

Android 端末を対象にしたマルチホップ通信可能なアドホック D2D 通信基盤の設計と実装

生出 拓馬^{1,2,a)} 小川 絢也¹ 阿部 亨^{1,3,b)} 菅沼 拓夫^{1,3,c)}

概要：スマートフォンをはじめとする小型携帯端末の高機能化および普及に伴って、それらを用いた所有者間のコミュニケーションや情報共有の機会が増加している。特に、それらの端末のみで構成されるインフラレスな D2D 通信基盤は帯域効率等の面で優れることが知られているため、従来のインフラとの融合が模索されている。しかし、D2D 通信用プロトコルでは効率的なマルチホップ通信が困難であるため、従来の D2D 通信基盤ではプロトコルや端末 OS の改変を前提とするものが多い。そこで、本研究では Android 端末を対象とし、Wi-Fi Direct と Wi-Fi を併用したツリー型構造化 D2D 通信基盤を提案する。提案基盤は、一般の Android 4.0 以上の端末での利用を想定しており、事前知識が不要でアドホックなネットワークを即時的に構築することが可能である。本稿では、提案基盤の設計および実端末上への試作基盤の実装を通して、提案基盤の実現可能性について示した。また、動作確認実験を通してホップ数や端末性能が与える通信遅延や安定性について考察した。

1. はじめに

スマートフォンをはじめとする小型携帯端末の高機能化および普及に伴って、それらの端末から収集されるセンサーデータの利活用が進められている [1-3]。特に、近年では利用者の持つ端末資源の有効利用を目的として、利用者や利用者の持つ端末をシステムの構成要素に含めた People-centric networking paradigm [4,5] の概念に基づき、利用者が能動的または受動的にデータの提供者や中継者の役割を担うサービスモデルに関する研究が行われている。そこで、我々はこれまでに、データの利用者と提供者の間の“契約”概念に基いてデータの公開設定を柔軟に制御可能なセンサー型アプリケーション構築基盤 COSAP (Contract-Oriented Sensor-based Application Platform) に関する研究開発を進めている [6,7]。COSAP はインフラレスなデータ流通基盤であり、利用者間で構築される P2P ネットワークに参加することで自由なセンサーデータの流通が可能になる。しかし、P2P ネットワークを構成するために必要な利用者の持つ端末同士を接続する通信基盤に関する検討はこれまで

進められていない。

携帯端末同士を接続する通信基盤として Device-to-Device (D2D) 通信基盤への期待が高まっている [8]。D2D 通信基盤とは、利用者の持つ端末資源を利用するインフラレス通信基盤であり、帯域効率や電力効率、通信速度等で従来の基盤より優位であることが示されている [8]。特別な端末を必要とせずにネットワークを構築しデータの共有が可能であるため、特に災害時における利用が多く想定されている [9-11]。また、Android 端末の普及率は多くの国で 50%以上であり [12]、特に Android 4.0 以上の普及率は 2017 年 6 月時点で 99.2%となっている [13]。そこで、本研究では、携帯端末として Android 端末を対象にした D2D 通信基盤の実現を目指す。

D2D 通信基盤を実現するために、本研究では Wi-Fi Direct [14] を用いる。Wi-Fi Direct は Android 4.0 以上に搭載されているプロトコルであり、通信速度や電波の有効範囲の点で Bluetooth 等のプロトコルよりも優れているという利点がある [15,16]。しかし、Wi-Fi Direct は 1 台のグループオーナー (GO) と、その GO に紐付けられた複数のクライアント (CL) 間のグループ内シングルホップ通信を想定しており、単独では複数のグループをまたいだマルチホップ通信に対応することができない。また、全ての GO の IP アドレスは 192.168.49.1/24 で固定されており、CL には DCHP によって GO からランダムに IP アドレスが割り当てられる。そのため、グループ間通信時に端末間で IP ア

¹ 東北大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

² 日本学術振興会特別研究員 DC
JSPS Research Fellow

³ 東北大学サイバーサイエンスセンター
Cyberscience Center, Tohoku University

a) oide@ci.cc.tohoku.ac.jp

b) beto@tohoku.ac.jp

c) suganuma@tohoku.ac.jp

ドレスが衝突する可能性があり、IP アドレスを用いたルーティングは困難である。

そこで、本研究では端末間のトポロジを各 GO が分散的に制御するツリー型の構造化 D2D 通信基盤を提案する。本基盤では、Wi-Fi Direct と Wi-Fi を併用することでグループ間の接続関係を確立し、ツリー型のトポロジを構築する。また、各グループのトポロジを GO が分散的に管理し、それらのトポロジ情報を GO 間で共有することで、端末間のトポロジ内における関係性に基づいたルーティングを実現する。本稿では、先行研究 [17] で行った検討をもとに実施した提案基盤の設計について述べ、実端末への実装を通して提案基盤の実現可能性について示す。

2. 既存技術

2.1 Wi-Fi Direct

Wi-Fi Direct [14] は Wi-Fi Alliance によって策定された通信プロトコルであり、Android 4.0 から標準で搭載されている。このプロトコルを用いることで、1 台のグループオーナー (GO) と、その GO に紐付けられた複数のクライアント (CL) 間のグループ内シングルホップ通信が可能となる。このときに用いられる NIC は、通常の Wi-Fi 通信時に用いられる WiFi 側 NIC ではなく、専用の P2P 側 NIC であるため、これらのインターフェースを適切に使い分けることで Wi-Fi と Wi-Fi Direct の併用が可能である。また、GO は周囲の端末には通常の Wi-Fi におけるアクセスポイント (AP) として認識されるため、Wi-Fi Direct 非搭載の端末でも GO への Wi-Fi 接続が可能である。

Wi-Fi Direct によるグループ構築には 3 つの形態がある [18]。1) Standard : 近隣端末の発見後、どちらが GO となるか交渉して役割を決定し、その後 IP アドレスの割り当て等を行う。2) Autonomous : 既にどちらかの端末が GO だった場合、交渉を行わずに役割を引き継ぎ、その後 IP アドレスの割り当て等を行う。3) Persistent : 過去に両端末で接続経験がある場合、交渉を行わずに役割を引き継ぎ、その後 IP アドレスの割り当て等を行う。グループ構築にかかる時間は Autonomous が他の形態の半分程で完了することが実端末を用いた検証により確認されている [9, 18]。

2.2 関連研究

Wi-Fi Direct では CL と比べ GO にかかる負担が大きいため、適切に GO となる端末を選出することは重要である。また、シングルホップ通信のみを対象としている場合は、GO の物理的な位置によって接続できる CL の数が増減するため影響が大きい。そのため、Wi-Fi Direct の性能向上を目的とした適切な GO の選出法に関する研究がこれまで多くなされてきた [19-24]。また、Wi-Fi Direct を用いたアプリケーションとして災害時における情報共有アプリケーションが提案されている [25]。ただし、情報共有を目的と

したシングルホップのブロードキャスト通信を想定しているため、マルチホップが必要なユニキャスト通信等を効率的に行うことは困難である。

そこで近年、スマートフォンを対象としたマルチホップ通信が可能な D2D 通信基盤に関する研究がなされている。文献 [9, 15] では、Wi-Fi Direct のみを用いてマルチホップ通信を行う手法が提案されている。これは、各端末が常に GO として待機しておき、メッセージを転送する必要がある端末のみが CL となって転送先の GO へ接続することでマルチホップ通信を実現している。しかし、転送毎に役割の変更とグループの構築が必要となるため多くの時間がかかる [18, 26] ことや、複数メッセージの同時送信が失敗する恐れがあるといった課題がある。また、文献 [10] では、Wi-Fi Direct と Bluetooth を併用した手法が提案されている。しかし、データの転送にも bluetooth を用いているため転送速度が遅くなる他、Wi-Fi との混線が生じることが文献内で示されている。また、Wi-Fi Direct と Wi-Fi を併用してマルチホップ通信を実現する研究が文献 [27, 28] で提案されている。しかし、トポロジの構築やルーティングのために事前知識が必要でありアドホックな D2D ネットワークの構築には向かないという指摘 [15] がある。

2.3 課題と提案

前節をまとめると、従来研究では以下のすべての要件を満たすスマートフォンを対象としたマルチホップ D2D 通信基盤が実現されていない。

(R1) 一般の商用端末上で動作可能 : 緊急時の情報共有 [9, 25] 等のユースケースにおいては、OS のルート化や改変を必要とせず一般の商用端末上で動作することが必要になる。しかし、Wi-Fi Direct の性能向上を目的とした研究の多くはプロトコルや OS の改変を施しており、これらのプロトコルを本研究で対象とするアプリケーションへ適用することは困難である。

(R2) マルチホップ通信が可能なトポロジの構築 : Wi-Fi Direct ではシングルホップ通信を想定しているため、遅延なくマルチホップ通信を行うためにはそれらのコネクションを多段的に接続していく必要がある。しかし、従来研究ではシングルホップ通信のみの対応 [25] や転送毎にトポロジを再構築する必要がある [15, 25] ため、マルチホップ通信のためのトポロジが構築されていない。

(R3) 効率的なルーティング : D2D 通信基盤では参加者の持つ端末の資源が利用されるため、効率的に全端末間でのルーティングを行う必要がある。しかし、従来研究ではブロードキャスト通信のみが対象であったり [10] ルーティングに事前知識が必要であるため [27]、状況や用途に合わせた柔軟なルーティングが困難である。

そこで本研究では、Android 端末を対象にした構造化 D2D 通信基盤を提案する。本基盤は以下の特徴を持つ。

(F1) Wi-Fi と Wi-Fi Direct の標準機能のみを利用：提案基盤では、Wi-Fi と Wi-Fi Direct の標準機能のみを用いてアドホックに周辺端末とマルチホップ通信が可能な D2D 通信基盤を構築する。これにより、一般の商用端末への容易な実装を可能とし、(R1) を達成する。

(F2) 各 GO による分散型トポロジの構築：提案基盤では、各 GO がグループ内の CL との接続インターフェースを自律的に制御することで、事前知識が不要な多段的なコネクションを確立する。これにより、マルチホップ通信が可能なツリー型のトポロジを確立し、(R2) を達成する。

(F3) 端末間の関係性に基づいたルーティング：提案基盤では、構造化されたトポロジ内における相手端末との関係性に基いてルーティングすることで、効率的な端末間通信を実現する。これにより、状況や用途に応じた柔軟なルーティングを実現し、(R3) を達成する。

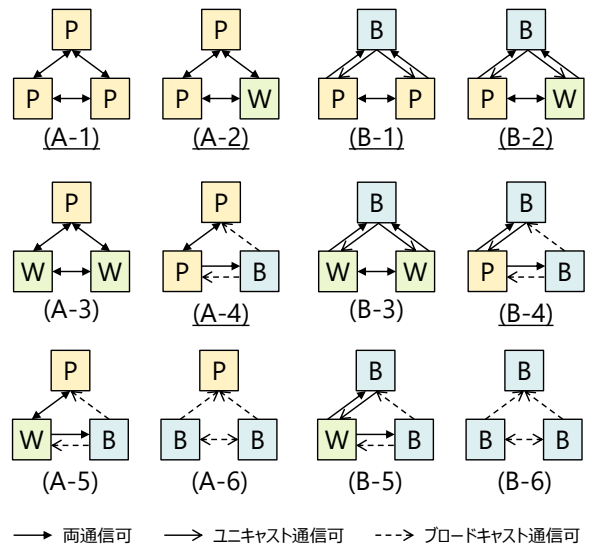


図 1: 予備実験における実験結果

3. 予備実験

3.1 概要

Wi-Fi と Wi-Fi Direct では用いる NIC が異なるため、それらを併用することで端末を多段的に接続していくことが可能である（詳細は 4 章で述べる）。しかし、P2P 側 NIC を用いて GO として機能しつつ、WiFi 側 NIC で他のグループに CL として接続した場合、両 NIC に割り当てられる IP アドレスのアドレス空間が同一（192.168.49.0/24）のため、例えば以下のようなケースにおいてアプリケーションレイヤでのメッセージの送受信が不可能である。

- 自身が CL として所属しているグループの GO へメッセージを送信する際、宛先 IP アドレスと自身の P2P 側 NIC に割り当てられている IP アドレスが等しい（192.168.49.1/24）ため、自身宛のメッセージとして処理される

そこで、本予備実験では、Wi-Fi Direct の単一グループ内における各端末間の送受信の可否について、端末の役割と両 NIC の使用状況毎に検証する。

本予備実験では、まず、ZenFone3 (Android 7.0) を 3 台用意し、それぞれに自作した予備実験用アプリケーションをインストールする。その後、任意の 1 台を GO として起動し、他の 2 台を招待して 3 台による Wi-Fi Direct グループを構築する。そのうえで、端末同士でユニキャスト通信とブロードキャスト通信によるメッセージの送受信を試行し、その可否を確認する。

試行したトポロジは、端末の役割 (GO/CL) と NIC の使用状況 (P2P 側のみ/WiFi 側のみ/両方) を考慮し、その全ての組み合わせで試行が可能な 12 パターンを選択した。

3.2 結果と考察

図 1 に各トポロジにおける通信の可否をまとめた結果を示す。なお、各トポロジの上側の 1 台が GO、下側の 2 台

が CL を表す。また、 \boxed{P} は P2P 側 NIC のみを使用した端末、 \boxed{W} は WiFi 側 NIC のみを使用した端末、 \boxed{B} は両方の NIC を使用した端末を示す。CL は GO に対して両 NIC を通じて接続が可能のため \boxed{P} 、 \boxed{W} 、 \boxed{B} の全ての状況が考えられるが、GO については必ず P2P 側 NIC を使用するため \boxed{W} は考えない。

結果より、片方の NIC のみを用いる \boxed{P} - \boxed{P} 、 \boxed{P} - \boxed{W} 、 \boxed{W} - \boxed{W} 間の経路では、ユニキャスト通信とブロードキャスト通信のいずれにおいても両方向通信が可能であることを確認した。一方で、両方の NIC を用いる \boxed{B} との通信においては、NIC の使用状況だけではなく各端末の役割によっても可否が変化することが分かった。

以上の結果に基いて提案基盤で用いるトポロジについて考察する。まず、GO-CL 間で双方向通信が不可能なトポロジ (A-6, B-6) を除外する。また、GO へ接続可能な CL の NIC は GO 側で制御可能であるが、Wi-Fi 接続中の CL が自ら新たなグループの GO となること ($\boxed{W} \rightarrow \boxed{B}$) を抑制することはできない。そのため、双方向通信が不可能な前述のトポロジへ遷移可能な 4 トポロジ (A-3, A-5, B-3, B-5) についても除外する。以上より、提案基盤においては図 1 において下線を引いた 6 つのトポロジを採用する。

4. 設計

3 章の考察に基いて、トポロジ構築機構とマルチホップ通信機構の設計を行う。

4.1 トポロジ構築機構

提案基盤では、Wi-Fi Direct と Wi-Fi を併用し、GO が自身の CL との接続形態を自律的に制御することで多段的なツリー型トポロジを構築し、グループ間の接続関係を実現する。ここで、端末への役割として新たに中継端末 (RN) を導入する。RN は各グループの CL の中から 1 台以上選出

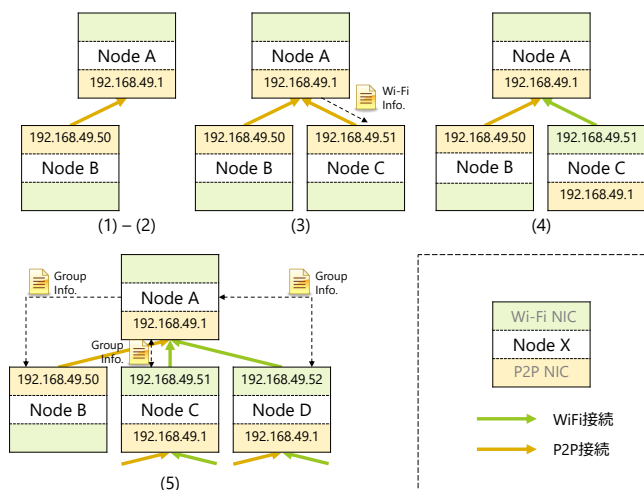


図 2: トポロジの構築手順

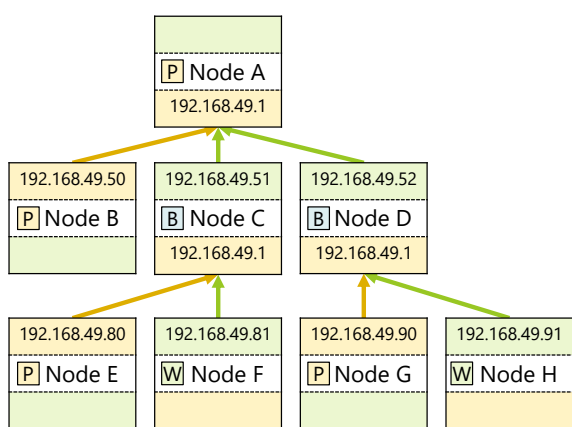


図 3: トポロジの構築例

される端末であり、GO と P2P 側 NIC による接続のみが許可される。これは、3 章の考察により選出した採用トポロジの 6 種において CL 側に必ず存在する **[P]** に相当し、特にトポロジ (A-4), (B-4) においては GO から CL へのメッセージを中継する役割を担う。なお、CL については接続 NIC の制限を設けない。

トポロジの構築は以下の手順で行う。

- (1) D2D ネットワークを構築したい利用者が GO としてグループを構築し周辺端末を CL として招待する
- (2) 1 台目に接続した CL には RN の役割を与え、P2P 接続のみを許可する
- (3) 2 台目以降に接続した CL には Wi-Fi 接続に必要な情報を与え、任意の接続を許可する
- (4) Wi-Fi 接続に切り替えた CL は新たなグループの GO となり他端末からの接続を待つ
- (5) GO は定期的に自身と接続する全ての端末に対して自身のグループ情報を広告する

図 2 にトポロジの構築手順を図示する。手順 (1), (2) では、両端末は Wi-Fi Direct の機能を用いて接続を確立する。この時、いずれかが予め GO となっておくことでグループ構築にかかる時間を短縮する。また、手順 (3) において、2 台

目以降の CL の接続があった場合、その端末に対して GO への WiFi 接続時に必要な情報 (AP の SSID と Passphrase) を提供する。この情報をもとに、CL は P2P 接続を継続するか WiFi 接続へ切り替えるかを決定し、WiFi 接続へ切り替えた端末は手順 (4) において新たなグループの GO となり他端末からの接続を待つ。その後、手順 (5) により GO は定期的に自身のグループ情報 (GO 情報, RN 情報, CL リスト, 経路表) を周囲の端末と共有し、常に最新のトポロジ情報を全員で共有する。

図 3 にトポロジの構築例を示す。このとき、Node A, C, D が GO, Node B, E, G がそれらのグループの RN として機能している。その後、Node A, C, D が新たな端末の接続を受け付けるか、Node F, H が新たに GO となることによってトポロジを拡張していく。

4.2 マルチホップ通信機構

提案基盤では、前節の手順 (5) で共有したトポロジ情報と近隣端末の経路表をもとに、それらとの関係性に基づいて自身の経路表を更新する。ここで、3 章の考察により選出した採用トポロジにおける端末間の接続性を考慮し、自身の役割に応じて以下の手順で経路表を更新する。

GO 自身のグループの端末からメッセージが届いた場合は、相手端末情報を更新し、常に RN を経由するように経路表を更新する。他グループからメッセージが届いた場合は、端末情報の更新のみを行う

CL 自身のグループの端末からメッセージが届いた場合は、相手端末情報を更新し、常に直接接続として経路表を更新する。他グループからメッセージが届いた場合は、端末情報の更新のみを行う

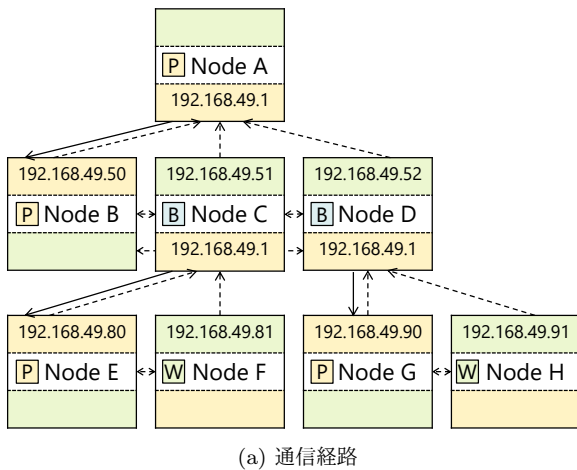
RN CL と同様

また、メッセージの送信形態は以下の規則に基いて決定する。

$$\begin{cases} \text{ユニキャスト通信} & (\text{GO} \rightarrow \text{RN}) \\ \text{ブロードキャスト通信} & (\text{CL}, \text{RN} \rightarrow \text{GO}, \text{CL}, \text{RN}) \end{cases}$$

GO が常に RN を経由してメッセージを転送するのは、CL が **[B]** の場合に GO 側から通信する手段がないためである (図 1 (A-4), (B-4) を参照)。また、この時に有効なメッセージの転送手段がユニキャスト通信のみであるため、GO からの通信では常に RN に対するユニキャスト通信を採用する。一方で、CL や RN からは任意の近隣端末に対して直接ブロードキャスト通信が可能であるため、それらからの通信では常に直接的なブロードキャスト通信を採用する。なお、ブロードキャスト通信によって全ての近隣端末が同じメッセージを受信するが、独自に設定したメッセージヘッダを参照して宛先端末 ID を確認し、自身の ID と異なる場合は破棄するよう実装する。

図 4 に、図 3 における経路表の構築例を示す。各端末



(a) 通信経路

宛先	ホップ先	(ホップ数)	(関係)	(送信形態)
Node A	-	0	CL→GO	Broadcast
Node B	-	0	CL→RN	Broadcast
Node D	-	0	CL→CL	Broadcast
Node E	Node E	0	GO→RN	Unicast
Node F	Node E	1	GO→RN	Unicast
Node G	Node D	1	CL→CL	Broadcast
Node H	Node D	2	CL→CL	Broadcast

(b) Node C の経路表

図 4: 経路表の構築例

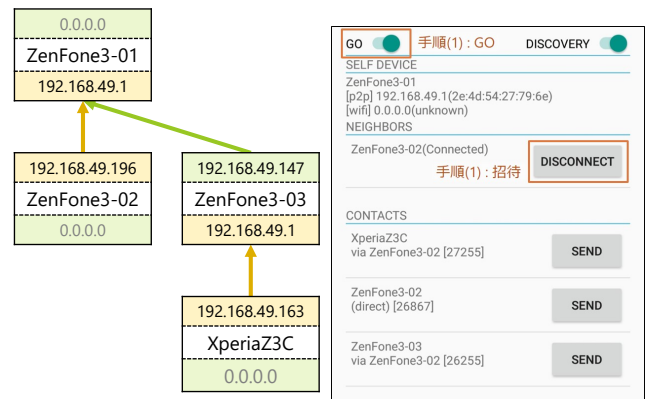
間の接続形態は、図 4(a) に示すように、GO から自身のグループ内の端末への送信時のみ RN へのユニキャスト通信であり、それ以外はブロードキャスト通信を用いた直接通信となっている。

このときの Node C の経路表を図 4(b) に示す。Node A, B, D については自身が CL として所属するグループの端末のため、ブロードキャスト通信による直接通信が適用される。また、Node E, F については自身が GO として所属するグループの端末のため、RN である Node E をユニキャスト通信で経由する経路が適用される。更に、Node G, H とは直接的な接続関係はないが、Node D と経路表を共有した際に獲得可能な経路情報であるため、ホップ先を Node D として登録を行う。なお、ホップ数は複数端末と経路表を交換した際に生じる経路の衝突を防ぐためのものであり、常にホップ数が最小の経路を採用する。トポロジの構造上、最短経路は一意に定まるため、各端末の持つ経路表は端末の移動性を考慮しなければ一定時間経過後に必ず収束する。また、端末間の関係性や送信形態はメッセージの送信時に参照される項目であり、メッセージで共有する経路表の情報には含まない。

5. 動作確認実験

5.1 通信基盤の試作

図 5 に試作した D2D 通信基盤の評価用アプリケーション



(a) トポロジ例

(b) UI 例

図 5: 試作通信基盤

表 1: 使用した Android 端末

No.	製品名	端末名	Android
1	ZenFone3	ZenFone3-01	7.0
2	ZenFone3	ZenFone3-02	7.0
3	ZenFone3	ZenFone3-03	7.0
4	Xperia Z3 Compact	XperiaZ3C	6.0.1
5	GALAXY S4	SC-04E-01	5.0.1
6	GALAXY S4	SC-04E-02	5.0.1
7	Ascend G620S	HUAWEI-01	4.4.4

ンを示す。また、実装環境を以下に示す。

- IDE : Android Studio 2.3.3
- compiled SDK : Version 24 (Android 7.0)
- minimum SDK : Version 14 (Android 4.0)

また、試作通信基盤をインストールした Android 端末の一覧を表 1 に示す。

図 5(b) は、図 5(a) に示すトポロジ構成における ZenFone3-01 の UI である。UI には、上段に自身の端末に関する情報、中段に Wi-Fi Direct における近隣の端末情報、下段に同一ネットワークに参加中の端末情報が表示される。図より、自身の端末の NIC の使用状況が正しく反映され、また、各端末への経路表が正しく共有されていることが確認できる。

なお、本試作基盤は 4.1 節のトポロジ構築手順のうち、手順 (1) における GO の選出及び周辺端末の招待のみ手動で設定する必要がある。それ以降の手順や 4.2 節で述べた経路表の更新はシステム内で自動的に行われる。

5.2 実験概要

動作確認実験では、事前知識が不要で端末間で動的に多段トポロジを構築し、任意の端末間で遅延なくマルチホップ通信を行うかを確認する。図 6 に本実験で用いるトポロジを示す。このうち、図 6(a) におけるトポロジ A は深さ優先のトポロジであり、主にトポロジにおける縦方向の

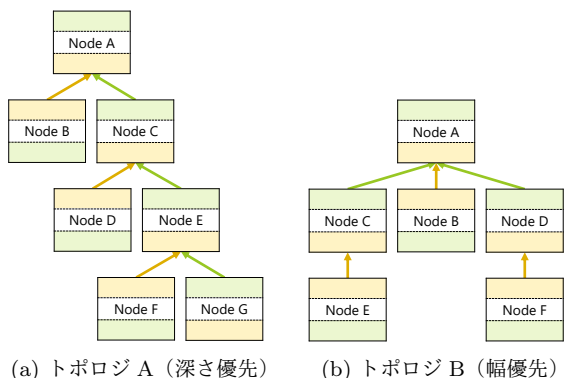


図 6: 実験トポロジ

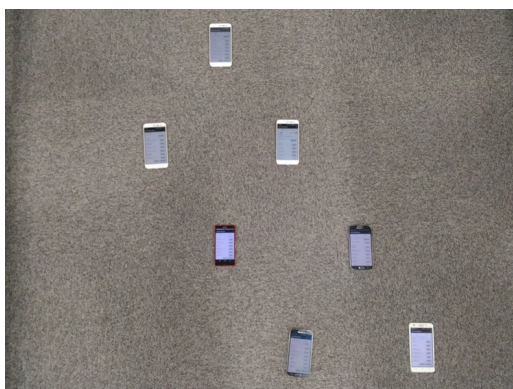


図 7: 実験の様子

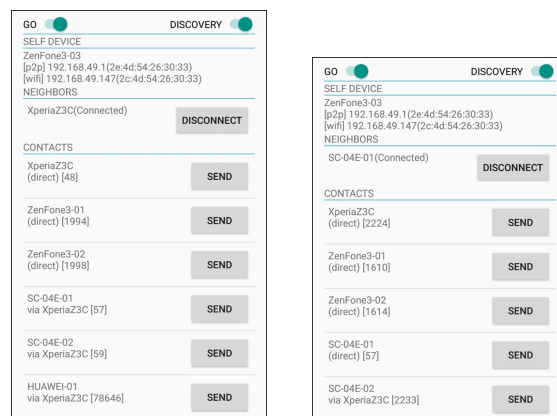
メッセージ交換の可否について検証する。また、図 6(b) におけるトポロジ B は幅優先のトポロジであり、主にトポロジにおける横方向のメッセージ交換の可否について検証する。なお、使用端末は、トポロジ A では表 1 における端末 1-7, トポロジ B では端末 1-6 を用いる。

図 7 に実験の様子を示す。本実験では、各端末は構築トポロジに対応するよう 30 cm の間隔をあけて配置する。各端末には他端末の情報やトポロジ情報は事前知識として与えず、前節で述べたようにルートノードとなる GO の選出及び周辺端末における接続先 GO の選択のみ手動で操作する。実験中、各端末の移動は考えない。

実験手順は以下の通り。

- (1) 任意に選択した端末を GO とし、実験用ネットワークを構築させる
- (2) GO に対して任意に選択した周辺端末から Wi-Fi Direct による接続を試みる
- (3) GO からの要請によって新たな GO となった端末に対して、手順 (2) を繰り返す
- (4) 手順 (3) を繰り返し、目的のトポロジを構築する
- (5) 各端末の経路表を同期する
- (6) 全ての端末間でメッセージを交換し、成功の可否と遅延について測定する

なお、次節以降の実験結果及び考察では、図 6 における端末のアルファベットと表 1 における端末の番号を順に対



(a) トポロジ A (b) トポロジ B

図 8: トポロジの構築結果 (Node C)

表 2: 端末間通信の実験結果 (RTT (ms) / 失敗回数)

(a) トポロジ A

送信元 \ 送信先	A	B	C	D	E	F	G
A	-	114/0	126/0	260/1	439/1	661/1	758/5
B	55/0	-	146/1	388/1	593/5	758/3	925/4
C	130/0	182/1	-	187/0	225/0	400/2	535/1
D	441/4	356/3	33/0	-	74/0	309/0	511/2
E	575/0	589/4	224/1	208/0	-	127/0	210/0
F	873/0	804/6	331/3	357/0	90/0	-	148/0
G	712/3	918/11	503/0	461/0	165/0	112/0	-

(b) トポロジ B

送信元 \ 送信先	A	B	C	D	E	F
A	-	127/0	308/0	276/0	298/0	565/0
B	28/0	-	302/2	241/0	338/0	303/0
C	267/0	325/0	-	345/2	51/0	550/0
D	203/2	250/2	355/0	-	345/2	157/0
E	317/0	426/2	58/0	424/1	-	761/0
F	441/1	458/2	507/0	87/0	573/3	-

応させて行った実験結果について述べる。また、本実験では 4.1 節における手順 (5) における定期的なメッセージ交換機能を無効にし、端末間での経路表の同期は手動でメッセージを交換させることによって行った。

5.3 実験結果

図 8 に前節の実験手順 (5) までにおける各トポロジの Node C の画面を示す。図より、端末間で正しく接続関係が構築され、経路表の更新が行われたことが分かる。

表 2 に前節の実験手順 (6) における端末間通信の結果を示す。本実験では、各端末間で UDP によりメッセージを 20 回ずつ交換し、かかった RTT の平均と通信が失敗した回数を測定した。表より、端末性能またはノード間の関係性によって結果にばらつきが生じたことが分かる。

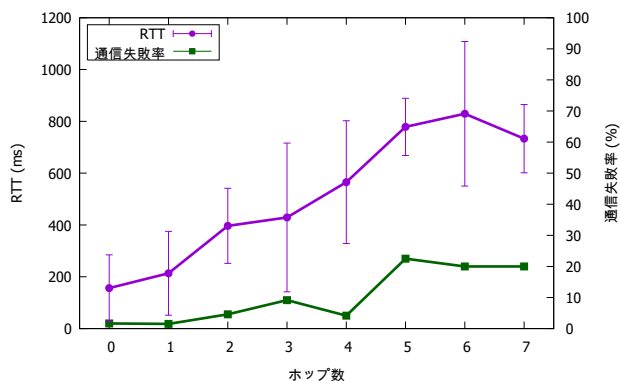


図 9: ホップ数毎の端末間通信の実験結果

具体的には、トポロジ A における Node C \leftrightarrow Node D, Node E \leftrightarrow Node F, トポロジ B における Node A \leftrightarrow Node B のように、同じ経路でも送受信端末が逆になった場合と比較すると、RTT が大きく異なる結果となった。これは GO [P] [B] \leftrightarrow CL [P] において発生しており、異なる端末を用いた検証でも同様の結果が得られたため、Wi-Fi Direct における役割または使用インターフェースによって処理性能に差が出ることが考えられる。また、直接接続された端末間における通信に着目すると、GO \leftrightarrow CL 通信よりも CL \leftrightarrow CL 通信の方が低速になった。特に、トポロジ B における CL \leftrightarrow CL 通信では計 6 度送受信に失敗している。グループの台数の増加に伴ってパケットロス率が増加することが文献 [29] でも示唆されており、CL 数が通信の安定性に与える影響は今後端末数を増やして詳細に検証する必要がある。

図 9 に各トポロジにおける結果を集約し、端末間のホップ数毎にまとめなおした RTT と標準偏差、および通信失敗率を示す。前述したように同じホップ数の通信でも RTT に大きなばらつきがあるが、概ね 1 ホップあたり 100ms ずつ増加する傾向が読み取れる。また、ホップ数の増加とともに著しく通信失敗率が上昇した。

5.4 考察

実験結果より、一般の Android 端末へアプリケーションをインストールするだけでマルチホップ D2D 通信環境が構築可能であることを確認した。提案基盤では Wi-Fi と Wi-Fi Direct の標準機能のみを用いているため、OS の改変やそれに伴う端末のルート化等を施す必要がない。また、トポロジの構築時およびルーティング時に必要な近隣端末情報を事前に与える必要がなく、各 GO による自律的なグループの管理と端末間の関係性に基づいた経路表の構築によって動的に環境を構築することができた。また、ルーティングでは常にホップ数が最短となる経路が選択され、任意の端末間で自由にメッセージを交換できることを確認した。以上より、2.3 節で述べた要件を全て満たすマルチホップ D2D 通信基盤を実現した。

しかし、実装および実験を通して以下の検討事項が判明

した。

GO の消費電力：端末を GO として起動すると AP として機能し周辺端末からの接続を待機するが、この状態を維持することによる明らかな消費電力の増加を確認した。本研究で想定するユースケースでは利用者によるスマートフォン同士で情報を共有するため、特定の端末のみに大きく資源の負担を強いるべきではない。そのため GO となる端末へ何らかのインセンティブを与える機構や、各端末の地理的な位置情報等をもとにして最小の GO の台数で済むようトポロジを最適化する機構等の導入が必要になる。

端末の移動性の考慮：提案基盤におけるツリー型のトポロジでは、より根に近い端末へ送信する際は自身のグループの GO を必ず経由する必要がある。また、より葉に近い端末へ送信する際は RN を必ず経由する必要がある。これらはルーティング時の単一障害点となりうるが、その端末を持つ利用者が電波の有効範囲外へ移動してしまった場合はネットワーク全体が機能なくなってしまう。そのため、端末離脱時における迂回経路の構築や移動性を考慮した GO, RN の選択機構等の導入が必要になる。

6. おわりに

本稿では Android 端末を対象としたマルチホップ D2D 通信基盤を提案した。提案基盤では、各端末は専用のアプリケーションをインストールするだけで、近隣の端末間で D2D ネットワークを構築し情報の共有を行うことができる。ネットワークの構築には近隣端末情報等の事前知識が不要であるため、アドホックなネットワークを即時的に構築することが可能であり、従来研究では困難であった効率的なマルチホップ通信により任意の端末間で通信が可能である。また、実端末を用いた提案基盤の試作実装および動作確認実験によって上記の特性を確認し、ホップ数や端末性能が与える通信遅延や安定性について考察した。

今後の予定として、CL の役割の決定およびトポロジ構築の自動化機構を検討する。具体的には、各端末の移動性や物理位置、残資源量等を考慮して RN を選出し、他の CL についても適切な [P], [W], [B] を選択可能とした上で、新たな端末が自動的に最適な GO へ接続を試行する機構を検討する。その後、端末の突如の離脱および移動に伴うトポロジの再構築機構の検討を進め、様々な利用者環境やユースケースへ適用可能な基盤の実現を目指す。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 15J09912 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] NoiseTube, available from (<http://noisetube.net/>) (accessed 2017-06-21).
- [2] Rana, R. K., Chou, C. T., Kanhere, S. S., Bulusu, N. and Hu, W.: Ear-Phone : An End-to-End Participatory Urban Noise Mapping System, *Proc. the International*

- Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 105–116 (2010).
- [3] Sunyoung, K., Jennifer, M. and Eric, P.: Sensr: Evaluating a Flexible Framework for Authoring Mobile Data-collection Tools for Citizen Science, *Proc. the Conference on Computer Supported Cooperative Work*, pp. 1453–1462 (2013).
- [4] Conti, M., Boldrini, C., Kanhere, S. S., Mingozzi, E., Pagani, E., Ruiz, P. M. and Younis, M.: From MANET to people-centric networking: Milestones and open research challenges, *Computer Communications*, Vol. 71, pp. 1–21 (2015).
- [5] Lane, N. D., Eisenman, S. B., Musolesi, M., Miluzzo, E. and Campbell, A. T.: Urban Sensing: Opportunistic or Participatory?, *Proc. the Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp. 11–16 (2008).
- [6] Oide, T., Abe, T. and Suganuma, T.: COSAP: Contract-Oriented Sensor-Based Application Platform, *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 8261–8275 (2017).
- [7] 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: サーバレスな IoT アプリケーションの構築基盤におけるユーザマッチング手法の設計と評価, 第 24 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, Vol. 2016, pp. 1–8 (2016).
- [8] Fodor, G., Dahlman, E., Mildh, G., Parkvall, S., Reider, N., Miklós, G. and Turányi, Z.: Design Aspects of Network Assisted Device-to-Device Communications, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 50, No. 3, pp. 170–177 (2012).
- [9] Felice, M. D., Bedogni, L. and Bononi, L.: The Emergency Direct Mobile App: Safety Message Dissemination over a Multi-Group Network of Smartphones Using Wi-Fi Direct, *Proc. ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*, pp. 99–106 (2016).
- [10] Wang, Y., Tang, J., Jin, Q. and Ma, J.: BWMesh: A Multi-hop Connectivity Framework on Android for Proximity Service, *Proc. IEEE International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing and IEEE International Conference on Autonomic and Trusted Computing and IEEE International Conference on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops*, pp. 278–283 (2015).
- [11] 稲岡裕紀, 峰野博史: Wi-Fi Direct を用いた DTN による被災情報共有システムの提案, 情報処理学会第 75 回全国大会論文集, pp. 277–278 (2013).
- [12] Kantar: iOS and Android push towards a Two-OS world, available from (<https://www.kantarworldpanel.com/global/News/iOS-and-Android-push-towards-a-Two-OS-world>) (accessed 2017-06-16).
- [13] Google: Android Developers Dashboards, available from (<https://developer.android.com/about/dashboards>) (accessed 2017-06-16).
- [14] Wi-Fi Alliance: Wi-Fi Direct, available from (<http://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-direct>) (accessed 2017-06-21).
- [15] Liu, K., Shen, W., Yin, B., Cao, X., Cai, L. X. and Cheng, Y.: Development of Mobile Ad-hoc Networks over Wi-Fi Direct with Off-the-Shelf Android Phones, *Proc. IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–6 (2016).
- [16] Feng, D., Lu, L., Yuan-Wu, Y., Li, G. Y., Li, S. and Feng, G.: Device-to-Device Communications in Cellular Networks, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, No. 4, pp. 49–55 (2014).
- [17] 小川純也, 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫: 商用 Android 端末間 D2D 通信アプリケーションの構築に関する一考察, 情報処理学会第 79 回全国大会論文集, pp. 3–295–3–296 (2017).
- [18] Camps-Mur, D., Garcia-Saavedra, A. and Serrano, P.: Device-to-Device Communications with Wi-Fi Direct: Overview and Experimentation, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 20, No. 3, pp. 96–104 (2013).
- [19] Zhang, H., Wang, Y. and Tan, C. C.: WD2: An Improved WiFi-Direct Group Formation Protocol, *Proc. ACM MobiCom Workshop on Challenged Networks*, pp. 55–60 (2014).
- [20] Yao, C., Zhang, H. and Song, L.: Demo: WiFi Multihop: Implementing Device-to-Device Local Area Networks by Android Smartphones, *Proc. ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 405–406 (2015).
- [21] Menegato, U. B., Cimino, L. D. S., Delabrida, S., Medeiros, F. A., de Castro Lima, J. and Oliveira, R. A. R.: Dynamic Clustering in WiFi Direct Technology, *Proc. ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*, pp. 25–29 (2014).
- [22] Laha, A., Cao, X., Shen, W., Tian, X. and Cheng, Y.: An Energy Efficient Routing Protocol for Device-to-Device Based Multihop Smartphone Networks, *Proc. IEEE International Conference on Communications*, pp. 5448–5453 (2015).
- [23] Cherif, W., Khan, M. A., Filali, F., Sharafeddine, S. and Dawy, Z.: P2P Group Formation Enhancement for Opportunistic Networks with Wi-Fi Direct, *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1–6 (2017).
- [24] Khan, M. A., Cherif, W. and Filali, F.: Group Owner Election in Wi-Fi Direct, *Proc. IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference*, pp. 1–9 (2016).
- [25] 大和田泰伯, 井上真杉, 浜口清: スマートフォン同士による情報共有アプリケーションの実装, 技術報告, 情報通信研究機構耐災害 ICT 研究センター (2016).
- [26] 水村直人, 金岡諒, 斉藤裕樹, 高橋淳二, 戸辺義人: Wi-Fi Direct を用いた複数デバイス間ファイル共有転送最適化の検討, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, Vol. 2016, pp. 105–114 (2016).
- [27] Casetti, C., Chiasserini, C. F., Pelle, L. C., Valle, C. D., Duan, Y. and Giaccone, P.: Content-centric Routing in Wi-Fi Direct Multi-group Networks, *Proc. IEEE International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, pp. 1–9 (2015).
- [28] Casetti, C., Chiasserini, C. F., Pelle, L. C., Valle, C. D., Duan, Y. and Giaccone, P.: A Demonstration for Content Delivery on Wi-Fi Direct Enabled Devices, *Proc. IEEE International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, pp. 1–2 (2015).
- [29] Marinho, R. P., Menegato, U. B. and Oliveira, R. A. R.: IMSN Routing on Wi-Fi Direct Enabled Devices, *Proc. ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*, pp. 31–38 (2015).