

複雑ネットワークにおける 抑制的エピデミックルーティングのモデル化

川端 奈津子、山崎 康広、大崎 博之

関西学院大学 大学院理工学研究科
情報科学専攻

2018年9月4日

発表の内容

はじめに

抑制的エピソードルーティング

解析

数値例

まとめ

研究の背景: DTN ルーティングとその効率化手法

- ▶ **DTN (Delay/Disruption Tolerant Networking) ルーティング**
 - ▶ **ストア・キャリー・フォワード型** のメッセージ中継
 - ▶ 代表的な性能指標
 - ▶ メッセージ配送遅延・配送率・スループット
- ▶ 効率化のためのアプローチ
 - ▶ 到達確率を高める
 - ▶ **メッセージ複製**
 - ▶ 符号化
 - ▶ 輻輳/資源枯渇の回避
 - ▶ (効用ベースの) 中継ノード選択
 - ▶ **ACK** によるメッセージ複製の削除
 - ▶ データ圧縮
 - ▶ **TTL**

研究の背景: 複数メッセージ転送時の問題とブロードキャスト ACK

- ▶ エピデミックルーティング (epidemic routing)
 - ▶ メッセージをエピデミックに (流行病的に) 拡散する
 - ▶ 大量のメッセージが複製される
- ▶ 「ネットワーク資源 / メッセージ生成レート」比が小さい...
 - ▶ ほぼ最適なルーティングが可能
- ▶ 「ネットワーク資源 / メッセージ生成レート」比が小さい...
 - ▶ 大量のメッセージ複製による性能劣化

関連研究: ウィルス (病原菌) 拡散のモデル化手法 (1/2)

- ▶ (ルーティングではない) ウィルス (病原体) 拡散のモデル化 (1920 年代 ~ 現在)
 - ▶ ノードの状態
 - ▶ SI (Susceptible Infected) モデル
 - ▶ SIS (Susceptible Infected Susceptible) モデル
 - ▶ SIR (Susceptible Infected Recovered/Removed) モデル
 - ▶ 接触モデル
 - ▶ 完全混合 (全ノードが対等、等確率で接触)
 - ▶ グラフ (接触関係 がグラフで与えられる、小規模 & 大規模)

関連研究: ウィルス (病原菌) 拡散のモデル化手法 (2/2)

- ▶ (ルーティングではない) ウィルス (病原体) 拡散のモデル化
 - ▶ 状態の定義
 - ▶ 各状態の (例: 感染している) ノード数 (個々のノードを **区別しない**) (マクロモデル)
 - ▶ 各ノードの状態 (ミクロモデル)
 - ▶ 記述方法
 - ▶ 離散 (マルコフ連鎖) 厳密、小規模システムのみが対象
 - ▶ 連続 (微分方程式) 近似、**大規模システム** のモデル化が可能

関連研究: エビデミックルーティングのモデル化

- ▶ DTN ルーティングとの対応
 - ▶ 感染されるもの
 - ▶ 人・動物 ノード
 - ▶ 感染するもの
 - ▶ ウィルス (病原体) (一種類) メッセージ (複数種類)
 - ▶ 感染からの回復
 - ▶ 自然治癒 メッセージ廃棄、ACK による廃棄
 - ▶ 目的
 - ▶ ウィルスの撲滅 メッセージの早期・確実・低コスト配送

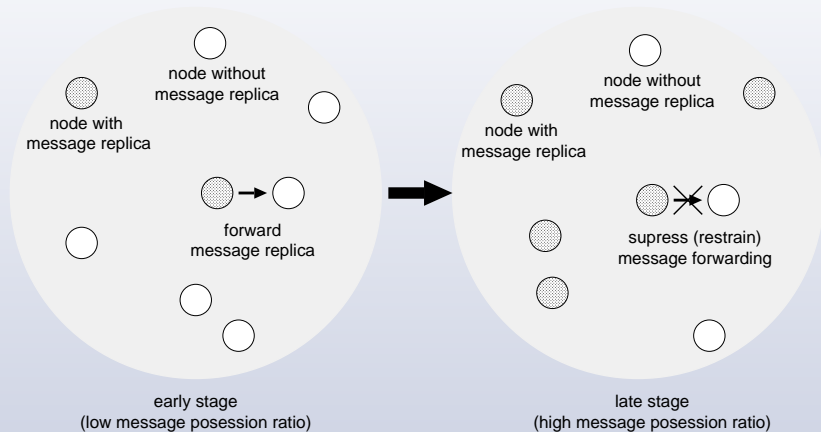
関連研究: 複雑ネットワーク上のエピデミックのモデル化

- ▶ 抑制的エピデミックルーティング
 - ▶ 目的: 複数メッセージ配送時の配送遅延を短縮
 - ▶ アイデア: エピデミックルーティング後半のメッセージ拡散を **意図的に抑制**
- ▶ 複雑ネットワーク上のエピデミックの解析手法の発展
 - ▶ 各ノードのダイナミクスを記述 状態爆発
 - ▶ 全ノードを対等とみなす グラフ構造の影響が失なわれる
 - ▶ 次数が等しいノードは対等 とみなす 状態削減が可能
 - ▶ **DBMF (Degree-Based Mean Field) 近似 (2002年 ~)**

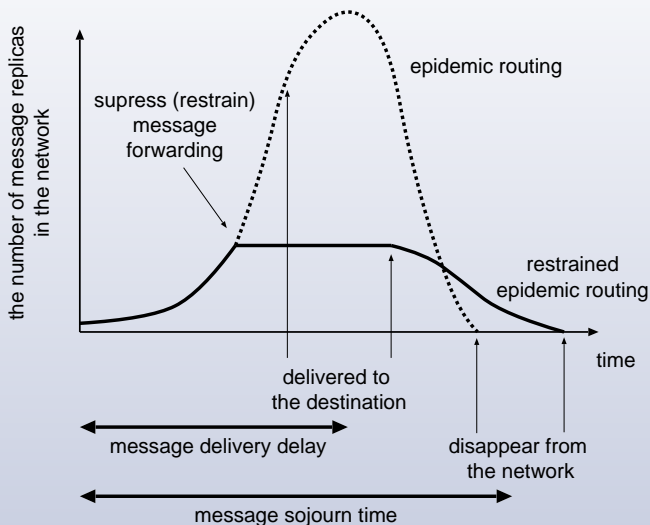
研究の目的: 複雑ネットワークにおけるエピデミックルーティングの解析

- ▶ 抑制的エピデミックルーティングのダイナミクスを記述
- ▶ **DBMF (Degree-Based Mean Field)** による近似
 - ▶ ノードの接触関係 (ネットワークの構造) がメッセージ配送に与える影響を明らかにする

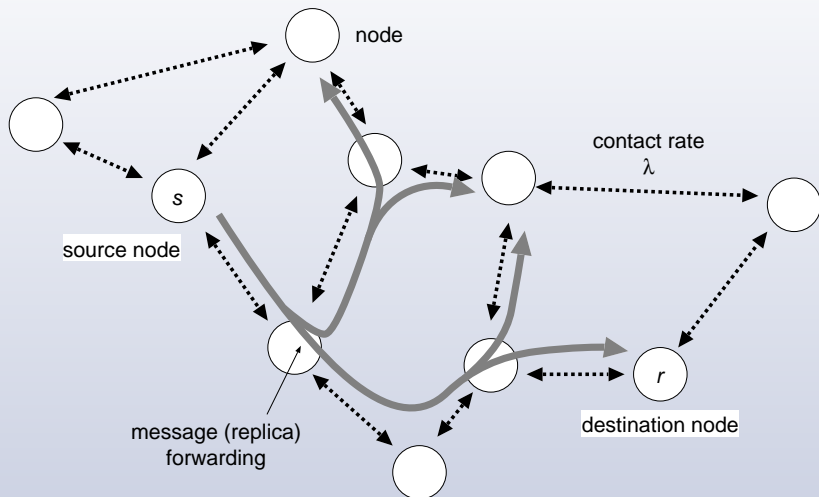
抑制的エピデミックルーティング: 概要



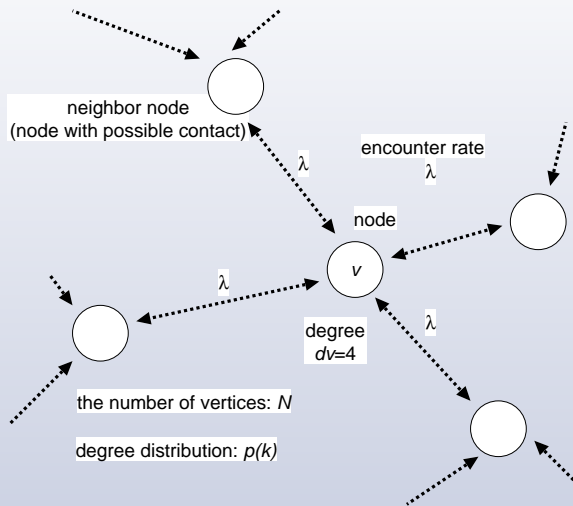
抑制的エピデミックルーティング: エピデミックルーティングとの比較



解析モデル: 送信元ノードから宛先ノードへのメッセージ配送



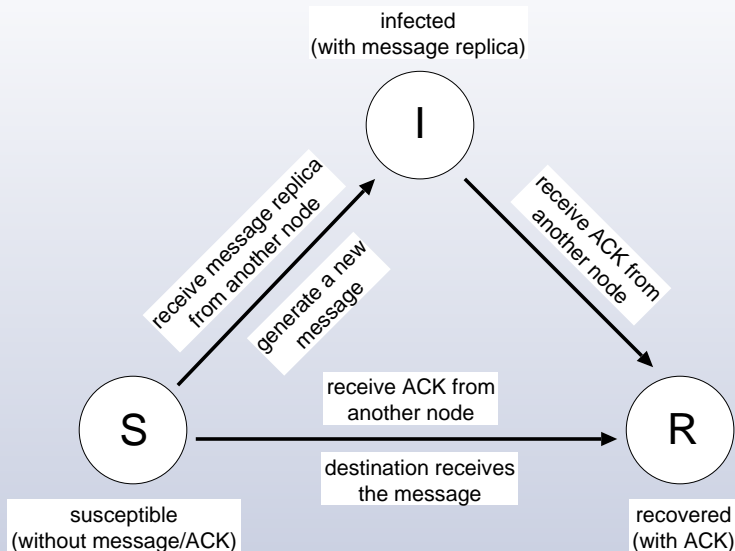
解析モデル: ノード同士の接触関係を無向グラフとして表現



解析における仮定

- ▶ 抑制的エピデミックルーティング + ブロードキャスト ACK
- ▶ N 台のノード
- ▶ 時刻 $t = 0$ において送信元ノードで単一のメッセージが発生
- ▶ ノード同士の接触はレート λ のポアソン (ただし特定のノードとのみ接触)
- ▶ 接触関係を表すグラフの次数分布: $P(k)$

解析モデル: SIR モデルの各状態との対応



解析: 初期状態 ~ メッセージ中継抑制まで

▶ 初期状態

$$\rho_k^I(0) = \begin{cases} \frac{1}{NP(k)} & k = d_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho_k^R(0) = 0 \quad (2)$$

$$\rho_k^S(0) = 0 \quad (3)$$

▶ メッセージ複製保有ノード数の時間変化

$$\frac{d\rho_k^I(t)}{dt} = \lambda k \rho_k^S(t) \Gamma_k(t) \quad (4)$$

$$\Gamma_k(t) = \sum_{k'} P(k'|k) \rho_{k'}^I(t) \quad (5)$$

解析: メッセージ中継抑制 ~ メッセージ配送まで

- ▶ 宛先ノードに到着するまでメッセージ保有ノード数は変化しない

$$\frac{d\rho_k^I(t)}{dt} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d\rho_k^R(t)}{dt} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{d\rho_k^S(t)}{dt} = 0 \quad (8)$$

- ▶ メッセージ中継が抑制されてから、宛先ノードに到着するまでの時間

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{\lambda d_r \Gamma_{d_r}(t_1)} \quad (9)$$

解析: メッセージ配送 ~ ブロードキャスト ACK 配布

- ▶ メッセージ配送完了直後の状態

$$\rho_k^I(t_2) = \rho_k^I(t_1) \quad (10)$$

$$\rho_k^R(t_2) = \begin{cases} \frac{1}{NP(d_r)} & k = d_r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$\rho_k^S(t_2) = 1 - \left(\rho_k^I(t_2) + \rho_k^R(t_2) \right) \quad (12)$$

- ▶ ブロードキャスト ACK によるメッセージ削減

$$\frac{d\rho_k^R(t)}{dt} = \lambda k (1 - \rho_k^R(t)) \Omega_k(t) \quad (13)$$

$$\Omega_k(t) = \sum_{k'} P(k'|k) \rho_{k'}^R(t) \quad (14)$$

数値例: 3種類の次数分布

▶ ポアソン分布

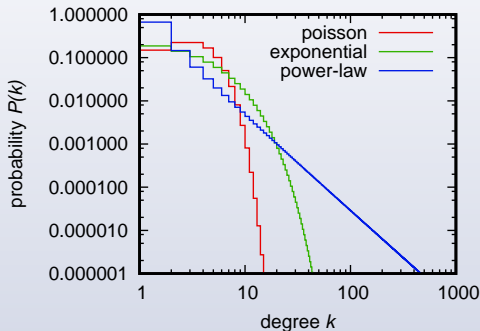
$$P(k) = e^{-\bar{k}} \frac{\bar{k}^k}{k!} \quad (15)$$

▶ 指数分布

$$P(k) = (1 - e^{-\mu}) e^{-\mu k} \quad (16)$$

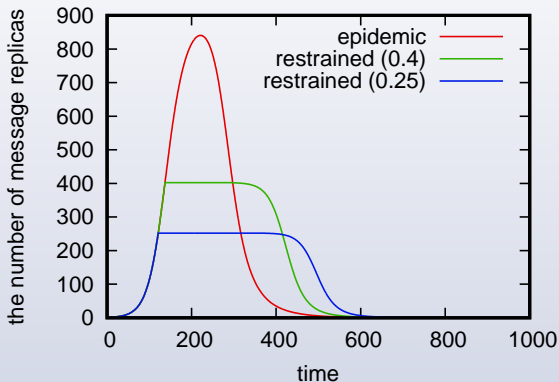
▶ ベキ分布

$$P(k) = \frac{k^{-\alpha}}{\zeta(\alpha)} \quad (17)$$



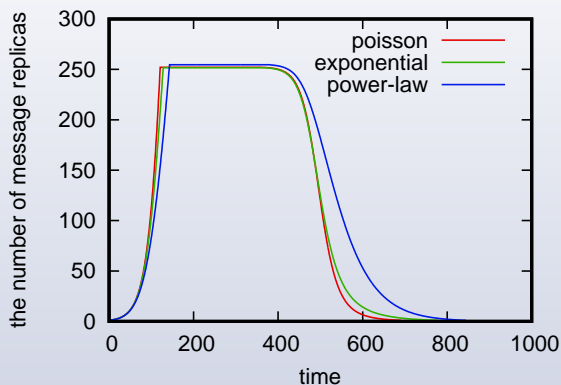
平均次数 $\bar{k} = 3$

数値例: ネットワーク中のメッセージ複製数の時間変動



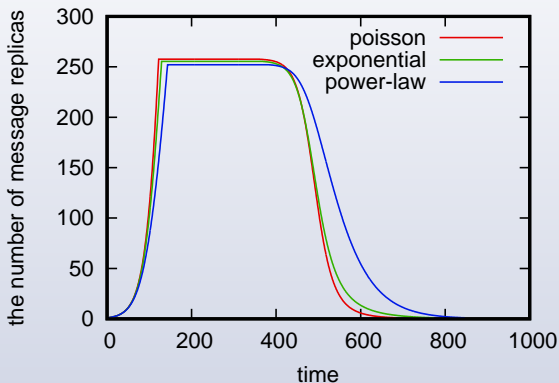
ノード数: 1,000, 次数分布: ポアソン分布, 送信元・宛先ノードの次数: 1, 接触レート: 1/60

数値例: ノード同士の接触関係の違いがメッセージ配送に与える影響



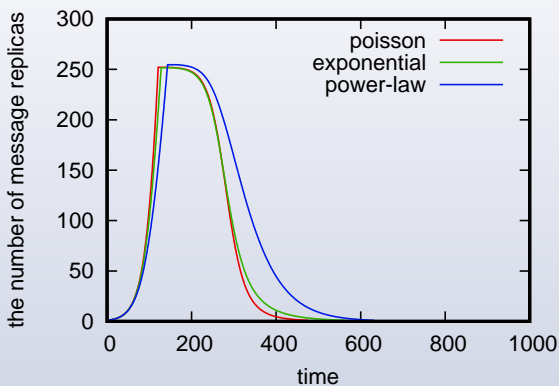
ノード数: 1,000, 送信元・宛先ノードの次数: 1, 接触レート: $1/60$, p_T : 0.25

数値例: ノード同士の接触関係の違いがメッセージ配送に与える影響



ノード数: 1,000, 送信元ノードの次数: 10, 宛先ノードの次数: 1, 接触レート: $1/60$, βp_T : 0.25

数値例: ノード同士の接触関係の違いがメッセージ配送に与える影響



ノード数: 1,000, 送信元ノードの次数: 1, 宛先ノードの次数: 10, 接触レート: $1/60$, p_T : 0.25

まとめ

- ▶ 抑制的エピデミックルーティング のモデル化
 - ▶ ノード同士の接触関係が 複雑ネットワークとして与えられる 場合を対象
 - ▶ 単一メッセージをルーティングした時のダイナミクスを記述
- ▶ 平均メッセージ配送遅延 および 平均メッセージ滞在時間 を解析的に求めた
- ▶ 数値例による ノードの接触関係が配送遅延に与える影響の分析
 - ▶ 接触関係グラフの次数分布が べき則に従う場合
 - ▶ メッセージ配送遅延が (べきでない場合と比較して) 増大 してしまう

今後の課題

- ▶ 次数分布を限定した時の平均メッセージ配送遅延および平均メッセージ滞在時間の導出
- ▶ 複数メッセージによる資源競合のモデル化
- ▶ 解析結果を利用した DTN ルーティング方式の考案