

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

## ノードの移動の局所性が エピソードブロードキャストに与える影響

渡部 康平 †    大崎 博之 ‡

† 大阪大学 大学院情報科学研究科  
‡ 関西学院大学 理工学部情報科学科

2013年8月9日

NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ 1

## DTN とエピソードブロードキャスト

- ノードが疎な環境下における MANET (Mobile Ad-Hoc Network) に代表される DTN (Delay/Disruption-Tolerant Networks) が注目を集めている。
- DTN において一対多通信を実現する手法として、**エピソードブロードキャスト**がある。
  - メッセージを持たないノードが電波到達範囲内に侵入 (接触) してきたときにメッセージを送信。

モバイルノード    ■ メッセージ

接触したノードにメッセージを送信

NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ 2

## ノードの移動の局所性が通信品質に与える影響

- 一般に、ノードモビリティはエピソードブロードキャストでの通信性能に大きく影響する。
- 特に、ノードが特定のエリアの周辺を移動し、局所的に分布する場合、通信性能が著しく劣化すると予想される。

ノードがフィールド全体を移動

ノードが特定エリア周辺を移動  
移動の軌跡が変わらず接触の機会がない

モバイルノードの移動の軌跡

ノードの移動可能領域

**本研究の目的**

DTN における **ノードの移動の局所性**が、エピソードブロードキャストの **メッセージ配送遅延**および **空間的広がり**に与える影響を評価。

NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ 3

## 既存研究で影響が評価されてきたモビリティモデル

- Random WayPoint (RWP) モビリティモデル
  - フィールド内からランダムに行き先を選択して直線移動。
  - 移動後はランダムな時間待機し、再び新たな行き先を選択。
- Random Direction (RD) モビリティモデル
  - フィールドの境界に到達するとランダムな時間だけ待機。
  - ランダムに方向を選択し、境界に到達するまで直進。

ランダムに選ばれた行き先に直進

境界で方向転換

NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ 4

## 既存研究で影響が評価されてきたモビリティモデル (2)

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

### ■ Random Walk (RW) モビリティモデル

- 現在位置から方向と速度をランダムに選択して直進.
- 時間  $t$  または距離  $l$  だけ直進後、再び方向と速度を選択.



### ■ Lévy Walk (LW) モビリティモデル

- RW モビリティモデルの直進距離  $l$  がべき分布に従うとしたモビリティモデル.
- GPS による人間の移動軌跡のデータの挙動を再現.



NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ

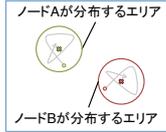
5

## 定常状態における位置分布と局所性

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

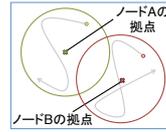
- 既存の評価におけるモビリティモデルでは、すべてのノードがフィールド内に定常状態で均一に分布する.
- 本研究では、ノードが個々に活動拠点を持ち、その周囲を移動して、**局所的に分布**する場合を考える.

ノードの位置分布が拠点に集中



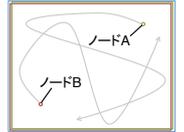
局所性強

ノードの位置分布が拠点から分散



局所性弱

すべてのノードが均一に分布



局所性なし

- ノードの拠点 (位置分布の平均/最頻値) からノードまでの平均距離  $E[L]$  が大きいほど**局所性が弱い**.

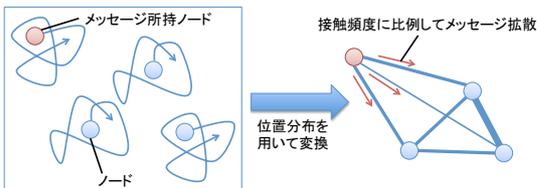
NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ

6

## 本研究のアプローチ

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

接触頻度を成分に持つ重み付き隣接行列  $A$  によって、DTN のエピデミックブロードキャストの問題を任意の**グラフ上のエピデミクス**の問題にマッピングすることで、メッセージ配送遅延を算出する.



- 同様のアプローチは感染症拡散の研究分野でも用いられている.

NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ

7

## 位置分布から接触頻度の導出

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

- ノード  $i$  の位置の確率密度関数を  $p_i(x, y)$  をとすると、単位時間あたりの総接触時間  $T_{\text{total}}$  は以下ようになる.

$$T_{\text{total}} \approx r^2 \pi \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_i(x, y) p_j(x, y) dx dy$$

for sufficiently small  $r$ ,

- 接触時間と接触の時刻が独立とし、接触 1 回あたりの平均接触時間を  $T_{\text{cd}}$  とすると、ノード  $i, j$  の**平均接触頻度**  $w_{i,j}$  は、以下で与えられる.

$$w_{i,j} = \frac{T_{\text{total}}}{T_{\text{cd}}}$$

- $T_{\text{cd}}$  は Samar らの研究で明らかにされている.

NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ

8

## 接触頻度からメッセージ所持ノード数の導出

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

- すべてのノード間の接触頻度が  $w$  で等しい場合、メッセージ所持ノード数の割合  $I(t)$  は以下の微分方程式を満たすことが先行研究で示されている。

$$\frac{d}{dt} I(t) = wI(t)(1 - I(t)).$$

- これを  $w_{i,j}$  を  $(i, j)$  成分を持つ行列  $A$  で自然に拡張すると、以下の漸化式が得られる。

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

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

$\pi(t)$  : ノード  $i$  が時刻  $t$  にメッセージを所持している確率

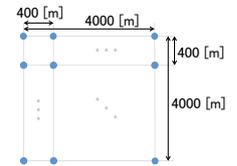
## 数値実験の実験条件

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

- ノードの位置分布を変化させた数値実験を実施した。

### 実験条件

- 各ノードは図の各点の周囲にそれぞれ分布。
- 各ノードの位置分布  $p_i(x, y)$  は **2次元正規分布** に従う。



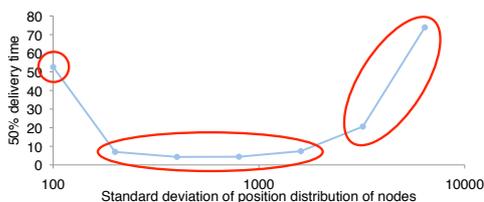
- 標準偏差を変化させることでノードの移動の局所性を変化させ、配送時間を比較。

速度 : [3000, 5000] [m/h] 上の一様分布    通信距離 : 50 [m]  
正規分布の標準偏差 : 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 [m]

## 位置分布が2次元正規分布の場合の実験結果

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

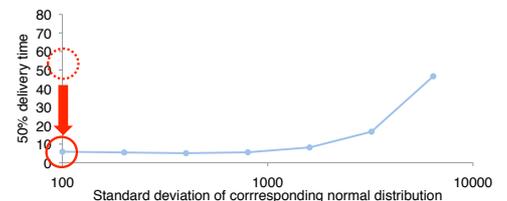
- 局所性が強い(標準偏差が小さく  $E[L]$  が小さい)とき、配送に要する時間が非常に大きくなる。
- また、局所性が著しく弱い場合もノードが疎になるため配送時間が増加するが、それ以外の場合は大きな差が見られない。



## 位置分布が2次元コーシー分布の場合の実験結果

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

- 正規分布を、裾がゆっくりと減衰する性質を示し、 $E[L]$  が発散するコーシー分布に置き換えて実験。
- 正規分布の評価の局所性の強い条件下で見られたような配送に要する時間の著しい増加は見られない。

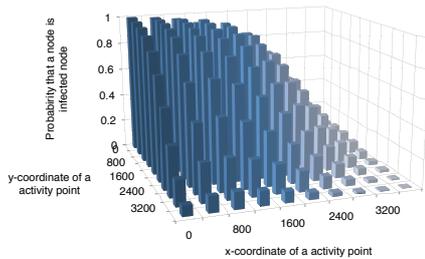


- 一般に、確率密度関数の裾が、拠点からの距離  $d$  に対して  $\Theta(d^{-3})$  より遅く減衰する場合、 $E[L]$  は無限大に発散。

## 局所性とメッセージ所持ノードの分布

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

- 同様の実験条件で、50%のノードにメッセージが普及した時点における各ノードのメッセージ所持確率を算出。
- 位置分布が正規分布の場合、メッセージ所持ノードが初期メッセージ所持ノードの付近に集中する。



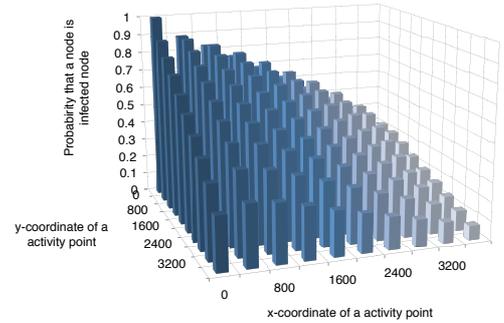
NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ

13

## 局所性とメッセージ所持ノードの分布 (2)

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

- 一方、コーシー分布の場合、同じメッセージ普及率でもより広いエリアに分布し、遠くまでメッセージが届くことが分かる。



NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ

14

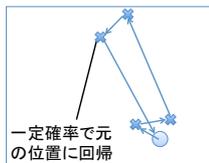
## 移動の特性と局所性

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

ここまでの評価では、ノードの位置分布の特性がメッセージ拡散に与える影響を評価したが、ここからは、**ノードの位置分布の特性が、ノードの移動特性とどのように結びついているかを議論する。**

- ノードの移動の局所性を表現する数少ないモビリティモデルとして Homsick Lévy Walk (HLW) モビリティモデルが提案されている。

- HLW モビリティモデル
  - べき分布に従う直進を行う LW モビリティモデルを拡張。
  - 各ステップ後、一定確率  $\alpha$  で拠点に回帰。



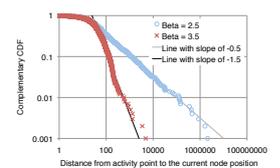
NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ

15

## HLW のパラメータと位置分布

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

- HLW モビリティモデルには、3つのパラメータが存在。
  - $\alpha$ : 拠点への回帰確率
  - $\beta$ : 直進距離が従うべき分布のべき指数の絶対値
  - $\lambda$ : 平均直進距離
- $\alpha$  が大きく  $\lambda$  が小さいほど、拠点からの平均距離  $E[L]$  は小さくなり、局所性は強まる。
- 位置分布の確率密度関数の裾は**拠点からの距離  $d$  に対して  $\Theta(d^{-\beta})$  で減衰し、 $\beta \leq 3$  で  $E[L]$  は発散。**
- HLW に従うノードの拠点からの距離  $L$  の分布をシミュレーションで導出した結果、矛盾しない結果が得られた。



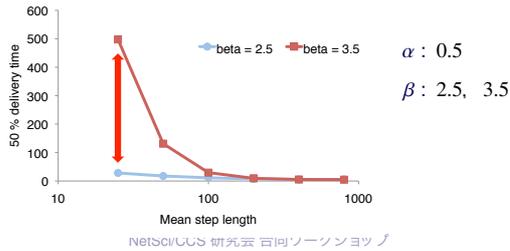
NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ

16

## HLW の平均直進距離とメッセージ配送遅延

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

- 前述の数値実験と同様に、拠点が格子状に配置された条件下で、HLW に従うノード間でエピデミックブロードキャストを行うシミュレーションを実施。
- 直進距離  $\lambda$  を変化させ、メッセージ配送遅延を比較。
- 数値実験の結果と同様に、 $\lambda$  が小さいとき、位置分布の裾の減衰の違いにより、配送遅延が大きく変化する。



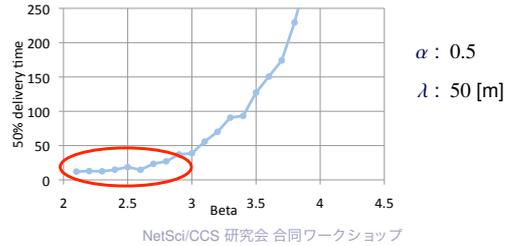
NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ

17

## HLW の直進距離のべきとメッセージ配送遅延

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

- $\beta$  を変化させることで、位置分布の裾の特性を変化させると、メッセージ配送遅延が大きく変化する。
- 拠点からの平均距離  $E[L]$  が発散する  $\beta \geq 3$  では配送遅延は非常に小さい。
- GPS による人間の移動の計測データでは、 $1.35 \leq \beta \leq 2.40$  が観測されている。



NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ

18

## まとめ

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

- ノードの移動の局所性の強度に依存して、エピデミックブロードキャストでのメッセージ配送に要する時間が大きく変化することが確認された。
  - ノードの拠点からの距離  $L$  の平均  $E[L]$  が小さい領域では配送時間が著しく増大する。
- ノードの移動の局所性は、定常状態におけるノードの位置分布の裾の構造に大きく左右される。
  - 拠点からの距離  $d$  に対して位置分布の確率密度関数の裾が  $\Theta(d^{-3})$  よりゆっくりと減衰するとき、 $E[L]$  は無限大に発散し、メッセージは  $E[L]$  が有限の場合に比べ非常に短い時間で広く拡散される。

NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ

19

## まとめ (2)

研究背景  
ノードの移動の局所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性の関係  
まとめ

- HLW モビリティモデルに基づき、ノードの移動特性と位置分布の関係を明らかにした。
  - HLW に従うノードの位置分布の確率密度関数はパラメータ  $\beta$  に依存して、拠点からの距離  $d$  に対して  $\Theta(d^{-\beta})$  で減衰する。

GPS による人間の移動特性に関するデータからは、 $1.35 \leq \beta \leq 2.40$  が観測されており、ノードが非常に疎な環境下でも、合理的な時間内のメッセージ配送を実現できる可能性を示唆している。

NetSci/CCS 研究会 合同ワークショップ

20

## 謝辞

研究背景  
ノードの移動の局  
所性  
解析  
数値実験  
移動特性と局所性  
の関係  
まとめ

- 本研究は JSPS 科研費 25280030 および特別研究員奨励費 24・3184 の助成を受けたものである。