

多数の携帯端末移動による 2 点間低速通信の設計と考察

A study of relay network based on multiple personal data assistance terminals for very slow connection

岡本 匡由† 高橋 徹†
Masayoshi Okamoto Toru Takahashi

1. はじめに

本稿では、ネットワーク接続が被災により分断される場合を想定し、分断されたネットワークに代わる初期的な通信網の構築方法について検討する。被災後、多くの人々が被災地域から地域外へ移動する。逆に、被災地へは災害復旧や災害救助に向けた支援活動のために多くの人々が移動する。これら人々の地域間移動を通信媒体に用いる通信網構築のアイデアと構築方法について述べる。

人々が持ち歩いている携帯端末同士が、直接通信可能な距離に接近した時に情報を交換し、出会う人毎に情報交換を繰り返すことで、情報を伝達する仕組みを提案する。近くに通信相手が存在しない場合は、人の移動が情報の伝搬を担う。地域間に十分な人々の往来があれば、情報交換と人の移動により、地域間に低速通信網を確立できるのではないかというアイデアである。本提案は、スマートフォンを媒介としたバケツリレーによる人力での情報通信手段と言い換えることができる。

どの程度の人々が往来することによって、どの程度の情報伝達が可能であるかについてシミュレーション実験を通じて、通信網の構築方法を検討する。

2. 研究背景

災害発生地域では、災害発生後の初期段階に、情報通信が困難／不能な地区が存在したことが明らかとなっている [1][2]。電力供給網の障害、通信回線網の障害など様々な要因で、情報が届かない地域が発生し、情報通信の観点で孤立する問題がある。

この問題を解決するために、通信設備を物理的に復旧する方法が検討されている。ネットワークの復旧に関する関連研究には [2][3][4] など多数ある。例えば、分断されたネットワーク間の復旧は [2][3][4] がある。小型無人飛行機に無線中継装置を搭載する移動型無線中継機の活用法が述べられている。小型無人飛行機がノードの役割を担うことにより、2 つのネットワーク間の即応的な通信を確立できる [2][3]。

通信インフラのない環境下で、ロボットが利用する通信インフラの構築とデータ通信を行うための無線モジュールを配置する方法も [4] に記されている。無線モジュールの通信範囲を繋ぎ合わせることで、通信路を確保する方法である。

これらの研究は、インフラそのものを復旧させることを目的としているため、初期段階（災害発生から 1 週間以内）に不向きである。また、インフラ復旧には、多くの時間とコストがかかる他、人命救助が優先され、通信網の復旧が後回しになることもある。従って、低コストで災害発生直後から 1 週間程度までの復旧初期段階における通信手段の

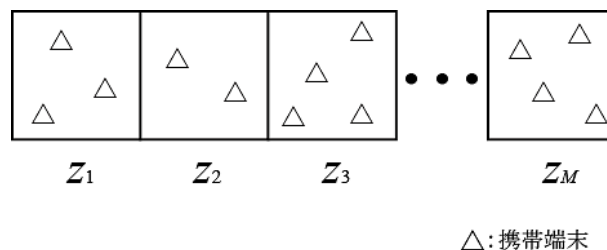


図 1: 概要図

構築方法が必要である。復旧初期段階において重要な通信は、

- (1) 被災地域外から被災地への情報伝達
- (2) 被災地から被災地域外への情報伝達
- (3) 被災地域内の情報伝達

がある。

(1) については、災害発生直後はラジオから避難勧告や災害情報が配信されて役立ったことが知られている [1][2]。(2) については、停電や通信の輻輳により情報伝達が困難であった [1][2]。(3) については、手書きの掲示板を使用する方法で、地域の生活基盤維持のための情報共有が行われていた [1]。

我々の提案手法は、インフラの復旧までの間、必要最小限の情報伝達を携帯端末のアプリケーションで実現しようというアプローチである。短時間で、低コストな通信網を構築することを目指している。

3. システム概要

本システムは、被災地と地域外を往来する人（携帯端末）の物理的移動と端末間通信により情報を伝搬する。

図 1 は被災地と地域外の間を、多数の携帯端末が往来する時の通信モデルを示している。被災地 (z_2, \dots, z_M) と地域外 (z_1) の間を多数の携帯端末が往来している時、携帯端末の物理移動と端末間通信により、低速通信を実現する。

z_2, \dots, z_M の通信インフラが使用不能な時に z_1 と z_M の通信を確立することが目的である。同一ゾーン内では、端末間の距離が十分近いとし、ネットワークインフラに依存することなく端末間通信を可能とする。端末はゾーン間を移動し、ゾーン内の端末間で情報が共有され、ゾーンを移動する端末により隣接するゾーンへ情報が転送される。

従って z_1 の端末から z_M へ向けて情報を送信すると、端末の移動と端末間情報共有の繰り返しにより、 z_M まで情報を届けることができる。ただし、通信端末の宛先を指定する方法については今後の検討項目とし、今回は、ブロードキャスト通信を考える。

4. 移動モデル

人の移動をマルコフモデルでモデル化する。端末個々にモデル化するかわりに、確率的に捉える。

空間を M 個のゾーン z_1, z_2, \dots, z_M に分割する。人はゾーンからゾーンへ移動するものとする。この時、単位時間あたりにゾーン m から n へ移動する確率で人々の移動をモデル化すると、移動モデルのパラメータ V は、行列

$$V = \begin{pmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & v_{1,3} & \cdots & v_{1,M} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & v_{2,3} & \cdots & v_{2,M} \\ v_{3,1} & v_{3,2} & v_{3,3} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{M,1} & v_{M,2} & \cdots & \cdots & v_{M,M} \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表せる。ただし $v_{m,n}$ は、ゾーン m から n へ移動する確率である。確率であるので $\sum_{m=1}^M v_{m,n} \geq 0$ を満たす。

ここでのゾーン z_1, z_2, \dots, z_M が図 1 の様に、順番に隣接しているとすると、単位時間が十分に短い場合には、ゾーンを飛び超える移動が起こらず Left-To-Right モデルで

$$\hat{V} = \begin{pmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & 0 & \cdots & 0 \\ v_{2,1} & v_{2,2} & v_{2,3} & \cdots & 0 \\ 0 & v_{3,2} & v_{3,3} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & v_{M,M} \end{pmatrix} \quad (2)$$

と表せる。本実験では式(2)のモデルを用いる。

4.1. 単純な移動モデル

移動モデルとして \hat{V} を用いるとき、具体的な $\hat{v}_{m,n}$ をどのように設計するかは一つの課題である。ここでは、単純な移動モデルを考える。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{同じゾーンに留まる確率 } \hat{v}_{m,m}, & p \\ \text{左のゾーンに移動する確率 } \hat{v}_{m,m-1}, & \frac{1-p}{2} \\ \text{右のゾーンに移動する確率 } \hat{v}_{m,m+1}, & \frac{1-p}{2} \\ \text{その他,} & 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

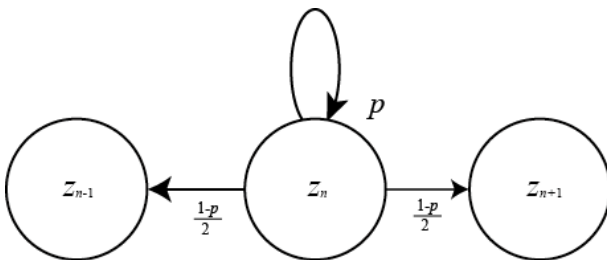


図 2：移動モデル

更に、初期状態 $t=0$ における人々の分布を各ゾーン毎に

$$\pi = [\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_M] \quad (4)$$

とする。 π_m は、全体の人のうち、ゾーン z_m にいる人の割合を表す。ここでも $\sum_{m=1}^M \pi_m \geq 0$ を満たす。

ここで、時刻 t において、ゾーン m 内にいる人の割合を $p(t, m)$ と表すと、

$$p(t, m) = p(t-1, m)\hat{v}_{m,m} + p(t-1, m-1)\hat{v}_{m-1,m} + p(t-1, m+1)\hat{v}_{m+1,m} \quad (5)$$

ただし $p(0, m) = \pi_m, (m=1, 2, \dots, M)$ である。

4.2. 移動シミュレーション

ゾーン数 $M=100$ でシミュレーション実験を行う。時刻 $t=0$ で、全ての端末が z_1 にあり、他のゾーンに端末が無いときに、 z_M に何れかの端末が到達するまでにかかる時間ステップをシミュレーション実験で評価した。 $p=0.1, \dots, 0.9$ のそれぞれの条件で 100 回のシミュレーション実験を行い、結果を平均した値を図 3 に示す。図 3 の横軸は、式(3)における p を表し、縦軸は、ゾーン 1 からゾーン M まで端末が移動するのにかかる時間をステップ数で表す。ステップ数は隣接ゾーンまで移動するのにかかる現実の時間に対応する。ゾーンが狭い程、端末の移動速度が速い程、単位ステップあたりの実時間は短い。

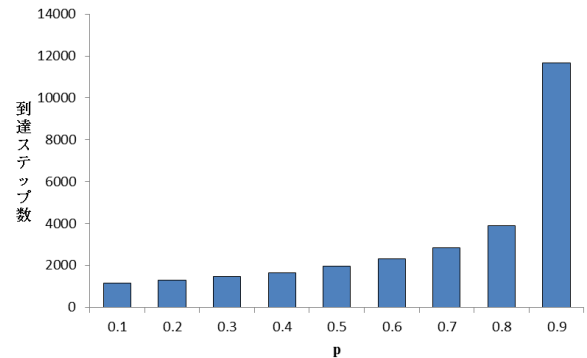


図 3：端末移動のステップ数 $\sim p$ に関して

p が大きくなるに連れて、到達にかかるステップ数が増えていることが確認できる。 p が大きい時、端末は同じゾーンに留まる可能性が高い。そのため、端末移動が抑制され、 z_1 の端末が z_M へ到達するのに時間がかかっている。 p によって通信速度が変わることを確認できる。

仮に単一ゾーンが 100m 四方であるとし、ゾーン間の端末移動を 1 分とすると、10,000m 先に情報を届けるために、 $p=0.1$ で 1,165 ステップ、つまり約 1200 分 (約 20 時間) かかる計算である。端末が徒歩によって運ばれると想定し、ゾーン間の移動を 100m/min としても、1 日で情報を 10km 先まで伝えることが可能である。

次にゾーン数を変えてシミュレーション実験を行う。時刻 $t=0$ で、全ての端末が z_1 にあり、他のゾーンに端末が無いときに、 z_M に何れかの端末が到達するまでにかかる時間ステップをシミュレーション実験で評価した。 $p=0.3, 0.6, 0.9$ のそれぞれの条件で 100 回のシミュレーション実験を行い、結果を平均した値を図 4 に示す。

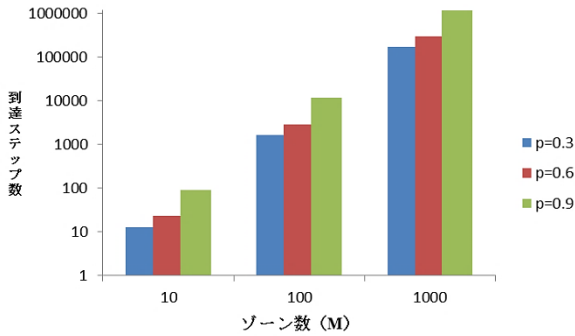


図 4：端末移動のステップ数～ M に関して～

ゾーン数の増加に伴い、ステップ数も増加する傾向を確認できる。より遠くまで情報を伝達するには多くのステップ数がかかるという結果が得られた。また、ゾーン数が 10 倍になると、ステップ数が約 100 倍増加する傾向を確認できる。更に、この傾向は p に依らず確認できる。

次に端末数を変えてシミュレーション実験を行う。時刻 $t=0$ で、全ての端末が z_1 にあり、他のゾーンに端末が無いときに、 z_M に端末が到達するまでにかかる時間ステップをシミュレーション実験で評価した。 $N=100, 1000, 10000, 100000$ のそれぞれの条件で 100 回のシミュレーション実験を行い、結果を平均した値を図 5 に示す。この実験では、 $M=100, 1000, p=0.6$ とする。

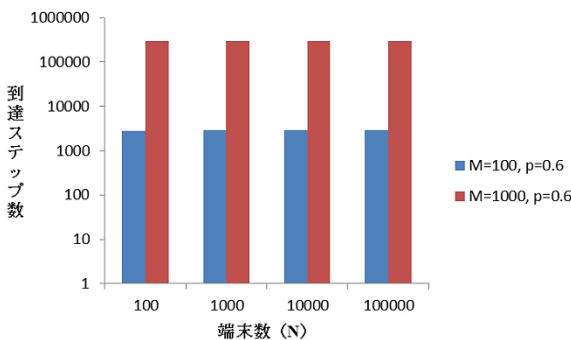


図 5：端末移動のステップ数～ N に関して～

端末数が増加してもステップ数は、ほぼ一定であることが確認できる。これは、 z_M に端末が 1 台でも到達すれば、情報が到達したと見做し、そのステップ数を比較している為である。これにより、通信メッセージが到達するまでの時間は、端末数に依存しないことを確認できた。端末数が増えることで、通信帯域は増えていると考えられる。

5. 移動と情報交換

前章では、人の移動モデルについて説明した。何れかの人が目的のゾーンに辿り着くまでにかかる時間ステップ数についてシミュレーション実験を行った。実際には、人の移動の他に、ゾーン内での情報交換により情報を伝達する。メッセージを交換しリレーされることでより早く情報を伝達できる。

ここでは、前章と同様に、時刻 $t=0$ で、全ての端末が z_1 にあり、他のゾーンに端末が無い状態から始まる情報伝達シミュレーションを行う。ゾーン数は $M=100$ である。

5.1. シミュレーション実験

端末数 $N=10, 100, 1000$ と遷移確率 $p=0.3, 0.6, 0.9$ の、それぞれの条件で各 100 回のシミュレーション実験を行った。送信メッセージ 100 個が、最初の 100 ステップに毎回ゾーン z_1 で発生した時に、全メッセージが z_{100} までに到達するまでの平均時間ステップ数を図 6 に示す。

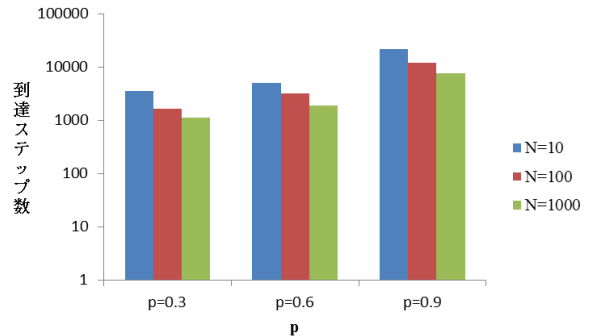


図 6： z_1 から z_{100} まで 100 メッセージを送信するコスト

端末数の増加に伴い、情報伝達にかかるステップ数が減少する傾向を確認できる。また、状態遷移確率に関するパラメータ p に関して、同状態に留まる率の小さい時ほど、情報伝達にかかるステップ数が減少する傾向を確認できる。

6. 考察

人の移動に注目した移動シミュレーションでは、何れかの人が目的のゾーンに辿り着く平均ステップ数を評価した。これは、1 つの情報がゾーン z_1 から送信されゾーン z_M で受信されるまでの時間コストを表している。人の移動と情報交換の両方を用いた情報伝達シミュレーションでは、100 個の情報がゾーン z_1 から送信されゾーン z_M で受信されるまでの時間コストを表している。ただし、メッセージは、1 単位時間経過毎に 1 個ずつ発生するものとした。これらの実験を比較すると、前者の実験結果に 100 単位時間加算すれば、後者の実験結果に一致するはずである。例えばこれらの実験結果では、図 5 の $M=100, p=0.6, N=100$ では、2849 ステップかかっている。これに 100 単位時間加算すると 2949 ステップである。これは、図 6 の $N=100, p=0.6$ の時のステップ数とほぼ等しい。従って、 $M=100, p=0.6, N=100$ では、時間ステップ毎に生成されるメッセージを z_1 から z_M に送信する場合、約 3,000 (≒2849) ステップの時間で送信できると考えられる。換言すると、送信メッセージは、3,000 ステップ遅延して受信される。

今回は、携帯端末のゾーン z_0 のみに存在する場合を初期状態としてシミュレーション実験を行った。実際には、何らかの災害が発生した時点で、各ゾーンに携帯端末が分散して存在する状態が初期状態となる。これらの条件での挙動については今後の課題としたい。

7. まとめ

通信モデルについて検討した。特に端末の移動モデルを構築し、シミュレーション実験により各パラメータの挙動を確認した。確認された主な事項は、

1. 端末が同じゾーンに留まる率 p の増加により、到達にかかるステップ数も増加
2. ゾーン数 M の増加により、到達にかかるステップ数も増加
3. 端末数 N の増加に対し、到達にかかるステップ数は、ほぼ一定

である。ステップ数に関するパラメータは p と M であることが分かった。

今回のシミュレーション実験は、 z_1 から z_M へ向けた情報通信について検討したが、今後は z_2, \dots, z_M から z_1 への被災地域から地域外への通信と、 z_2, \dots, z_M 内での被災地域内情報共有のための通信のシミュレーションを行いたい。更に、携帯端末にメッセージ交換アプリケーションを実装し、実際に人の移動により情報を送受信できることを確認する。その際、各種パラメータをシミュレーション結果から決定し、効率的な情報交換アプリケーションの実現を目指す。

8. 参考文献

- [1] 総務省. 2011. 12. 28. 大規模災害等緊急事態における通信確保の在り方について. http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban02_02000043.html
- [2] 浜口 清, 三浦 龍, 熊谷 博. 電子情報通信学会(編). 電子情報通信学会誌. Vol. 98, No.5, pp.375-380, may 2015. 「命」を繋ぐ通信：耐災害 ICT の研究開発（特集 第5世代移動通信(5G)の最新動向)
- [3] 国立研究開発法人情報通信研究機構. 2013.3.18 大規模災害で孤立した地域を上空からつなぐ！ 小型の無人飛行機を活用した”無線中継システム”を開発. <http://www.nict.go.jp/press/2013/03/18-1.html>
- [4] 漢居 趙, 川崎 宏治, 垣内 洋平. 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.7, pp.643-650, sep 2014. 電波強弱監視に基づく複数無線モジュールの順次投下と環境地図作成を行う小型ロボットの実現