

D2D 型 SNS を用いた情報共有システムに対する階層化グラフに基づく障害回避技術

Failure Avoidance Technology Based on Hierarchical Graphs for Information Sharing with D2D-based SNS



橋 拓至 (Takuji TACHIBANA, Dr. Eng.)
福井大学 学術研究院 工学系部門 教授

(Professor, University of Fukui, Faculty of Engineering)

電子情報通信学会 日本オペレーションズ・リサーチ学会 IEEE

受賞：コミュニケーションシステム研究会委員長賞 (2023 年) 国際会議 ICETC2021 Best Poster Award (2021 年) ネットワークシステム研究賞 (2015 年、2012 年、2006 年) 第 22 回テレコムシステム技術賞 (2007 年) 他

研究専門分野：情報ネットワーク 通信工学

あらまし

D2D 型 SNS は、インターネットやアクセスポイントなどの通信インフラが一切不要であるため、近年多発している自然災害時などの緊急時用情報共有システムとして広く利用されることが期待されている。しかし、このような緊急時の情報共有システムで利用するには耐障害性・ロバスト性の向上が必須であり、障害によるシステム停止の回避が最重要課題である。本研究課題では、D2D 型 SNS を利用した情報共有システムに対する障害回避技術を確立する。障害回避技術を確立するために、まず 2 つの異なるネットワークで構成された本システムを一階層の階層構造のグラフでモデル化する。それから、構築した一階層グラフを用いて耐障害性の性能評価指標を導出する。定式化する最適化問題では、適切な友達申請先を導出することができる。さらに、D2D 通信の性能を向上させるために無線中継機器の利用も想定し、最適化問題を拡張する。拡張した最適化問題の解を導出し、無線中継機器の適切な導入位置と導入数を決定する。

1. 研究の目的

本研究では、D2D 型 SNS を利用した情報共有システムに対する障害回避技術を確立する。障害回避技術を確立するために、2 つの異なるネットワークで構成された本システムを、図 1 に示すように一階層構造のグラフでモデル化する。それから、構築した一階層グラフを用いて耐障害性の性能評価指標を導出する。なお、構築する一階層グラフは両階層の接続状況を同時に考慮することができる。

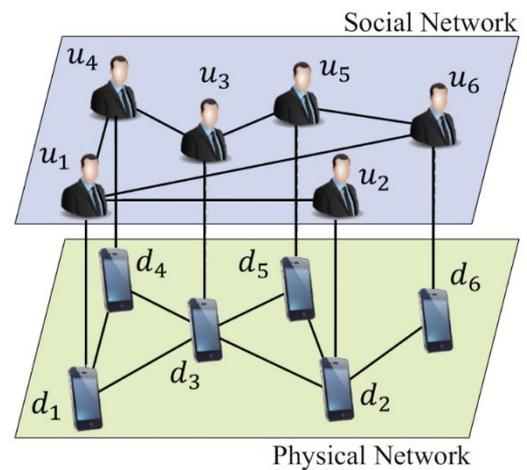


図 1 D2D 型 SNS のネットワーク構成

一階層グラフに対して導出した耐障害性の性能指標に関する最適化問題を定式化する。定式化する最適化問題では、適切な友達申請先を導出することができる。さらに、D2D 通信の性能を向上させるために無線中継機器の利用も想定し、最適化問題を拡張する。拡張した最適化問題の解を導出し、無線中継機器の適切な導入位置と導入数を決定する。

最適化問題の求解を高速化するためにヒューリスティックアルゴリズム (障害回避技術) も確立する。確立したヒューリスティックアルゴリズムの性能はシミュレーションによって評価し、ユーザの移動や友達申請の成功確率の影響を詳細に調査する。さらに、構築したヒューリスティックアルゴリズム (障害回避技術) を導入した情報共有システム用アプリの設計・開発に取り組む。

D2D 型 SNS を用いた情報共有システムに対する階層化グラフに基づく障害回避技術

Failure Avoidance Technology Based on Hierarchical Graphs for Information Sharing with D2D-based SNS

2. 研究の背景

ソーシャルネットワークサービス(SNS)の普及と携帯端末の進歩によって、携帯端末間で直接データをやり取りする Device-to-Device (D2D) 通信を利用した SNS が開発・利用されている[1]。このような D2D 型 SNS として、現在 FireChat [2] や AirTalk [3] が運用されている。これらのアプリは、災害時の情報伝達手段としての利用も期待されている。D2D 型 SNS は、D2D 通信を行う物理網と SNS によってユーザが交流するソーシャルネットワークによって構成される。この2つの異なるネットワークは異なるネットワーク構造となっている。D2D 型 SNS の通信性能は2つの異なるネットワーク構成に大きく依存し、物理網での端末配置とソーシャルネットワークでの交友関係によって通信性能が変化する。

この D2D 型 SNS は、インターネットやアクセスポイントなどの通信インフラが一切不要であるため、近年多発している自然災害時などの緊急時用情報共有システムとして広く利用されることが期待されている。しかし、このような緊急時の情報共有システムで利用するには耐障害性・ロバスト性の向上が必須であり、障害によるシステム停止の回避が最重要課題である。

このような D2D 型 SNS では、SNS に関するユーザ間の接続状況と D2D 通信における端末間の接続状況がシステムの運用状況および通信性能に大きく影響する。特に D2D 型 SNS を利用した情報共有システムでは、システムの運用停止を回避するために SNS でのユーザ間接続(友達関係)状況と D2D 通信上での端末間接続状況を同時に改善しなければならない。図2は D2D 型 SNS における障害発生例を示している。この図に示されるように、耐障害性・ロバスト性の向上による障害回避の実現が容易ではない。D2D 型 SNS では一方のネットワークで発生した障害がもう一方のネットワークにも影響する。結果として障害が時間とともに両ネットワークを連鎖して大規模化するカスケード障害が発生する[4]。特に、D2D 型 SNS は災害時での有効利用も期待されているため、障害の影響を低減することが期待される。

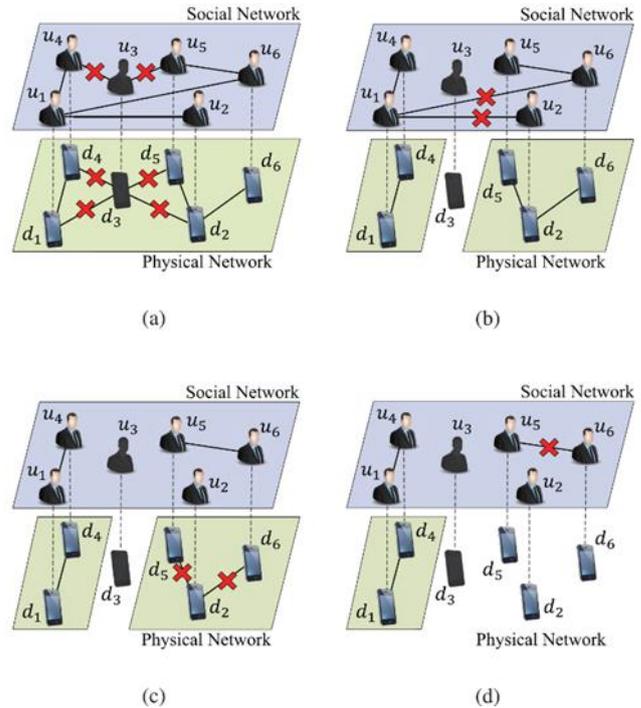


図2 D2D 型 SNS を用いた情報共有システムの障害発生

D2D 型 SNS の障害に対する性能指標であるノードの存続率 ψ は、通信時間が平均 λ の指数分布に従う場合、上限と下限は以下の式で与えられる。

$$\psi \leq 1 - (1 - p_f - s_\infty)e^{-\lambda T_{max}} - p_f$$

$$\psi \geq s_\infty + (1 - p_f - s_\infty)(1 - e^{-\lambda})$$

ここで、 T_{max} は障害発生後にネットワーク構成が安定するまでの時間を表し、 p_f は初期障害ノード割合を示している。

3. 研究の方法

本研究では、D2D 型 SNS を用いた情報共有システムに対して、階層化グラフに基づく2つの障害回避技術を提案する。

提案法では、D2D 型 SNS を用いた情報共有システムに対して、発生した障害による影響を表す指標としてノード存続率 ψ を定義する。このノード存続率 ψ は、上記の式の上限を利用する。情報共有システムのノード存続率が高く(低く)なると、情報共有の性能が高く(低く)なる。

以下ではまず、D2D 型 SNS を用いた情報共有シス

D2D 型 SNS を用いた情報共有システムに対する階層化グラフに基づく障害回避技術

Failure Avoidance Technology Based on Hierarchical Graphs for Information Sharing with D2D-based SNS

テムにおける障害回避技術として、階層化グラフに基づく最適中継装置配置法を確立する [5]。

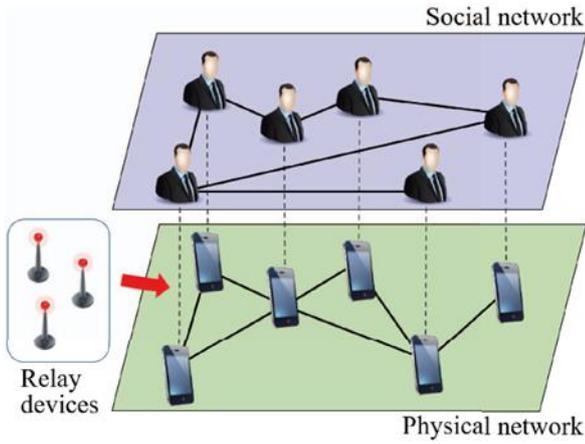


図 3 中継装置の追加配置による障害回避

図 3 は、以下で検討する中継装置問題を示している。以下では、 N 人のユーザ、すなわち N 台の中継装置が情報共有システムに参加している場合を考える。ここで、 N_{max}^{relay} は情報共有システムに追加する最大中継装置数を示している。このとき、以下の最適化問題を定式化する。

$$\max_{x_i^{relay}, y_i^{relay}} 1 - (1 - p_f - s_{\infty})e^{-\lambda T_{max}} - p_f$$

subject to:

$$\sum_i a_i^{relay} \leq N_{max}^{relay}$$

$$c_i^{relay} = 1$$

この最適化問題において、 $(x_i^{relay}, y_i^{relay})$ は配置する i 台目の中継装置を配置する座標を示しており、 c_i^{relay} は追加した中継装置は 1 台以上の端末と接続されている場合に 1 の値をとる。

提案法では、本最適化問題の解を発見的アルゴリズムによって高速に導出する。図 4 は、メインアルゴリズムを示している。このメインアルゴリズム内では、図 5 に示すように各ノードが順に処理を実行し、ノード密度が少ない場所に中継装置を配置する。

次に、仮想友人関係生成法を提案する [6]。本方式では、障害発生時のノード存続率 ψ が向上するように、SNS 上に仮の友人関係を一時的に追加する。図 6 は、生成した仮想友人関係が発生した障害に与える影響を示している。この図に示すように、仮想友人関係

を追加することで、ノード存続率 ψ が向上する。

ここで、 A_{max} は情報共有システムに追加する最大仮想友人関係数を示している。このとき、以下の最適化問題を定式化する。

$$\max_{a_{ij}^s} 1 - (1 - p_f - s_{\infty})e^{-\lambda T_{max}} - p_f$$

subject to:

$$\sum_i \sum_j a_{ij}^s \leq A_{max}$$

この最適化問題において、 a_{ij}^s はユーザ i とユーザ j の間に仮想友人関係を追加した場合に 1 の値をとる。

提案法では、本最適化問題の解を発見的アルゴリズムによって高速に導出する。図 7 は、メインアルゴリズムを示しており、ノード次数を考慮して仮想友人関係を生成する。

Algorithm 1: Main algorithm

```

1 Input :  $T_h, L$ 
2 Output :  $x_j^{relay}, y_j^{relay}$ 
3 A device  $d_i$  is selected as target device  $d_i$ 
4 while  $\sum_i a_i^{relay} \leq N_{max}^{relay}$  do
5   if  $r_i = 0$  then
6      $r_i = 1$ 
7   else
8      $T_h = T_h - L$ 
9    $C = 0, D = 0$ 
10  for  $j = 1$  to  $N$  do
11    if  $a_{ij}^d = 1$  then
12       $C = C + 1$ 
13       $R_j = DRC(d_j)$  /*Node degree is derived in Algorithm 2*/
14      if  $R_j \geq T_h$  then
15         $D = D + 1$ 
16   $D_i = D/C$ 
17  if  $D_i \geq T_h$  then
18     $a_i^{relay} = 1$ 
19    The position of the  $i$ th relay device is determined.
20   $d_i$  randomly selects  $d_j$  as the next target device among devices with  $a_{ij}^d = 1$ 
21 End

```

図 4 最適中継装置配置法に対する発見的アルゴリズム (一部)

D2D 型 SNS を用いた情報共有システムに対する階層化グラフに基づく障害回避技術

Failure Avoidance Technology Based on Hierarchical Graphs for Information Sharing with D2D-based SNS

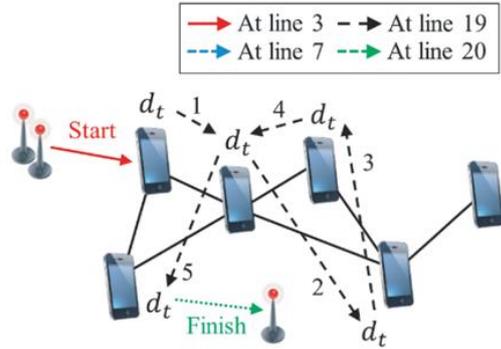
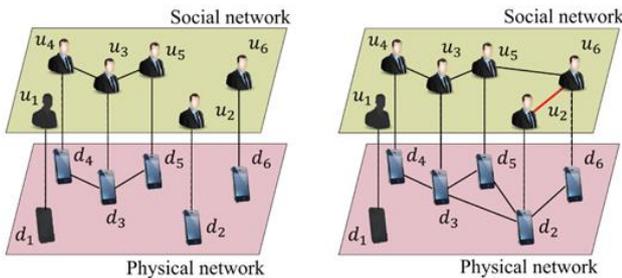


図5 各ノードにおけるアルゴリズムの実行



(a) Without a virtual temporal friendship.

(b) With a virtual temporal friendship.

図6 仮想友人関係が情報共有システムに与える影響

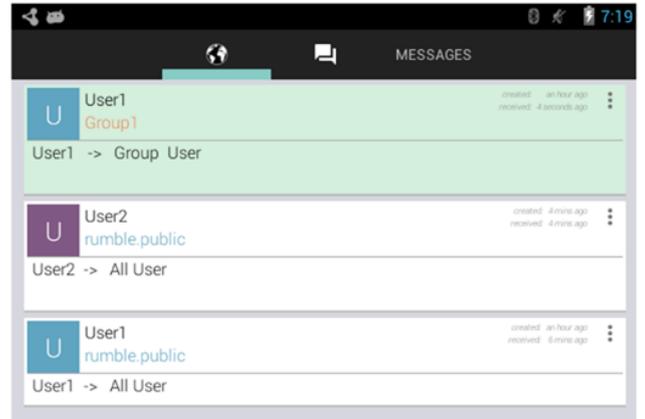


図8 D2D 型 SNS に基づく情報共有システムの開発した画面

最後に、D2D 型 SNS を用いた情報共有システムを実現するアプリを開発する。図8はオープンソース Ramble を用いて開発した利用画面を示している。本アプリによって、D2D 型 SNS によってユーザ間での情報共有が可能になる。本アプリでは、障害回避技術としてグループ外ユーザ中継機能を実装する。本機能では、使用する3つの異なる方式としてランダム選択方式、単一ユーザ選択方式、受信履歴選択方式のいずれかを利用する。図9は、グループ外ユーザ中継機能の設定画面を示しており、ランダム選択方式、単一ユーザ選択方式、受信履歴選択方式で使用するパラメータを設定できる。実装するグループ外ユーザ中継機能によって、メッセージの送信先に指定された特定グループに所属していないユーザにメッセージを転送することが可能になり、メッセージの到達率を向上させてノード存続率 ψ を向上させる。

Algorithm 1: Main algorithm

```

1 Input :  $T_h, L$ 
2 Output :  $x_j^{relay}, y_j^{relay}$ 
3 A device  $d_i$  is selected as target device  $d_t$ 
4 while  $\sum_i a_i^{relay} \leq N_{max}^{relay}$  do
5   if  $r_i = 0$  then
6      $r_i = 1$ 
7   else
8      $T_h = T_h - L$ 
9      $C = 0, D = 0$ 
10    for  $j = 1$  to  $N$  do
11      if  $s_{ij}^d = 1$  then
12         $C = C + 1$ 
13         $R_j = DRC(d_j)$  /*Node degree is derived in Algorithm 2*/
14        if  $R_j \geq T_h$  then
15           $D = D + 1$ 
16     $D_i = D/C$ 
17    if  $D_i \geq T_h$  then
18       $a_i^{relay} = 1$ 
19      The position of the  $i$ th relay device is determined.
20     $d_i$  randomly selects  $d_j$  as the next target device among devices with  $s_{ij}^d = 1$ 
21 End

```

図7 仮想友人関係生成法に対する発見的アルゴリズム (一部)

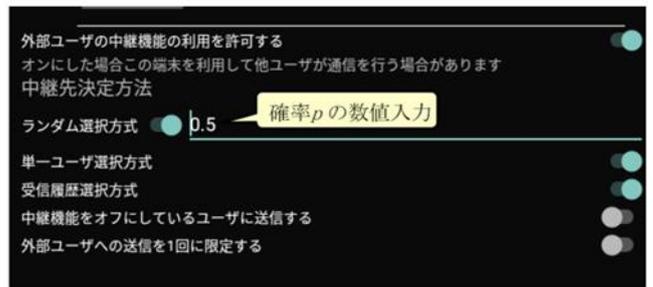


図9 グループ外ユーザ中継機能の設定画面

D2D 型 SNS を用いた情報共有システムに対する階層化グラフに基づく障害回避技術

Failure Avoidance Technology Based on Hierarchical Graphs for Information Sharing with D2D-based SNS

4. 数値例

本章では、提案する最適中継装置配置法と仮想友人関係生成法の性能をシミュレーションで評価する。さらに、情報共有システムを実現する開発アプリの実験結果を示す。

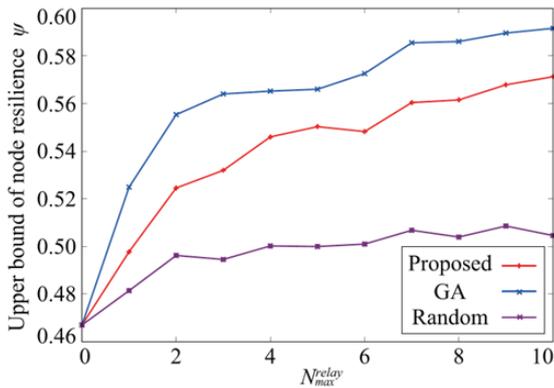
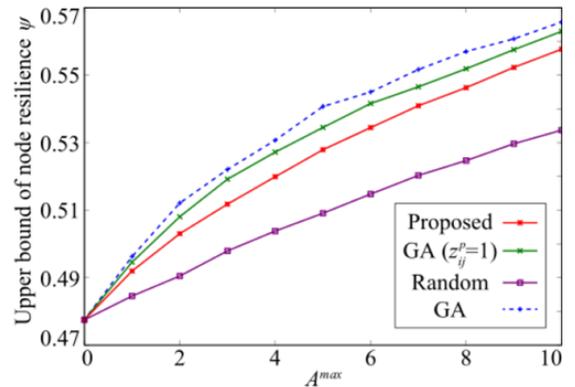


図 10 最適中継装置配置法に対する中継装置の追加数に対するノード存続率の変化

図 10 は、配置する中継装置数が変化した場合の最適中継装置配置法のノード存続率を示している。また、性能比較のために GA 方式とランダム方式の結果も示している。この図から、配置可能な中継装置数が増加するとノード存続率が増加することがわかる。これは、階層化グラフ内のリンク数が増加するためである。このグラフから、最適化問題の解を遺伝的アルゴリズム (GA) で導出する方式が、最もノード存続率が高くなるのがわかる。これは、ネットワークの全情報を把握できる最適化問題の解を導出しているためである。提案法は図 8 に示すように、自律分散的に、各ノードが周囲の情報だけを用いて最適化問題の解を導出していることになるため、GA 方式よりもノード存続率が低くなる。しかし、ランダム方式よりも提案法は性能が高く、また GA 方式の実運用は不可能であることから、実環境での利用を踏まえると提案法が有効であることがわかる。

図 11 は、生成可能な仮想友人関係数が増変した場合の仮想友人関係生成法のノード存続率を示している。また、性能比較のために 2 つの GA 方式とランダム方式の結果も示している。この図から、生成可能な仮想

友人関係数が増加するとノード存続率が増加することがわかる。これは、図 10 の中継装置の場合と同様に、階層化グラフ内のリンク数が増加するためである。また、この図では 2 つの GA 方式の性能が有効であることがわかる。この 2 つの GA 方式のうち、提案方式と状況が類似している GA ($z_{ij}^p = 1$) 方式はやや存続率が低い結果となっている。提案方式については、ランダム方式と比べると著しく存続率が高く、GA ($z_{ij}^p = 1$) 方式の存続率とも比較的近い値になっていることがわかる。提案方式では最適化問題の解を自律分散処理で導出しているにもかかわらず、ノード存続率の向上に大きく貢献している。以上の結果から、実環境での利



用を踏まえると提案法が有効であることがわかる。

図 11 仮想友人関係生成法に対する仮想友人関係の追加数に対するノード存続率の変化



図 12 開発したアプリを用いて構築した実験環境

D2D 型 SNS を用いた情報共有システムに対する階層化グラフに基づく障害回避技術

Failure Avoidance Technology Based on Hierarchical Graphs for Information Sharing with D2D-based SNS

表 1 開発したアプリの実験結果

	ランダム			単一 ユーザ	受信 履歴
	0.3	0.5	0.7		
d_2 の受信割合	0.40	0.55	0.79	0.32	1.00
d_3 の受信割合	0.29	0.47	0.72	0.28	1.00
d_4 の受信割合	0.39	0.40	0.73	0.40	0.00
d_5 の受信割合 (到達率)	0.40	0.55	0.79	0.32	1.00
平均転送回数	1.11	1.42	2.26	1.00	2.00
未送信割合	0.25	0.14	0.03	0.00	0.00

表 1 は、図 12 に示した実験環境で実施したグループ外ユーザ中継機能に対する実験結果を示している。本実験では FFF-TAB7 Android タブレット 7 型 (ストレージ 32 GB、Android バージョン 9.0) を利用し、D2D 型 SNS に基づく情報共有システムをインストールして Bluetooth によって D2D 通信を行う。この実験環境では、 d_1 と d_5 が同一グループに所属し、 d_2 , d_3 , d_4 は別のグループに所属している。このとき、 d_1 が所属グループ向けにメッセージを送信し、グループ内の d_5 がメッセージを受信すると伝送成功となる。本実験では、 d_1 からグループ内ユーザ d_5 へメッセージを 3 秒間隔で 100 回自動送信し、 d_5 へのメッセージ到達率や d_2 , d_3 , d_4 のメッセージ受信割合、平均転送回数、未送信割合を評価する。なお本実験は端末の位置は固定したままで実行している。

この表から、ランダム選択方式で確率を変化させると、各端末のメッセージ受信割合が変化していることがわかる。メッセージ到達率を示す d_5 の受信割合は d_2 の受信割合と同じとなり、 d_3 と d_4 に対する受信割合の増加はメッセージの冗長な転送に繋がる。単一ユーザ選択方式では必ずユーザにメッセージを転送するため、平均転送回数は 1 で未送信割合は 0 となる。本方式はメッセージの無駄な転送は回避できるが、メッセージ転送率が増加しにくい傾向にある。最後の受信履歴選択方式では、受信履歴に基づき、 d_5 のメッセージを中継した経験のある d_2 と d_3 にメッセージが転送される。それゆえ、平均転送回数は 2 となり、未送信割合が 0 となる。 d_5 の受信割合が 1.0 であることから、本方式がメッセージ到達率の増加に最も有効であることがわかる。

5. 将来展望

災害が多い日本では、今まで以上に、SNS を活用した情報共有に対する期待が大きくなることが予想される。端末間で直接データをやり取りする D2D 通信は、通信インフラが不要なため、災害発生時に有効となる。本研究課題で取り組んだ D2D 型 SNS に基づく情報共有システムを災害時に有効利用してもらうためには、日常的に使用するアプリの機能に組み込むことが期待されるため、日常的に利用するユースケースを踏まえたアプリの改良が必要となる。今後は、障害回避法として提案した最適中継装置配置法と仮想友人関係生成法をアプリに導入したうえで、日常から使用できるアプリへ改良し、災害発生時などの情報共有に貢献したいと考えている。

おわりに

本研究課題では、D2D 型 SNS を利用した情報共有システムに対する障害回避技術として、最適中継装置配置法と仮想友人関係生成法を提案し、数値例で各方式の有効性を調査した。また、D2D 型 SNS を用いた情報共有システムのアプリを開発した。本アプリにはグループ外のユーザにもメッセージを送信する障害回避技術を実装し、その有効性を実験で調査した。これらの結果から、本研究開発で確立した各方式、アプリは、それぞれ D2D 型 SNS の障害回避技術として有効であることがわかった。

参考文献

- [1] Y. Zhang, E. Pan, L. Song, W. Saad, Z. Dawy, and Z. Han, "Social Network Aware Device-to-Device Communication in Wireless Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 14, no. 1, pp. 177–190, Jan. 2015.
- [2] FireChat, <https://www.opengarden.com/firechat.html>.
- [3] AirTalk, <http://airtalk.off-line.co.jp/>.
- [4] S. V. Buldyrev, R. Parshani, G. Paul, H. E. Stanley, and S. Havlin, "Catastrophic Cascade of

D2D 型 SNS を用いた情報共有システムに対する階層化グラフに基づく障害回避技術

Failure Avoidance Technology Based on Hierarchical Graphs for Information Sharing with D2D-based SNS

- Failures in Interdependent Networks,” *Nature*, vol. 464, no. 7291, pp. 1025–1028, Apr. 2010.
- [5] H. Yokoi and T. Tachibana, “Autonomous Relay Device Placement Algorithm for Avoiding Cascading Failure in D2D-Based Social Networking Service,” *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E104-D, no. 5, pp. 597-605, May 2021.
- [6] H. Yokoi and T. Tachibana, “Autonomous Relay Device Placement Algorithm for Avoiding Cascading Failure in D2D-Based Social Networking Service,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E105-B, no. 4, pp. 379-387, Apr. 2022.
- [7] 岡田 空, 橘 拓至, “D2D 型 SNS における中継先選択方式の提案と実装評価,” *信学技報*, vol. 120, no. 413, NS2020-149, pp. 155-160, Mar. 2021.

この研究は、令和元年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、令和 2 ～ 4 年度に実施されたものです。