

遅延耐性ネットワークにおけるエピデミックブロードキャストの 時間的・空間的メッセージ拡散特性の解析

A Study on Spatio-Temporal Message Diffusion in Epidemic Broadcasting on DTNs

渡部 康平¹

Kohei Watabe

大崎 博之²

Hiroyuki Ohsaki

大阪大学 大学院情報科学研究科 情報ネットワーク学専攻¹

Department of Information Networking, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

関西学院大学 理工学部 情報科学科²

Department of Informatics, School of Science and Technology, Kwansei Gakuin University

1 まえがき

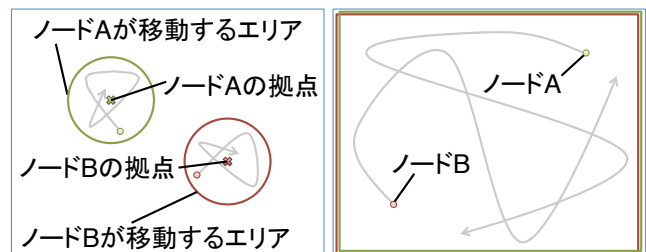
近年、モバイルノードにより構成される遅延耐性ネットワークが注目されている。遅延耐性ネットワークにおいて一対多通信を実現する方法として、エピデミックブロードキャストが挙げられる。エピデミックブロードキャストでは、他ノードが通信可能距離内に入った際に各メッセージ保有ノードがメッセージの複製を中継することで、ネットワーク上のすべてのノードにメッセージを拡散する。図 1(a) に示すように、ノードの移動に空間的局所性が存在する環境下では、ノード同士が直接通信可能な距離まで近づくことが困難となるため、エピデミックブロードキャストの通信性能は著しく低下する可能性がある。しかし、既存研究において提案されたモビリティモデルの多くは、図 1(b) に示すように、定常状態において移動可能エリアに各ノードが均一に分布するようなモデルであり、ノード移動の局所性に焦点を当てた解析はほとんどなされていない。本稿では、定常状態におけるノードの位置分布の形状によりノード移動の局所性を表現することにより、ノード移動の局所性が、エピデミックブロードキャストにおける時間的および空間的なメッセージ拡散特性に与える影響を解析する。

2 ノードの位置分布からメッセージ拡散過程の導出

ノード i ($i = 1, 2, \dots, N$) の位置分布 $p_i(x, y)$ から、ノード i と j が互いに通信可能距離内に位置し、メッセージが送信可能になる頻度 $w_{i,j}$ を導出し、メッセージの保有率が一定に達するまでの時間と時刻 t において各ノードがメッセージを保有している確率を導出する。通信可能距離 r がすべてのノードについて等しく、 r が十分小さいとき、 $w_{i,j}$ は以下のように近似できる。

$$w_{i,j} \simeq \frac{r^2 \pi}{T_{cd}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_i(x, y) p_j(x, y) dx dy$$

ここで、 T_{cd} はノード i と j が通信可能になってから通信不可能になるまでの平均時間を表し、Samar らにより解析的に導出されている [1]。さらに、対角成分がすべて 0 で、 $w_{i,j}$ ($i \neq j$) を (i, j) 成分に持つ行列 A を用いると、時刻 t にノード i がメッセージを保有している確率



(a) ノード移動の局所性あり

(b) ノード移動の局所性なし

図 1 ノード移動の局所性。

$\pi_i(t)$ は以下の漸化式によって得ることができる。

$$\pi(t + \Delta t) = (E - \Pi) A \pi(t) \Delta t + \pi(t) \quad (1)$$

ただし、

$$\pi(t) = \begin{pmatrix} \pi_1(t) \\ \pi_2(t) \\ \vdots \\ \pi_N(t) \end{pmatrix}, \Pi = \begin{pmatrix} \pi_1(t) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \pi_2(t) & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \pi_N(t) \end{pmatrix}$$

である。また、 E と Δt は、それぞれ N 次の単位行列と微小時間を表す。式 (1) を用いることで、各ノードのメッセージ保有率を時間の関数として導出できる。文献 [2] では、メッセージが送信可能になる頻度 $w_{i,j}$ を i, j によらず一定であると仮定して、メッセージ拡散をモデル化しており、式 (1) は文献 [2] におけるメッセージ拡散過程のモデルの自然な拡張になっている。

3 ノード移動の局所性がメッセージ拡散に与える影響

各ノードの位置分布を相関のない 2 次元正規分布および 2 次元コーシー分布として、50% のノードにメッセージが配送されるまでの時間 (50% 配送遅延) を式 (1) を用いて求めた (図 2)。ノード数 $N = 100$ とし、各ノードの位置分布の最頻値 (ノードの拠点) は 400 [m] 間隔で 10×10 の格子状に配置した。時刻 0 にメッセージを保有するノードは 1 ノードで、その拠点はフィールド左上の格子点に配置した。コーシー分布は、正規分布と同様に釣鐘型の形状を持つものの、裾の減衰が非常に遅い分布として知られている。図 2 では、形状の異なる分布の比

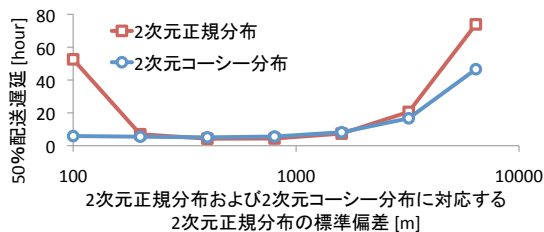


図2 ノードの位置分布が相関のない2次元正規分布およびコーシー分布に従う場合の50%配送遅延.

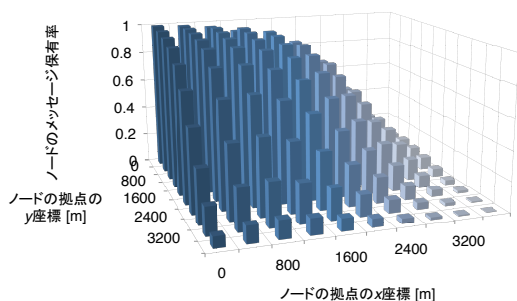


図3 ノードの位置分布が相関のない2次元正規分布に従う場合の拠点の座標とメッセージ保有率.

較を可能にするため、2つの分布の90%分位点が一致するように尺度母数を調整している。図2から、局所性が強い(標準偏差が小さい)と、ノードの位置分布が正規分布に従う場合、配送遅延が著しく増加する一方、ノードの位置分布が裾の減衰が遅いコーシー分布に従う場合、配送遅延がほとんど増加していないことが確認できる。

また、ノードの位置分布の裾の減衰速度の違いは、メッセージを保有するノードが分布する範囲にも大きな影響を与える。図3および図4は、ノードの位置分布がそれぞれ相関のない2次元正規分布およびコーシー分布に従う場合に、50%配送遅延時点における各ノードのメッセージ保有率 $\pi_i(t)$ を示している。x軸およびy軸は、それぞれノードの拠点のx座標およびy座標を表す。図から、裾の減衰が遅いコーシー分布の場合では、正規分布に比べてメッセージ保有ノードがより広い範囲に分布していることが確認できる。

一般に、各ノードの位置分布の確率密度関数が、拠点からの距離 ψ の関数として $\Theta(\psi^{-\gamma})$ と表される場合、メッセージの拡散速度はノードの拠点間の距離 d に対して $\Theta(d^{-\gamma})$ でスケールする。これは、各ノードの拠点が互いに離れるようなノード密度が低い環境下では、ノードの位置分布の裾の減衰速度の違いが大きな性能差となって表れることを意味している。ノードの通信の可否を記録した実データを用いた検証[3]では、ノード移動の局所性を表現する数少ないモビリティモデルであるHomesick Lévy Walk (HLW)がノード間の通信の可否のパターンをよく再現することが示されている。また、GPSを用いたノードの移動特性の分析結果[4]は、HLWの直進距離分布を特徴づけるパラメータ β が $-2.40 \leq \beta \leq -1.35$ となること

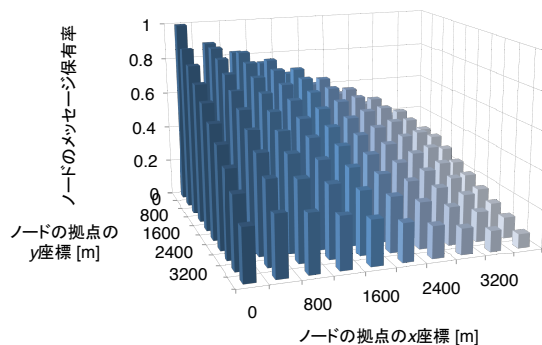


図4 ノードの位置分布が2次元コーシー分布に従う場合の拠点の座標とメッセージ保有率.

を示唆している。パラメータ β がこの範囲の値を取る場合、ノードの位置分布は、 $\Theta(\psi^{-\gamma})$ ($-2.40 \leq \gamma \leq -1.35$)で非常に減衰が遅い。これらのことは、ノードの位置分布の裾野がゆっくりと減衰する環境では、たとえノード密度が非常に低い状況であっても合理的な時間内でメッセージ拡散が実現できる可能性を示唆している。

4 まとめと今後の課題

本稿では、ノード移動の局所性がエpidemickブロードキャストの時間的および空間的なメッセージ拡散特性に与える影響を分析し、ノードの位置分布の裾の減衰速度の違いによって、エpidemickブロードキャストの有効性が大きく影響を受けることを明らかにした。今後は、本モデルを利用して、ノードの拠点の配置が非一様な場合のメッセージ拡散特性の評価が求められる。

謝辞

本研究の一部は、特別研究員奨励費24・3184およびJSPS 科研費25280030の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] P. Samar and S. B. Wicker, "Link Dynamics and Protocol Design in a Multihop Mobile Environment," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol.5, no.9, pp.1156–1172, Sept. 2006.
- [2] X. Zhang, G. Neglia, J. Kurose, and D. Towsley, "Performance Modeling of Epidemic Routing," Computer Networks, vol.51, no.10, pp.2867–2891, July 2007.
- [3] A. Fujihara and H. Miwa, "Homesick Lévy Walk and Optimal Forwarding Criterion of Utility-based Routing under Sequential Encounters," Internet of Things and Inter-cooperative Computational Technologies for Collective Intelligence, pp.207–231, Springer, Dec. 2013.
- [4] I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, and S. Chong, "On the Levy-Walk Nature of Human Mobility: Do Humans Walk Like Monkeys?," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.19, no.3, pp.630–643, June 2011.