

DTNによる災害時情報共有システムにおける インフライトコンテンツを考慮したコンテンツ制御手法

澁谷 海斗^{1,a)} 小林 亜樹^{2,b)}

概要: 大規模災害時などの劣悪な通信環境において、避難所間の情報共有を図るため DTN アーキテクチャに基づいた災害情報システムについて提案してきた。本システムでは、可搬ストレージを仮想的な通信路とし、非同期型の分散システムを構築する。本システムでの通信は人手を介したものであり、情報伝達には大きな遅延を伴う。そこで本稿では、転送中であるコンテンツ（インフライトコンテンツ）を新たに考慮することで遅延情報を補完し、効率的な情報拡散を実現するコンテンツ制御アルゴリズムについて提案する。

1. はじめに

地震や津波などの広域かつ大規模な災害時においては、迅速な災害状況の把握や避難者の安否確認、避難所の物資不足といった情報共有が不可欠である。しかし、災害時には無線基地局の損壊や通信トラフィックの増大により、既存の通信インフラが機能しない、あるいは十分な通信性能を提供することができない恐れがある [1]。

このような劣悪な環境下での通信の枠組みとして DTN [2], [3] 技術がある。メッセージフェリー方式 [4], [5] では、定期巡回するフェリーノードがメッセージの中継を担うことで、通信途絶ノード間の情報伝達を可能とする。また、DTN と専用回線を組み合わせた方式 [6], [7] では、アドホックネットワークを構成する携帯端末がメッセージの中継を担うことで、被災者の発信したメッセージを通信の拠点となる避難所等へと転送する。これらのように DTN を災害時の情報伝達へと活用する研究は数多く存在する。

筆者らはこれまで、一般の通信路が機能しない通信環境を念頭に、災害時における消費電力を最小とすることを企図し、可搬ストレージ (PS ; Portable Storage) を通信媒体として用いる情報拡散型災害時情報システムについて提案してきた [8]。本システムは、通信拠点となる避難所において DTN ノードを自律分散的に構築する非同期型の分散システムである。避難者によって登録されたコンテンツは、PS に書き込まれ人手で他の避難所へと運搬される。ただし、災害時における安否広告や不足物資の要請などにおいては通信先ノードは明らかでない。そこで、本研究では避難者が発信した公開型の被災情報をシステムが届けられる限り全てのノードに届けることを通信の目的に据える。この通信ではノードからの送出時点には通信先が不明であり、いずれかのノードに到着した時点で通信として成立す

るとい点が一般的な通信路と大きく異なる。

また、人手を介した通信のため避難所間の情報伝達には大きな遅延が伴う。そのため、避難所間で効率的な情報拡散を実現する上では、避難所からの PS 送出時におけるコンテンツ選出が拡散効率において重要となる。従来手法 [8] では、ネットワーク内を転送中であるコンテンツ (以降、インフライトコンテンツ) を考慮していないため、PS 転送時において、無駄なコンテンツの重複転送が生じてしまうといった問題があった。そこで本稿では、過去に観測したコンテンツの送出履歴から、各ノードにおけるコンテンツの存在確率を推定し、遅延情報の補完を行うことで効率的な情報転送を実現するコンテンツ制御手法について提案する。

2. 情報拡散型災害時情報システム

2.1 概要

提案している情報拡散型災害時情報システム (図 1) は、通信途絶地域であるオフライン地域において各避難所を拠点として DTN ノードを構築し、これらの中で情報共有を図るシステムである。システムの立ち上げは避難所などの拠点で運用可能なノートパソコン等を想定し、これを固定ノードとする。避難所間の通信は、PS を移動ノードとして採用し、これを人手によって運搬する*1。PS の運搬は、市井の避難者、救助隊やボランティア活動などのユーザによるものを想定しており、任意個数の PS が運搬者の任意のタイミングで運搬される。システムプログラムと避難者によって登録されたコンテンツの双方が PS に書き込まれ、運搬されることで、データ通信の拠点となるシステムの立ち上げとコンテンツの拡散を同時に実現する。各ノードではコンテンツ情報を管理する Content Database (CDB)、ネットワーク内の固定ノード情報を管理する Network Database (NWDB) を管理している。本システムにおける詳細なシステムモデルについては文献 [8] を参照されたい。

¹ 工学院大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻

² 工学院大学情報学部情報通信工学科

a) shibutani@cc.kogakuin.ac.jp

b) aki@cc.kogakuin.ac.jp

*1 本稿では、固定ノードのことを単に避難所またはノードと呼び、移動ノードのことを単に PS と呼ぶこととする。

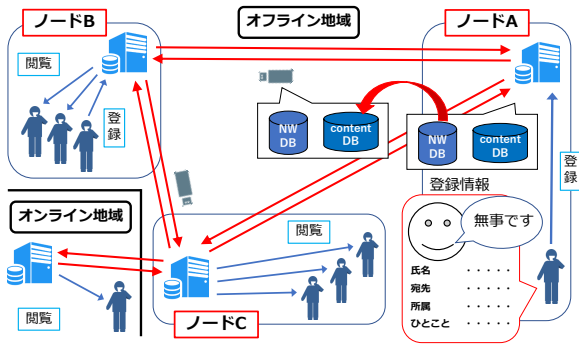


図 1 情報拡散型災害時情報システム

2.2 問題の定式化

本システム全体の目的は、避難者による登録コンテンツを届けられる限り全ての避難所へと届けることである。そこで、あるコンテンツのシステム全参加ノードのうちの到達比率を求め、この全コンテンツ間の平均値を (1) 式で示す拡散率 D (Diffusivity) と定義し、これを最大化することを目的とする。本システムに参加している全てのノード数を N 、システム内の全コンテンツ数を K 、各コンテンツを $c_i (1 \leq i \leq K)$ 、 c_i を保持するノード数を $d(c_i)$ とする。

$$D := \frac{1}{NK} \sum_{i=1}^K d(c_i) \quad (1)$$

本システムで通信を担う PS には容量制約があり、様々な容量制約の下でコンテンツ選出を行う必要がある。加えて、災害時という利用形態により、PS の運搬先ノードは送出時点では確定していない。そのため、可能な限り運搬先ノードが保持していないコンテンツを優先的に PS へと蓄積する必要がある。また各ノードは、ネットワーク全体に関する情報を、到着した PS 内に蓄積された CDB, NWDB のみから観測することとなる。そのため、他ノードの情報は大きな遅延を伴って伝達され、常に最新ではない情報を基にコンテンツの選出を行う必要がある。上記で示した条件の下、目的関数となる拡散率 D の最大化を達成することは、コンテンツ制御手法の定義に依存することとなる。

3. 提案手法

本章では、インフライトコンテンツを考慮したコンテンツ制御手法について定式化を行う。本システムでは、PS 送出時に送出ノードは自身の保持する全コンテンツに対し、拡散期待値となる優先度を求める。そして求めた優先度順に PS 所定の容量までコンテンツの蓄積を行うことで効率的な情報拡散を実現する。本稿で述べるコンテンツ制御手法について次の 3 つの Step に分けて詳細を述べる。

(Step1) PS 送出確率の推定

任意の DTN ノード n から時刻 t_c に PS が送出される際に、 n が保持するあるコンテンツ c_0 に対して優先度を算出することを考える。 n からの PS 送出時には、 n は自身の管理する NWDB を参照し、自身を含めた全観測済みノード間の PS 送出確率を推定する。 n が t_c において観測済みであるノード集合を $m(t_c, n)$ とすると、ノード $i \in m(t_c, n)$ から PS が送出された際に別ノード $j \in m(t_c, n)$ へと到着する確率を $q_{i,j}(t_c, n)$ で示し、(2) 式にて推定できる。

$$q_{i,j}(t_c, n) = \frac{\zeta(d_{i,j})}{\sum_{j \in m(t_c, n)} \zeta(d_{i,j})} \quad (2)$$

$d_{i,j}$ はノード i とノード j 間の地理的な距離 [km] を表す。本稿での $\zeta(\cdot)$ はノード間距離 $d_{i,j}$ に基づく関数であり、距離が比較的近い避難所間では高頻度で PS の運搬が行われるであろうという予測の下、(3) 式にて定義される関数とする。また、 d_{\max} は n が自身を含めた観測済みノード間の最長距離 [km] を示し、(4) 式にて定義される。

$$\zeta(d_{i,j}) := \frac{1 - \delta_{i,j}}{1 + \exp\left(-\frac{d_{\max}}{4} + d_{i,j}\right)} \quad (3)$$

$$d_{\max} := \max\{d_{i,j} | \forall i, \forall j \in m(t_c, n)\} \quad (4)$$

(2) 式によって推定した全観測済みノード間の推定送出確率より、 n は自身から各観測済みノードへの送出確率 $q_{n,j}(t_c, n)$ を用いて (5) 式で表す $\mathbf{q}(t_c, n)$ を生成する。

$$\mathbf{q}(t_c, n) = \{q_{n,j}(t_c, n) | \forall j \in m(t_c, n)\} \quad (5)$$

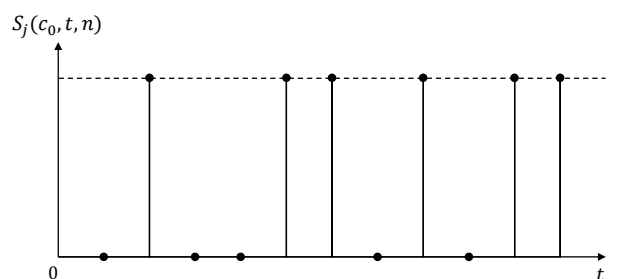
(Step2) コンテンツ存在確率の推定

次に n は各観測済みノード $i \in m(t_c, n)$ に対して、コンテンツ存在確率を推定する。ノード i における時刻 t でのコンテンツ c_0 の存在確率を表す関数を $e_i(c_0, t, n)$ とする。また、1 回の PS 転送における転送遅延時間を Δt で表すと、時刻 t_c に送出された PS は時刻 $t_c + \Delta t$ にあるノードへと到着することとなる。そのため、 $t_c + \Delta t$ における各ノードでの存在確率 $e_i(c_0, t_c + \Delta t, n)$ を推定することで n が未観測である運搬中の情報、つまりインフライトコンテンツを考慮することができる。そこで、 $t_c + \Delta t$ までに、 i に対して各ノードからどの程度 c_0 が転送されるかの確率 (被転送確率) を算出することで、 i における c_0 の存在確率の増加量、つまり $e_i(c_0, t_c + \Delta t, n)$ を推定する。

まず、 $t_c + \Delta t$ までの i に対する、各ノード $j \in m(t_c, n)$ からの被転送確率を算出するために、図 2 に示すような j での PS 送出時にのみ値を持つデルタ超関数の重ね合わせとなる関数 $S_j(c_0, t, n)$ を考える。これは各 PS 送出時刻においてコンテンツ c_0 が送出されるか否かを表す関数となる。実運用においては、 n が j における $S_j(c_0, t, n)$ を観測することは不可能であるため、(6) 式によって近似することとする。厳密には定式化を行うことは可能であるが、本稿では紙面の都合上、近似手法のみについて説明する。

$$\hat{S}_j(c_0, t, n) = f \cdot e_j(c_0, t_c, n) \cdot (1 - D(c_0, t_c, n)) \quad (6)$$

f はノード j に関する最終観測時刻以前の適当な定数時間中の平均送出頻度の一点近似とした上での PS の平均送出頻度である。 $e_j(c_0, t_c, n)$ は、 n が選出時刻 t_c までに観測する j のコンテンツ保持状態を示し、(7) 式で表される。

図 2 送出頻度関数 $S_j(c_0, t, n)$

ここで、 $C_j(t_c, n)$ は時刻 t_c において送出ノード n が観測するノード j の保持するコンテンツ集合を示す。

$$e_j(c_0, t_c, n) = \begin{cases} 1 & (c_0 \in C_j(t_c, n)) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (7)$$

また、 $D(c_0, t_c, n)$ は選出時刻 t_c におけるコンテンツ c_0 の全観測済みノードでの到達比率を示し、(8) 式で定義される。 $M(c_0, t_c, n) \subset m(t_c, n)$ は、 n が観測する t_c において c_0 を保持するノード集合を示す。これは、本手法はネットワーク内での拡散度合いが低いコンテンツが PS へと蓄積されやすくなるため、送出時における PS へのコンテンツ蓄積確率を現時点で入手できる最新のコンテンツ拡散率 $D(c_0, t_c, n)$ により近似するという発想に基づいている。

$$D(c_0, t_c, n) := \frac{|M(c_0, t_c, n)|}{|m(t_c, n)|} \quad (8)$$

これらを用いて、送出ノード n は各観測済みノード j の送出頻度関数を (6) 式とし近似することができる。

次にコンテンツ存在確率の増加量を求める時間区間を考える。本システムでは各ノードの情報は、PS の運搬により大きな伝送遅延を伴って伝達される。そこで選出時刻 t_c において、 n は最新の情報を観測しているとは限らず、この遅延情報を考慮する必要がある。 n が観測する、ノード i に関する情報の最終更新時刻を $t_i(n)$ とする。すると、 $(t_i(n), t_c + \Delta t]$ のコンテンツ存在確率の増加率を求める必要がある。この時間区間に到着するコンテンツは、図 3 に示すように $(t_i(n) - \Delta t, t_c]$ に送出されたものであり、この時間区間に送出されたコンテンツが送出ノード n が未観測である遅延情報となり、本システムにおけるインフライトコンテンツとなる。そのため、 $(t_i(n) - \Delta t, t_c]$ 区間において j から c_0 が送出される回数を求める必要があり、それは (9) 式によって求められる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_j(c_0, t - \tau, n) w(\tau) d\tau \quad (9)$$

$w(\tau)$ は (10) 式で定義される窓関数であり、これにより $(t_i(n) - \Delta t, t_c]$ における c_0 の送出期待回数を求める。

$$w(\tau) := \begin{cases} 1 & (t_i(n) - \Delta t < \tau \leq t_c) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (10)$$

(9) 式で求めた送出期待回数に、ノード間の PS 推定送出確率 $q_{j,i}(t_c, n)$ を掛け合わせたものが、 $(t_i(n), t_c + \Delta t]$ において、ノード j から i へとコンテンツ c_0 が転送される被転送確率 $p_{j,i}(c_0, n)$ となり、(11) 式で求められる。

$$p_{j,i}(c_0, n) = q_{j,i}(t_c, n) \int_{-\infty}^{\infty} S_j(c_0, t - \tau, n) w(\tau) d\tau \quad (11)$$

また、 $p_{j,i}(c_0, n)$ の j に関する総和が $(t_i(n), t_c + \Delta t]$ において、 i に対してネットワーク全体からコンテンツ c_0



図 3 コンテンツ送出時間と到着時間の関係

が転送される確率となる。つまり、到着予想時刻 $t_c + \Delta t$ までに増加する i のコンテンツ存在確率となる。これらのことから $t_c + \Delta t$ 時点における i のコンテンツ存在確率 $e_i(c_0, t_c + \Delta t, n)$ は (12) 式で示すことができる。

$$e_i(c_0, t_c + \Delta t, n) = \begin{cases} 1 & (c_0 \in C_i(t_c, n)) \\ \sum_{j \in m(t_c, n)} p_{j,i}(c_0, n) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (12)$$

送出ノード n は全観測済みノード $\forall i \in m(t_c, n)$ に対してコンテンツ存在確率 $e_i(c_0, t_c + \Delta t, n)$ を (12) 式より推定し、(13) 式で表される $e(c_0, t_c + \Delta t, n)$ を生成する。

$$e(c_0, t_c + \Delta t, n) = \{e_i(c_0, t_c + \Delta t, n) | \forall i \in m(t_c, n)\} \quad (13)$$

(Step3) 優先度の算出

生成した $q(t_c, n)$, $e(c_0, t_c, n)$ より、ノード n における選出時刻 t_c でのコンテンツ c_0 の優先度 $P(c_0, t_c, n)$ を、(14) 式により求める。ノード n からの PS 送出時には、 n は自身の保持する全コンテンツ $c \in C_n(t_c, n)$ に対して優先度 $P(c, t_c, n)$ を求め、その降順に所定の容量まで書き込みを行い、送出する。本手法は、PS の推定送出確率 $q(t_c, n)$ とコンテンツ存在確率 $e(c_0, t_c, n)$ より求めることから、高確率で送出すると推定されるノードでの存在確率が低いコンテンツを優先的に選出する手法となる。

$$P(c_0, t_c, n) = 1 - q(t_c, n) \cdot e(c_0, t_c + \Delta t, n) \quad (14)$$

4. 評価

4.1 概要

提案手法の有効性をシミュレーションにより評価する。提案手法にて用いる転送遅延時間 Δt は、PS 送出時点では運搬先が不明確であるため、実運用においては知ることはできない。しかし、本評価では送出ノードが PS の運搬にかかる所要時間を既知であるとし、 Δt を設定した。

また、比較手法には比較的単純な選出手法として一様乱数に基づいて選出コンテンツを決定するランダム手法とコンテンツ登録時刻に基づいて登録からの経過時間の短いコンテンツを優先的に選出する MRP (Most Recently Posted) 手法、従来手法としてネットワーク内でのコンテンツの拡散度合いに基づく拡散率推定値手法 [9] と拡散率と避難所間距離に基づく送出確率の推定により選出コンテンツを決定する事前確率推定値手法 [10] を用いる。また、各ノードでの観測情報が同期的であるとした場合の事前確率推定値手法についても比較対象とする。

表 1 シミュレーションパラメータ

Parameter	Values
Number of nodes	41
Number of contents	8200
PS capacity	2, 4, 8, 16, 32 GB
Content size	100 MB
Number of transfers	2050
Simulation time	[0, 5000] min
New content insertion	Poisson distribution when [0, 4500] min
Contents transferring	Poisson distribution when [180, 5000] min
Moving speed of carrier	Uniform distribution within [4, 5] km/h

4.2 シミュレーション条件

本評価では、国土交通省国土地理院の提供する市町村別指定緊急避難所データ [11] から、熊本県南阿蘇村の避難所データを用いる。1つの避難所に1つの通信ノードの構築を想定し、このネットワークを基に評価を行う。避難所間のPSの運搬は、提案手法にて推定する避難所間の送出確率と同様の確率分布に従って運搬が行われるものとする。

実運用時におけるPSには容量制約があるため、これを考慮し上限値を設ける。しかし、PS内に保持するシステムプログラムやNWDB, CDBの容量はコンテンツサイズに比べ、比較的小さいと考えられるため考慮しない。また、固定ノードにおける容量制約についても考慮しないものとする。評価に用いたシミュレーション諸元を表1に示す。

4.3 評価項目

評価項目には、2.2節にて定義した拡散率 D に加え、転送効率を示す指標である平均実効運搬率 E (Mean Effective Transfer Ratio) を用いる。平均実効運搬率は(15)式にて定義され、PSの総転送回数を T 、 j 番目のPS転送における運搬先ノードが保持するコンテンツ集合を S_j 、PS内に蓄積されているコンテンツ集合を A_j で示す。全PS転送における転送効率の平均値を示す指標となる。

$$E := \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T \left(1 - \frac{|S_j \cap A_j|}{|S_j|} \right) \quad (15)$$

4.4 結果と考察

シミュレーション終了時刻における拡散率に対する平均実効運搬率を図4に示す。同図より、PS容量が16GB以上と高容量時において、提案手法が従来手法に対し高い値を示すことが確認された。しかし、4GB以下の低容量時においては、拡散率・平均実効運搬率ともに拡散率推定値手法および事前確率推定値手法などの従来手法とほぼ同等の値を示し、提案手法による効率向上があまり確認できなかった。これは、PS容量がネットワーク全体のコンテンツ総数に対し極端に小さい状況下では、PSへと選出できる

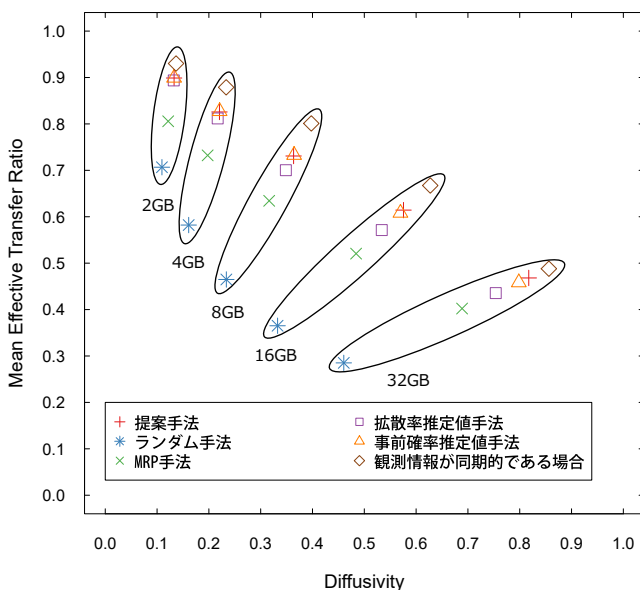


図4 拡散率に対する平均実効運搬率

コンテンツが少なく、本手法の効果があまり見込めなかったためであると考えられる。これらのことから本稿で提案したインフライトコンテンツを考慮した選出手法では、比較的選出できるコンテンツ幅の多い高PS容量時において有効性を示すことができ、さらにPS容量が大きい状況下などでは拡散性能の向上が期待できると考えられる。

5. おわりに

本稿では、到着予想時刻におけるコンテンツ存在確率を推定することで、インフライトコンテンツを考慮し重複したコンテンツの送出を抑制する手法について提案した。シミュレーション評価により、高容量時において拡散効率・転送効率ともに従来手法に対し、有効性を示すことが確認された。これらのことから、提案手法は高PS容量時などの選出コンテンツ幅が大きい状況下で、拡散性能の向上が期待できると考えられる。転送遅延時間 Δt をどのように推定するか、コンテンツ存在確率を推定する時間区間の変化による有効性への影響の検証などは今後の課題である。

参考文献

- [1] 平成23年度版情報通信白書東日本大震災における情報通信の状況, 総務省(オンライン), 入手先 (<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h23/pdf/n0010000.pdf>) (参照2019-08-02).
- [2] Fall, K.: A delay-tolerant network architecture for challenged internets, *Proceedings of the 2003 conference on Applications*, pp. 27–34 (2003).
- [3] 鶴正人, 内田真人, 滝根哲哉, 永田晃, 松田崇弘, 巳波弘佳, 山村新也: DTN技術の現状と展望, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, 2011(16), pp. 57–68 (2011).
- [4] 畑中健作, 松浦知史, 猪俣敦夫, 藤川和利: 災害救助活動を想定したメッセージフェリーの動的経路決定手法, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 113, No. 398, MoNA2013-50, pp. 7–12 (2014).
- [5] Zhao, W., Ammar, M.: Message Ferrying: Proactive Routing in Highly-partitioned Wireless Ad Hoc Networks, *In Proceedings of Ninth IEEE Workshop on Future Trends*, pp. 308–314 (2003).
- [6] 陶山優一, 横田裕介, 大久保英嗣: 移動端末を用いた災害情報システムにおけるDTNルーティング手法, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 108, No. 399, USN2008-82, pp. 117–121 (2009).
- [7] 河本美穂, 重安哲也: 災害発生時におけるDTN手法を導入した効果的な被災情報収集システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 2, pp. 643–656 (2016).
- [8] 澁谷海斗, 小林亜樹: 情報拡散型災害時情報システムにおける運搬先予測に関する性能評価, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 119, No. 29, NS2019-29, pp. 51–56 (2019).
- [9] 井上碧, 小林亜樹: 情報拡散型災害時情報システムにおける可搬ストレージ通信, 2017年電子情報通信学会総合大会, 通信講演論文集2, B-7-45, p. 138 (2017).
- [10] 澁谷海斗, 小林亜樹: DTNによる災害時情報共有システムにおける地理的要件を考慮した性能評価, 2019年電子情報通信学会総合大会, 通信講演論文集2, B-7-1, p. 78 (2019).
- [11] 指定緊急避難場所データ 市町村別公開日・最終更新日・ダウンロード一覧, 国土交通省国土地理院(オンライン), 入手先 (<https://hinan.gsi.go.jp/hinanjocjp/hinanbasho/koukaidate.html>) (参照2019-08-02).