

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 2 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420379

研究課題名(和文) 感染症数理モデルを用いた無線LANマルチホップ放送型情報配送方式の最適設計

研究課題名(英文) Design of Multi-Hop Broadcast Networks with Wireless LANs Using Epidemic-Based Mathematical Model

研究代表者

榭原 勝己 (Sakakibara, Katsumi)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：10235137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ネットワーク上の全ての端末に同じ情報を送信する放送型情報配送方式では、一般に、パケットを受信した全ての端末が通信可能な範囲へ中継転送を行う"フラッディング"と呼ばれる手法が用いられている。本研究課題では、無線LANを用いたマルチホップ・ネットワーク内において、情報が配送された端末割合(情報到達率)を、時間の関数として表現することを目的とする。情報到達率とホップ数の関係、ホップ数と経過時間の関係を、感染症数理モデルに基づいたモデルを構築し、ネットワークシミュレータQualNetによる評価の結果、端末密度と転送確率の積が2以上であれば、不安定ながら一定の精度を得ることを示した。

研究成果の概要(英文)：In broadcast multi-hop networks, flooding is generally employed in order to disseminate identical information over the entire nodes. In this research, we aim to construct a mathematical model for flooding based on epidemic model, and evaluate the delivery ratio as a function of time. CSMA/CA is assumed as a MAC payer protocol. Numerical results obtained from the network simulator QualNet show that the accuracy can be achieved to certain content, when the product of the node density and the forwarding probability is greater than 2.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：無線LAN マルチホップ通信 ブロードキャスト通信 感染症数理モデル 情報到達率

1. 研究開始当初の背景

無線 LAN, ZigBee 等に代表される無線端末の小型化および家電製品への組込技術の進展に伴い, これらの無線端末間で自律分散的にマルチホップ・ネットワークを構築することは, 「いつでも, どこでも, 誰とでも, 何とでも」情報の交換を可能とする基盤技術となる. この場合, 特定の端末間で情報交換を行う通信プロトコルに加え, 1) ネットワーク内の全端末または局在する複数の端末に対して同一の情報を提供するため, あるいは, 2) 端末間における経路設定 (ルーティング) 情報等の制御情報をネットワーク内の端末に通知するための放送型情報配送方式 (ブロードキャスト通信方式) は, 要素技術の一つとなる. この場合, MAC 層では, 無線 LAN, ZigBee 等と同様に CSMA/CA を想定することはもっともなことである.

放送型情報配送方式では, ネットワーク内で情報を配送された端末割合 (情報到達率) の時間変動は, 最も重要な評価尺度である. MAC 層プロトコルを排除し, 端末の接続性にのみ着目した情報到達率に関する理論解析としては, 端末の接続性を議論するパーコレーション理論と, 感染症の伝播をモデル化した感染症数理モデルによる従来研究が知られている. パーコレーション理論を適用したものであるが報告されている

(Mannersalo ほか 2007). ここでは, 情報を確実に配送するためには, 平均隣接端末数を 4.6 以上とする必要性が述べられているが, パーコレーション理論では情報到達率に関する時間的な評価をすることが困難である. また, コンピュータ・ウィルスの拡散解析に対しては, 感染症数理モデルを適用したが知られている (De ほか 2009). しかしながら, ウィルスは, 端末間の回線設定の後に拡散するため, 即時的に情報を転送する放送型情報配送方式とは異なり, 既存の感染症数理モデルによって十分な精度で解析することが可能である. 一方, MAC 層プロトコルを考慮した, 本研究に最も関連ある従来研究として,

H.Shah-Mansouri, M.R.Pakravan and B.H.Khalaj, "Analytical modeling and performance analysis of flooding in CSMA-based wireless networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.60, no.2, pp.664-679, February 2011.

を挙げることができる. ここでは, CSMA による影響を近似的に考慮した上で, 情報到達率に関する上界値を求めているが, 感染症数理モデルあるいはパーコレーション理論との関係には言及されておらず, また, シミュレーション結果との比較では, 十分な精度を得ることができていない.

なお, 研究代表者らは, ここ数年, 無線通信システムにおいて自己の利得向上のために通信プロトコル, 特に MAC 層プロトコルを改変する利己的ユーザの出現が, システム全体に与える影響を, 「ゲーム理論」におけ

る各プレイヤー (端末) の合理性を担保するためには, 例えば, 無線回線を競合する端末数等いくつかの情報を全端末が共有することが前提であり, このような情報共有を実現するためには, 効率的なマルチホップ放送型情報配送方式が必要であり, この認識が本研究課題の着想へと繋がっている.

2. 研究の目的

無線アドホック・ネットワーク等のマルチホップ・ネットワークにおける経路設定等では, 放送型情報配送方式 (ブロードキャスト通信方式) が採用されている. 本研究課題では, 無線 LAN を用いたマルチホップ・ネットワーク内において, 情報が配送された端末割合 (情報到達率) を, 時間の関数として表現し, 所望の時間で所望の情報到達率を達成するための設計手法を開発することを目的とする. 特に, 感染症数理モデルを用い, 各端末の情報転送確率, 無線 LAN で広く使用されている CSMA/CA におけるウィンドウ・サイズ等の各種設計パラメータに対する最適値を算出するためのアルゴリズムを開発し, 計算機シミュレーションおよび無線センサーネットワーク評価キットにより, その精度を検証・評価する.

3. 研究の方法

(1) 感染症数理モデルを用いた確率的フラッディングのモデル化

感染症モデルの 1 つである SIR モデルでは, 人口は未感染 (状態 S), 感染中 (状態 I), 免疫保持 (状態 R) に分類される. 時刻 t における各状態の人数を $S(t)$, $I(t)$, $R(t)$ とすれば, これらに関する微分方程式を解くことによって, 各々の時間推移を知ることができる. ブロードキャスト通信における端末状態を, 未受信 (状態 S), 中継中 (状態 I), 受信済 (状態 R) に分類すれば, SIR モデルと対応付けることができる. ネットワーク内の端末密度を σ , 転送確率を p , 第 t ホップで中継端末の存在する伝播面積を $A(t)$ とする. このとき, 端末の状態遷移は図 1 のようになり, 差分方程式

$$S(t+1) = S(t) - \sigma A(t)$$

$$I(t+1) = p \sigma A(t)$$

$$R(t+1) = R(t) + (1-p) I(t)$$

が成り立つ. 全端末数を N とし, 初期状態を $S(0)=N-1$, $I(0)=1$, $R(0)=0$ とする. 1 辺の正方形をネットワーク範囲とし各端末の送信距離を 1 とする. 情報発信端末を範囲の中央に配置し, 残りの $N-1$ 個の端末をランダムに配置する. パケットが環状に伝搬すると仮定し, 状態 I 端末が存在する環と正方形の重なりとして伝播面積 $A(t)$ を求める. この際には, 環状での伝搬を想定し, 端末密度 および転送確率 により定義される関数を用いた基準距離の概念を導入する.

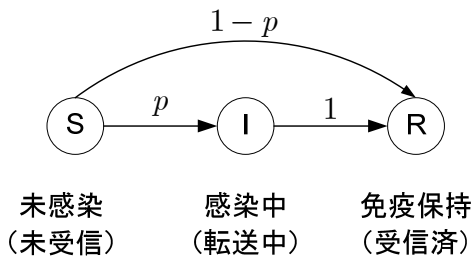


図 1. SIR モデルに基づく端末状態遷移

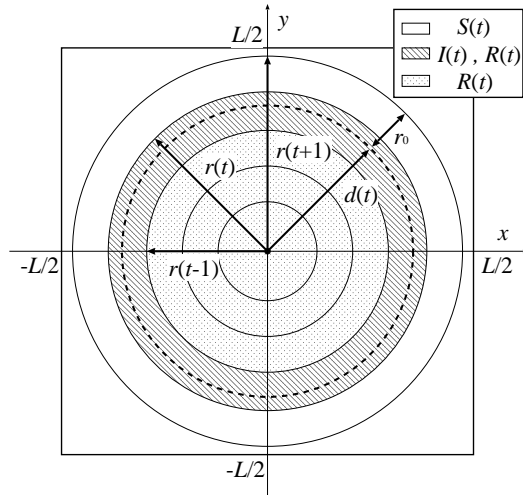


図 2. 環状のメッセージ伝播

(2) ランダムバックオフ遅延を考慮したモデルへの拡張

前述のモデルを、無線 LAN で利用されているバックオフ・アルゴリズムに基づいたランダムバックオフ遅延を考慮したものへ修正する。

パケットを転送する場合は、先に競合ウィンドウ (CW) によるランダムなバックオフ遅延を挿入する。各端末は、あるパケットを受信後、他の端末から同じパケットを受信しても転送は行わない。ある端末が同時に複数のパケットを受信した場合、パケット衝突により、正しく復号できないが、パケットの再送は行われぬものとする。さらに、通信路誤りは考慮せず、他のパケットと衝突しなかったパケットは、常に正しく復号されるものとする。

(3) CSMA/CA を考慮した評価

これまで、パケット長と時間スロット長が等しいスロット付きアロハに準拠したモデルで考えてきた。無線 LAN で利用されている CSMA/CA では、時間スロット長はパケット長と比べて非常に短い。パケット送信を検出した端末は、自身のバックオフタイマーを一時的に停止するが、パケット送信を検出していない端末は、バックオフタイマーのカウントダウンを継続する。このため、ネットワークエリア内の端末は、必ずしも同時にバックオフタイマーのカウントダウンを行う訳ではない。

この現象を数理モデルに取り込みことは非常に困難なため、ここでは、ネットワークシミュレーション QualNet を用いて評価を行った。

4. 研究成果

(1) 感染症数理モデルを用いた確率的フラグディングのモデル化

ネットワーク内の端末数 $N = 40,000$ に対するメッセージ到達率を、計算機シミュレーションにより評価する。送信半径を 1 とする。転送確率 $p = 1.0$ の結果を図 3 に示す。基準距離として、A) 環状モデルの最大値を適用した結果を一点鎖線 (model Eq. (5)), B) 平均値を適用した結果を破線 (model Eq. (6)), C) 指数関数による結果を実線 (model Eq. (7)) で表す。他の値に対する結果も含め、端末密度と転送確率の積が約 2 以上のとき、シミュレーション結果と高い精度で一致することを示すことが明らかとなった。

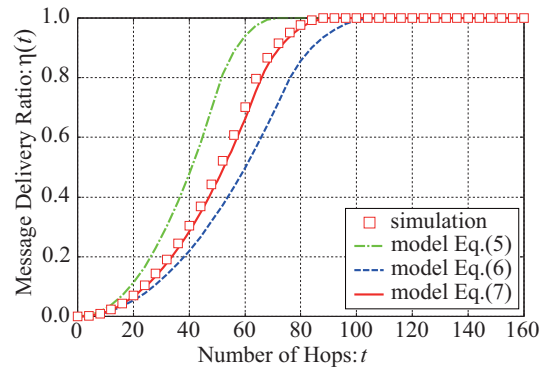


図 3. 情報到達率

(2) ランダムバックオフ遅延を考慮したモデルへの拡張

端末数 $N=1,800$ (端末密度 $\sigma=2.0$), 転送確率 $p=1.0$ とした場合に対する情報の到達率 (状態 I および R 端末の割合) を図 4 に示す。従来のモデルでは、十分な精度を得ることができないが、補正をかけたモデルでは、計算機シミュレーションによる結果と翌一致していることは明らかである。

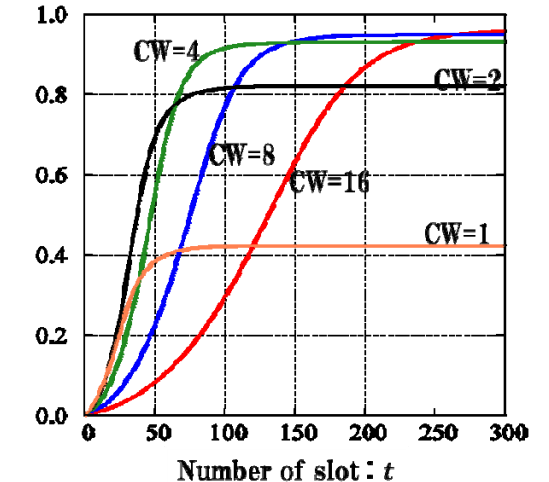
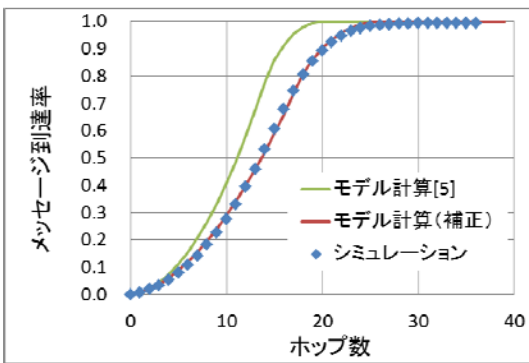


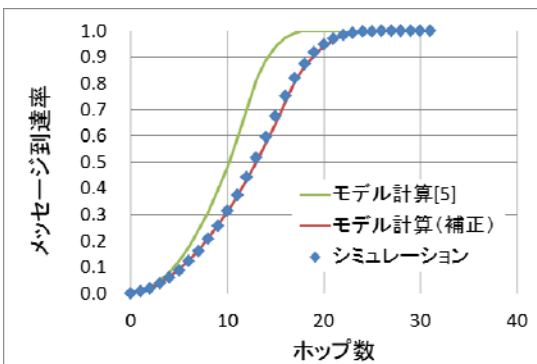
図 4. 情報到達率

(3) CSMA/CA を考慮した評価

端末数 $N=1,000$ (端末密度 $\sigma=2.5$) および端末数 $N=2,000$ (端末密度 $\sigma=5.0$) とした場合に対する情報の到達率 (状態 I および R 端末の割合) を図 5 に示す. 数理モデルから計算される結果に補正を加えることにより, シミュレーション結果と一致するように調整することが可能となる. しかしながら, この補正は試行錯誤的な手法であり, 必ずしも汎用的なものではない. また, ここでの情報到達率は, ホップ数の関数として与えられる. このため, 当初目的の時間関数として表現するためには, ホップ数と経過時間 (メッセージ到達時間) の関係を検証する必要がある. 図 6 に, この関係を示す. 経過時間は, 端末の処理時間および無線アクセス方式によるバックオフ時間の影響を大きく受ける. さらに, 同時にメッセージを受信した端末のうち, 処理時間とバックオフ時間の合計が短かった端末が, 早く転送を開始する点, あるいは, 同一メッセージを複数回受信する場合は, 最初にパケットを受信した時点で完了し転送処理を行う点などを総合的に考慮して, メッセージの到達時間に関するモデル化を行う必要がある.

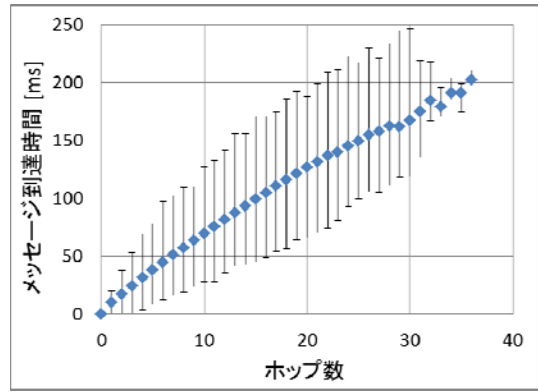


端末数 $N=1,000$ (端末密度 $\sigma=2.5$)

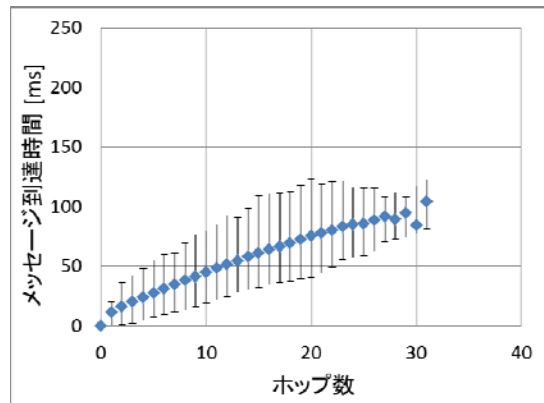


端末数 $N=2,000$ (端末密度 $\sigma=5.0$)

図 5. 情報到達率



端末数 $N=1,000$ (端末密度 $\sigma=2.5$)



端末数 $N=2,000$ (端末密度 $\sigma=5.0$)

図 6. ホップ数と到達時間の関係

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 榎原勝己, 原田拓弥, 武次潤平, "Performance approximation of persistent relay CSMA with carry-over of backoff counter freezing after collision," WSEAS Transactions on Communications, vol. 14, Article ID 1, pp. 1-10, 2015 年.
- ② 榎原勝己, 武次潤平, "Performance improvement of persistent relay CSMA Using random relaying of partitioned MDS codeword block on error-prone channels," Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT), vol. 4, no. 2, pp. 31-39, 2014 年 2 月.

[学会発表] (計 17 件)

- ① 榎原勝己, 武次潤平, "Performance analysis of network coding-based cooperative ARQ with carry-over of backoff counter freezing after collision," in Proceedings of the 13th International Conference on Data Networks, Communications, Computers (DNCOC02015), Budapest, Hungary,

- pp. 23-32, 2015年12月.
- ② 榊原勝己, 原田拓弥, 武次潤平, "Simulation study of persistent relay CSMA with carry-over of backoff counter freezing after collision," in Proceedings of the 5th European Conference on Communications (ECCOM2014), Geneva, Switzerland, pp. 33-39, 2014年12月.
 - ③ 榊原勝己, 藤野貴志, 武次潤平, "Performance evaluation of slotted probabilistic flooding with backoff interval," in Proceedings of the 2nd Mosharaka International Conference on Telecommunication Systems and Networks (MIC-Telecom2014), Istanbul, Turkey, pp. 1-6, 2014年12月.
 - ④ 榊原勝己, 武次潤平, "Performance analysis of random relaying of partitioned MDS codeword block applied to persistent relay CSMA over random error channels," in Proceedings of the 3rd International Conference on Sensor Networks (SENSORNETS2014), Lisbon, Portugal, pp. 155-164, 2014年1月.
 - ⑤ 榊原勝己, 武次潤平, "Application of random relaying of partitioned MDS codeword block to persistent relay CSMA over random error channels," in Proceedings of the 5th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT2013), Almaty, Kazakhstan, pp. 106-112, 2013年9月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榊原 勝己 (SAKAKAIBARA KATSUMI)
岡山県立大学・情報工学部・教授
研究者番号:10235137

(2) 研究分担者

武次 潤平 (TAKETSUGU JUMPEI)
岡山県立大学・情報工学部・助教
研究者番号:10405483