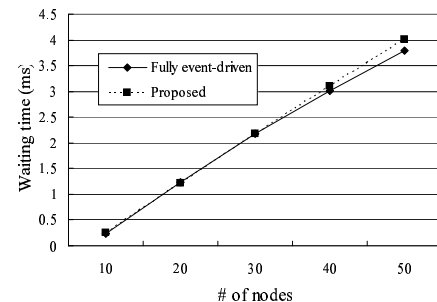


図 7 ノード数、トラヒック量変化時におけるパケット送信までに要する待機時間

6.2 提案モデルと離散事象駆動型モデルの併用

次に、ノード毎に異なるシミュレーションモデルを使用することで、計算コストを削減しつつ、シミュレーション精度を維持できることを示す。この評価実験では、パケットの衝突が起こりにくい (i) 低トラヒックシナリオと、パケットの衝突が起こりやすい (ii) 高トラヒックシナリオの二種類のシミュレーションシナリオで実験を行った。まず、(i) 低トラヒックシナリオにおいて、パケットロス率と「送信開始」イベント数を計測した。このシナリオでは、ソースノードを一つ、中継ノードを五つ、シンクノードを一つ用意し、図 8 (i) のように配置した。ソースノードは 0.1 秒おきに中継ノードを経由してシンクノードへパケットを送信する。各ノードは隣接ノードのみを自身の無線通信範囲に含み、パケットサイズはすべて 512 バイトとした。各ノードへのシミュレーションモデル割り当てとして、(a) 離散事象駆動型モデルのみ、(b) 提案モデルのみ、(c) ノード 2 からノード 6 に離散事象駆動型モデル、それ以外のノードには提案モデルの三通りの割り当てで実験を行った。(a) および (c) のパケットロス率は最大 0.1 % であった。このパケットロスは物理層の影響によって生じたものと考えられる。一方、提案モデルでは物理層の影響は考慮していないため、(b) ではパケットロスは生じていない。各割り当てにおける「送信開始」イベント数を表 1 に示す。(a) と比較して、(b) は約 16 %、(c) の場合でも、約 37 % に削減できていることがわかる。

表 1 (i) 低トラヒックシナリオにおける「送信開始」イベント数の比 (提案モデルのみ = 1.000) 表 2 (ii) 高トラヒックシナリオにおける「送信開始」イベント数の比 (提案モデルのみ = 1.000)

モデル	計算時間の比
(a) 離散事象駆動型モデルのみ	6.003
(b) 提案モデルのみ	1.000
(c) 二つのモデルを併用	2.250

モデル	計算時間の比
(a) 離散事象駆動型モデルのみ	10.00
(b) 提案モデルのみ	1.000
(c) 二つのモデルを併用	5.571

次に、パケットの衝突が頻繁に発生する (ii) 高トラヒックシナリオにおいて、パケットロス率と「送信開始」イベント数を計測した。このシナリオでは、図 8 (b) のようにノードを配置した。同時に二つのソースノードがパケットを送信するため、ノード 4 の周辺ではパケットの衝突が多く発生する。例えば、ノード 6 がノード 5 へ送信するパケットを考えると、このパケットはノード 5 が送信するパケットだけではなく、ノード 4、ノード 8、ノード 9 が送信するパケットとも衝突する可能性がある。(i) 低トラヒックシナリオの場合と同様に、各ノードへのシミュレーションモデルの割り当てとして、(a) 離散事象駆動型モデルのみ、(b) 提案モデルのみ、(c) ノード 4、5、6、8、9 に離散事象駆動型モデル、それ以外のノードには提案モデルの三通りの割り当てを行った。図 9 はノード毎のパケットロス率を表している。この結果から、いくつかのノードではシミュレーションモデルの割り当てにより、パケットロス率が大きく異なっていることがわかる。(a) では、ノード 5 およびノード 8 に送信されたパケットのほぼ全てが衝突していることがわかる。一方、(b) において、これらのノードのパケットロス率は非常に低い。提案モデルでは一定時間計測したトラ

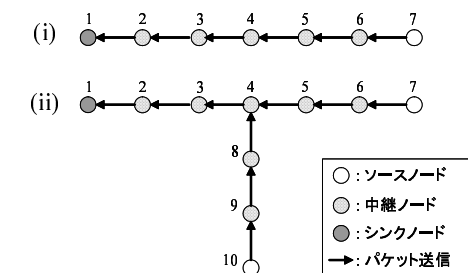


図 8 (i) 低トラフィックシナリオおよび (ii) 高トラフィックシナリオにおけるノード配置

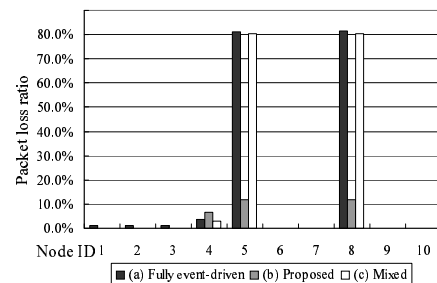


図 9 (ii) 高トラフィックシナリオにおけるパケットロス率

ヒックを基に確率の計算を行っているため、トラフィックが頻繁にかつ急激に変化する場合、提案モデルのみで精度を維持することは困難である。しかし、(c)の結果から、提案モデルのみでは精度を維持できない場合であっても、そのようなノードには離散事象駆動型モデルを割り当てることによって高い再現精度が得られることがわかる。また、表 2 は (b) を基準とした「送信開始」イベント数の比を示す。(a)と比較して、(b)の割り当てでは「送信開始」イベント数を約 10 % に抑えられているものの、シミュレーションの精度は低い。一方、(c)では「送信開始」イベント数を約 50 % に抑えつつ、精度を維持できている。これらの結果から、提案モデルだけでは精度が維持できない場合であっても、離散事象駆動型モデルと併用することで精度を維持しつつ、計算コストを削減できることがわかる。

7. まとめと今後の課題

本稿では、MAC 層における様々な手続きを確率に基づき決定する確率事象駆動型モデルを提案した。提案モデルは従来の離散事象駆動型モデルを組み合わせることが可能で、評価対象のノードには詳細なモデルを、その他のノードには提案モデルを適応することで、シミュレーション精度を保ちつつ、シミュレーション実行時間を削減することができる。また、提案手法をネットワークシミュレータ上に実装し、提案手法の評価を行った。ノード数 50 のネットワークに対し、提案手法を適応した際には、パケット配送に関わるイベント数を 1/50 に削減し、また、パケットロス率の差を 1 %, バックオフ時間の差を 0.6 ms 程度に抑えることができた。また、提案手法と離散事象駆動型モデルを組み合わせることにより、イベント数を 1/10 としつつ、従来のモデルと同等のシミュレーション精度を実現できることを示した。

今後は、確率事象駆動型モデルに必要な確率計算の効率化や、並列分散計算による大規模ネットワークシミュレーションの実現について検討を行う。

参考文献

- 1) Cole, R.G., Riley, G., Cansever, D. and Yurcik, W.: Stochastic Process Models for Packet/Analytic-Based Network Simulations, *Proceedings of the 22nd Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation (PADS 2008)*, pp.72–79 (2008).
- 2) Egea-Lopez, E., Vales-Alonso, J., Martinez-Sala, A., Pavon-Marino, P. and Garcia-Haro, J.: Simulation scalability issues in wireless sensor networks, *IEEE Communications Magazine*, Vol.44, No.7, pp.64–73 (2006).
- 3) Gopalakrishnan, P., Demers, S. and Kant, L.: Speedup techniques for analyzing scalability of large scale mobile ad hoc network management systems, *Proceedings of International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2006)*, pp.299–304 (2006).
- 4) Kiddle, C., Simmonds, R., Williamson, C. and Unger, B.: Hybrid Packet/Fluid Flow Network Simulation, *Proceedings of the 17th Workshop on Parallel and Distributed Simulation (PADS 2003)*, pp.143–152 (2003).
- 5) Killat, M., Schmidt-Eisenlohr, F., Hartenstein, H., Rössel, C., Vortisch, P., Assenmacher, S. and Busch, F.: Enabling efficient and accurate large-scale simulations of VANETs for vehicular traffic management, *Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2007)*, pp.29–38 (2007).
- 6) Kim, H. and Hou, J.C.: A fast simulation framework for IEEE 802.11-operated wireless LANs, *Proceedings of Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems (SIGMETRICS 2004)*, pp.143–154 (2004).
- 7) Kim, H. and Hou, J.C.: Mixed-mode simulation for IEEE 802.11-operated WLANs, *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, Vol.51, No.6, pp.1379–1402 (2007).
- 8) Liu, J., Nicol, D.M., Perrone, L.F. and Liljenstam, M.: Wireless: towards high performance modeling of the 802.11 Wireless protocol, *Proceedings of the 33rd Conference on Winter simulation (WSC 2001)*, pp.1315–1320 (2001).
- 9) Melamed, B., Pan, S. and Wardi, Y.: Hybrid discrete-continuous fluid-flow simulation, *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE 2001)*, Vol.4526, pp.263–270 (2001).
- 10) Riley, G.F., Jaafar, T.M. and Fujimoto, R.M.: Integrated Fluid and Packet Network Simulations, *Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS 2002)*, pp.511–518 (2002).
- 11) Space-Time Engineering, LLC: Scenargie, <http://www.spacetime-eng.com/>.