

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

水村 直人¹ 金岡 諒¹
斉藤 裕樹² 高橋 淳二³ 戸辺 義人³

概要: 近年、スマートフォンの普及が加速し、個人に必要な情報をすべて記録したり、他人と情報共有する媒体として、スマートフォンは個人専用携帯端末としての役割を担うものとなってきた。スマートフォンを用いて、近隣の複数人とファイルを共有する際には、インターネットとの接続安定性に左右されない Wi-Fi Direct を用いることが有効であると考えられる。しかし、Wi-Fi Direct には接続確立のオーバーヘッドがあることと、複数端末間の受信電波強度の影響で、必ずしも送信端末から残りの端末に逐次ファイルを転送するのが転送完了時間を最適にするとは限らない。本研究では、接続確立オーバーヘッドと複数端末間の受信電波強度を考慮して転送経路を決定する、FTroid を提案する。本論文では、FTroid での経路決定方法と予備性能評価結果を述べる。

Investigation of Optimizing Time for File Transfer Among Multiple Devices using Wi-Fi Direct

NAOTO MIZUMURA¹ RYO KANAOKA¹
HIROKI SAITO² JUNJI TAKAHASHI³ YOSHITO TOBE³

1. はじめに

1.1 研究背景

現在、コンピュータやスマートフォンによる情報のやり取りが、日々多くの人々に利用されている。このようなやり取りにおいて LTE (Long Term Evolution)[1][2]に代表されるセルラー方式や、Wi-Fi に代表される無線 LAN (Local Area Network)[3]を用いた、インターネットを介した通信方式が現在主流である。一方で、近距離無線通信も急速に成長している。近距離無線通信は D2D (Device-to-Device)通信と呼ばれ、主にパソコン周辺機器に使用される Bluetooth や、大容量通信が可能な Wi-Fi Direct が主に用いられる。これらはタブレット端末などのセルラー端末ではない端末でも使用することが可能で、近年発売されている端末にはすべて搭載されているため、利用シーンは非常に多い。そのため、携帯電話の基地局や無線 LAN が使用できない場合でも、周囲の端末と通信が容易にできるという利点がある。一方で、ユーザの多くはセルラー通信を用いて通信をしているため、使用頻度は少ないという側面もある。

1.2 各通信手法の問題点

セルラー方式において、携帯電話の通信サービスを提供する企業では、各ユーザのデータ通信量の増加によるトラヒックの圧迫に対し、所定のデータ通信量を定め、一定のデータ通信量を超えたユーザに対して通信速度制限を与え

ているため、ユーザは常に自分がやり取りするデータ通信量を考慮しなければならない。

近距離無線通信において、携帯端末での情報のやり取りの増加に伴い、携帯端末間の情報のやり取りも増加している。したがって、1 台の端末から複数の端末へ向けたデータ転送の利用機会が増加している。しかし、近距離無線通信において TCP 通信を用いた場合、複数端末に向けたブロードキャストをすることは不可能であるため、通信端末が多いほどデータ転送に時間がかかってしまう。さらに、Wi-Fi Direct はパケットロスによる再送制御を行うため、通信時間は無線の電波状況に大きく依存する。

以上から、複数端末でのインターネットを介さずに、高速なファイル共有を行うシステムが求められている。

1.3 研究目的

本研究では、複数の携帯端末間でファイル共有を行う際、各端末間の RSSI(Receive Signal Strength Indication)値に基づくスループットを考慮し、全端末にファイルが到達するまでの所要時間の最適化を行うシステム、FTroid(File Transfer Optimization Protocol for Device-to-Device Communication) の設計および実装を行う。本システムの実現によりデータ通信量に関係なく、複数台の端末同士で効率的なファイルの共有が期待される。加えて、1 台の端末がすべての端末にファイルを転送する場合と比べ、より短時間でファイルを共有することができる。また、無線 LAN のアクセスポイントの環境がない場合やネットワークへアクセスできない端末が存在する場合でも、データの共有を行うことができる。

1 青山学院大学大学院理工学研究科理工学専攻知能情報コース

2 明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科

3 青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科

本論文では 2 章で FTroid に関する研究について、3 章では FTroid の実装に関わる予備実験の概要と結果について、4 章では FTroid の設計について、5 章では Ftroid の評価について、6 章では評価から得た結果の考察について、7 章では本論文のまとめについて述べる。

2. 関連研究

Chia-Hao らは、複数の端末間でデータ通信を行う研究を行った[4]。この研究は、1 台の Cellular モデルと、2 台の D2D モデルで構成され、基地局を介した端末間の通信を行った。この他にも、セルラーネットワークを利用した研究は数多くなされている[5][6]。しかし本研究で Cellular モデルの端末は使用せず、Wi-Fi や Bluetooth などの通信のみ行うことができる端末が存在する場合を想定し、システムの設計を行う。また、Zheng Lu らは、データオフロードやファイル転送の遅延に着目し、動的な D2D ネットワークのためのスケジューリングアルゴリズムを提案した[7]。しかし当研究では各端末間の RSSI に基づくスループットを考慮されていない。本研究では、各端末間のスループットに着目し、全端末へファイルが転送されるまでのスケジューリングを行う。また、J.W.Hui らは TinyOS においてネットワークプログラミングを行うプロトコルであり、パケット単位での信頼性のある放送型コピーを実現する Deluge[8] というプロトコルを提案した。本研究では、Wi-Fi Direct の性質を考え、ファイル単位で転送したほうが、リコネクションオーバーヘッドが小さくなる点を利用している点で Deluge と異なる。

3. 予備実験

Ftroid の設計および実装に関わる予備実験として本研究では 5 つの予備実験を行なった。

3.1 電波強度の変動に関する実験

FTroid では、データを送信する端末が各端末間の RSSI に基づいてファイル転送のスケジューリングを行うため、各端末を静止させた状態での RSSI の変化が大きい場合、正確なスケジューリングを行うことができない。

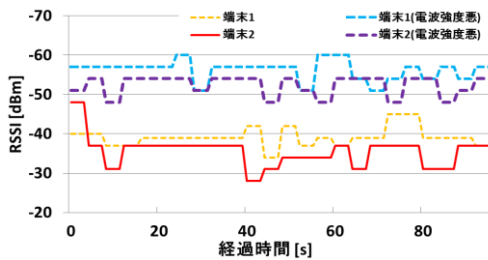


図 1 端末を静止させたときの RSSI の変化

したがって、静止させた端末間の RSSI にどの程度の変化が見られるか調査を行い、実験結果を図 1 に示した。これより、静止時の端末から RSSI の大きな変化は見られず、安定した通信が行えることが判明した。

3.2 RSSI の変化に伴うファイル転送時間に関する実験

端末間の RSSI によっては送信時にパケットロスが生じ、再送制御が行われるため、転送時間に大きく影響する。したがって、RSSI の値が異なる複数地点からファイル転送を行い、転送時間を計測した。実験結果を図 2 に示す。

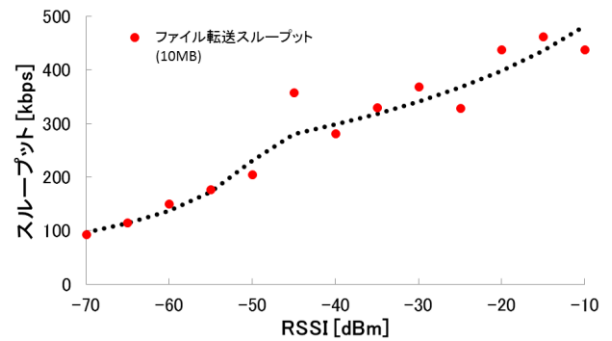


図 2 ファイル転送スループットと RSSI の関係

図中の点線は実験値から最小二乗法を用いて推定された近似曲線であり、2 つの直線によって近似することとした。RSSI の値を r とすると、この近似曲線の式 $Th(r)$ は式 3.1 となる。

$$Th(r) = \begin{cases} \frac{10 \times 8 \times 2^{20}}{3.484r + 135.921} & (-45 < r \leq 0) \\ \frac{10 \times 8 \times 2^{20}}{24.457r - 867.619} & (r \leq -45) \end{cases} \quad (3.1)$$

3.3 チャンネル干渉に関する実験

FTroid では総所要時間を最小化するため、複数セッションで同時に通信を行う。しかし、セッション間でチャンネル干渉が発生しスループットが低下する。したがって、本実験ではチャンネル干渉がスループットにどの程度影響を与えるかを調査し、実験結果を図 3 に示した。

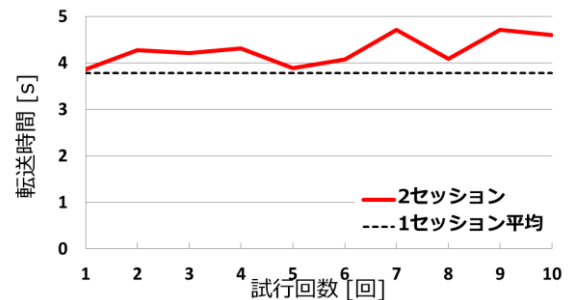


図 3 複数セッションで通信した時のスループット

これより、1セッションのスループットは約254Mbpsであるのに対し、2セッションのスループットは約224Mbpsとなることより、複数セッションでの同時通信時の通信スループット低下率 γ を $\gamma = 0.89$ と定義する。

3.4 コネクション切り替え時間に関する実験

ファイルを受信したノードが他のノードへ送信する場合、コネクションの切り替えが必要となるが、その場合、再度セッションを確立しなければならない。したがって、コネクションが確立しているセッションを切断し、新たなノードへ再接続するまでにかかる時間(リコネクション時間)を計測し、リコネクションに必要な所要時間を調査し、結果を図4に示した。

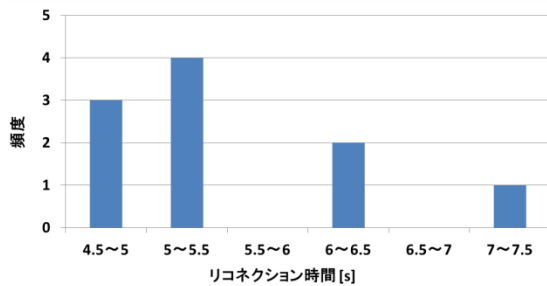


図4 リコネクション時間計測結果

図4より接続解除に約1.5秒、コネクション確立のために約4秒必要とするため、リコネクションに平均5.5秒要することが判明した。

4. FTroid の設計

4.1 目的関数

本節ではFTroidの目的関数の設計について述べる。FTroidは、送信端末が所持するファイルを複数の端末間で共有する際に、各端末間の受信電波強度を考慮し、最適なネットワーク形態を決定することで、送信端末がファイルを送信してからすべての受信端末がファイルを受信するまでの、時間の最小化を行うシステムである。総端末数を N とすると、受信ノード i ($i = 1, 2, 3, \dots, N-1$)が送信端末からファイルを受信するまでの所要時間を T_i と定義する。最初にFTroidは、あるネットワーク形態における各ノードの受信時間 T_i の中から $\max(T_i)$ となる端末、すなわち最もファイルの受信に時間を要する端末 i を探す。次に、送信する端末の順序を変化させた同一ネットワーク形態の中からそれぞれ $\max(T_i)$ を求め、その中で $\min(\max(T_i))$ 、最大転送時間が最も短くなるノード配置を決定する。最後に、送信端末を根とし受信ノードを節および葉とした、作成可能なすべてのネットワーク形態の中から、 $\min(\max(T_i))$ が最も小さくなるものが、すべての端末がファイルを受信するまでの最

短所要時間 T^{total} となる。 T^{total} を式4.1に示す。

$$T^{total} = \min_{Network} (\min_{permutation} (\max_{i \in Node} (T_i))) \quad (4.1)$$

T^{total} は、ファイル転送経路や他ノードを経由することによって差が生じる。例えば、送信ノードから他ノードを経由してファイルを受信した場合、ファイル転送時間に加えてリコネクション時間が生じる。また、複数セッションで同時にファイル転送を行う場合、チャンネル干渉によるスループットの低下が生じる。チャンネル干渉によるスループット減衰率を γ 、ノード i からノード j へファイルを転送する所要時間を t_{ij} 、リコネクション時間を ω とすると、 T^{total} は式4.2のように表現できる。

$$T^{total} = T_{prev(i)} + \frac{1}{\gamma} t_{prev(i)i} + \omega \quad (4.2)$$

式4.2はリコネクション時間やスループット減衰率を考慮した場合のファイル転送時間であるが、リコネクションが存在しないネットワーク形態の場合は $\omega=0$ となり、チャンネル干渉がない場合には $\gamma=1$ となる。

4.2 システムフロー

本節ではFTroidにおける転送時間の計算手法について述べる。まずファイル共有に参加する端末はFTroidのアプリケーションを起動し、Wi-FiをONにする。端末は周囲のFTroid利用端末のRSSIを取得できるようになる。この時、ノード i が計測したノード j のRSSIを R_{ij} と表現する。取得したRSSIはリストとして各ノードで保存され、送信端末であるノード0は各ノードが取得したRSSIリストを収集し、 $N \times N$ のRSSI行列 $\{R_{ij}\}$ を作成し、各ノード間のRSSIをRSSI行列にまとめる。この行列を基に、スケジューリングを行っていく。また、本システムでは2つのノード m 、 n 間のRSSIである R_{mm} および R_{nn} は等しいと仮定する。

このRSSI行列と3.2項の予備実験の結果から得たRSSIとRTTの相関に基づいて、実測ファイル転送時間の行列を作成する。 R_{mn} の際のRTTを $RTT_{mn}[s]$ とすると、3.2項の実験から得たRSSIとRTTの相関は、

$$RTT_{mn} = f(R_{mn}) \quad (4.3)$$

と表すことができる。送信ファイルサイズを $B[MB]$ とすると、実測ファイル転送時間 $T_{mn}[s]$ は、

$$T_{mn} = RTT_{mn} \times \frac{B}{10} \quad (4.4)$$

と表すことができ、実測ファイル転送行列として保存する。これらの情報から最適なネットワーク形態を決定し、ファイル送信と同時にネットワーク形態の情報を送信することでネットワークの形態を各ノードへ伝達する。

4.3 スケジューリングアルゴリズム

本節ではFTroidにて考慮するネットワーク形態の条件と、転送時間の計算方法について、ネットワーク形態の例を2つ挙げながら述べる。送信ノードは、ファイル転送時間を最小化するために最適なネットワーク形態をRSSI行列より構築する。FTroidは、端末の最適なネットワーク形態を構成し、ファイルを転送する。しかし、端末の台数が増加するとネットワーク形態の総数が増加するため、計算コストが増大し、最適なネットワーク形態の構築に多大な時間を費やしてしまう。したがって、FTroidは以下の条件のもとでスケジューリングを行う。

1. 複数の中継ノードを経由するネットワーク形態は候補としない

端末が一直線上に並ぶネットワーク形態の場合、3.4節の実験より、ファイル転送時間に加えてリコネクションが中継ノード数 $\times \omega$ 秒必要となる。FTroidでは複数の中継ノードを経由するネットワーク形態は転送時間が最小となる可能性は極めて低いと考え、FTroidで扱うネットワーク形態はすべて、ネットワーク全体が深さを2までで表現できるものに制限する。

2. 総端末数 $N \leq 5$ の場合、すべてのネットワーク形態からファイル転送時間が最小なネットワーク形態を選択する

条件1に合致するネットワーク形態すべてにおいて、ファイル転送時間を計算し、その中から転送時間が最小になるネットワーク形態を選択する。

3. $N \geq 6$ の場合、受信端末をクラスタに分類してネットワーク形態を決定し、ファイル転送時間を最小化する

条件1の条件下での、総端末数の増加に伴うネットワーク形態の候補数は、端末数が増加するにつれてネットワーク形態は急速に増加することがわかる。したがって本アルゴリズムでは $N \geq 6$ の場合、受信端末をクラスタに分類することによって、ネットワーク形態の候補を限定することで、計算コスト増加の防止と最適なネットワーク形態のパターンを近似的な算出を行う。

以上の条件の元、ファイル転送時間が最小となるネットワーク形態を決定する。以降は、総端末数 $N \leq 5$ の場合と $N \geq 6$ の場合のアルゴリズムについて詳細を述べる。

4.4 $N \leq 5$ の場合の所要時間算出

先述した通り、 $N \leq 5$ の場合はすべてのネットワーク形態

の中から厳密解を求める。本節では $N=5$ の場合を例に、スケジューリングの詳細を述べる。その際、5つのノードに対し0から4のIDを付し、ノード0を共有するファイルを有する送信ノード、ノード1,2,3,4を受信ノードとする。

4.4.1 送信ノードが全受信ノードに直接送信する場合

各受信ノードに対し送信ノードが直接ファイルを送信する場合の計算を行う。ファイル送信の様子を図6に示す。

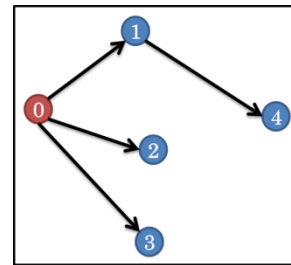


図6 1台がすべてのノードにファイル転送を行う様子

図6は実際のノード間の距離を示すものではなく、実測ファイル転送時間を示した様子である。ここで、ノード0がすべての受信ノードにファイルを送信する際の所要時間 T^{total} は、式4.5となり、この場合のファイル転送の時間経過の様子を図7に示す。

$$T^{total} = \sum_{j \neq 0} T_{0j} \quad (4.5)$$

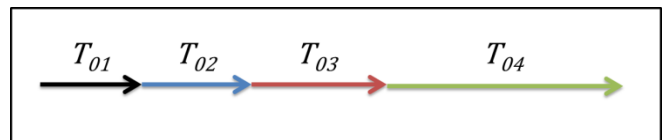


図7 1台がすべてのノードにファイル転送を行う場合の時間経過

FTroidではブロードキャスト送信をすることはできない。したがって、1台へのファイル転送が終了した後、他の端末へ逐次ファイル転送を行っていく。このファイル転送パターンを逐次転送型とし、以降で述べるネットワーク形態パターンの比較対象となり、本ネットワーク形態での所要時間よりも短時間でファイルを転送する手法を探索する。

4.4.2 1台の中継ノードが存在する場合

送信ノードが1つの中継ノードを挟んで1台の受信ノードへ送信する場合の計算を行う。ファイル送信の様子を図8に示す。

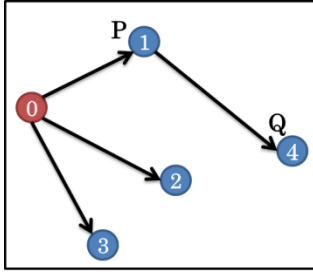


図 8 1 台の中継ノードが存在する場合

中継ノードを P, P を経由してファイルを受信するノードを Q とすると, 送信端末から転送されたファイルがすべてのノードに到達するまでの所要時間 T^{total} は式 4.6 のように表現できる.

$$T^{total} = T_{0P} + \max \left(T_{PQ}, \sum_{\substack{j \neq 0 \\ j \neq P \\ j \neq Q}} T_{0j} \right) \quad (4.6)$$

この場合, 送信端末がノード P, Q を除いたすべてのノードに転送する方が, 所要時間が長い場合(図 9)と, ノード P を経由してノード Q へ転送するルートが, 所要時間が長い場合(図 10)の, 2 パターンが考えられる. 図 10 の T_{02} と T_{14} , T_{03} と T_{14} のようにファイル転送が重なっている場合, 式 4.2 の γ を $\gamma = 0.89$ として計算を行う.

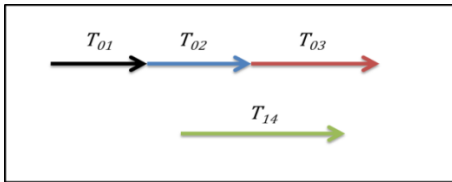


図 9 P,Q を除いたノードへ転送するほうが長い場合

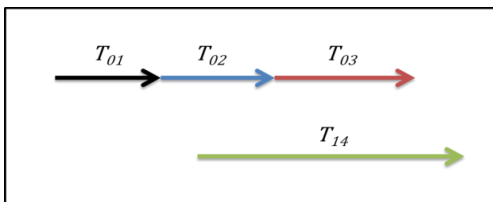


図 10 P を経由して Q へ転送するほうが長い場合

ノード P は, 次にノード Q へファイルを転送する必要があるため, 送信ノードはノード P に対して優先的にファイルを転送し, 所要時間を抑える. ノード P およびノード Q の決定方法については, 以下で述べる.

・ノード Q の決定

ファイル転送のスケジューリングを行うために, まずノード P を経由してファイルを受信するノード Q を決定する. ファイル転送時間の最小化を行うため, 送信ノードからの

RSSI が最も小さいノード, すなわちファイル転送の所要時間が最も大きいノードが Q とする.

・ノード P の決定

ノード P となりうるノードすべての場合の所要時間を調査する. 1 台の中継ノードが存在する場合におけるファイル転送の所要時間の最小値は式 4.7 となる

$$T_{min}^{total} = T_{0P} + \sum_{\substack{j \neq 0 \\ j \neq P \\ j \neq Q}} T_{0j} \quad (4.7)$$

これは図 9 の時間経過の様子のパターン 1 に該当する. したがって, ノード P となるのは式 4.6 より,

$$\max \left(T_{PQ}, \sum_{\substack{j \neq 0 \\ j \neq P \\ j \neq Q}} T_{0j} \right) = \sum_{\substack{j \neq 0 \\ j \neq P \\ j \neq Q}} T_{0j} \quad (4.8)$$

を満たすものとなる. 式 4.8 を満たすノードが存在しなかった場合, すなわち,

$$\max \left(T_{PQ}, \sum_{\substack{j \neq 0 \\ j \neq P \\ j \neq Q}} T_{0j} \right) = T_{PQ} \quad (4.9)$$

となった場合, すなわち図 11 の時間経過の様子に該当する場合は, 式 4.5 と式 4.8 を比較し.

$$\sum_{j=1} T_{1j} \geq T_{1P} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq P \\ j \neq Q}} T_{1j} \quad (4.10)$$

を満たすノード P を探索し, 該当するものがあれば, 該当ノードを P に決定する. この場合の時間経過の様子を図 11 に示す. 上段は 1 台の送信ノードがすべての Peer に対してファイルを転送した場合の所要時間, 下段は 1 台の中継ノードが存在する場合のファイル転送の所要時間を表す.

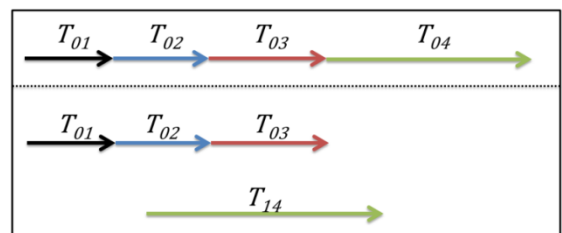


図 11 1 台の中継ノードが有効となる場合の様子

式 4.10 を満たすノード P が存在しなかった場合、1 台の送信ノードがすべての Peer にファイル転送を行う方が効率的となり、1 台の中継ノードを用いることは有効ではないと判断される。この場合の時間経過の様子を図 12 に示す。

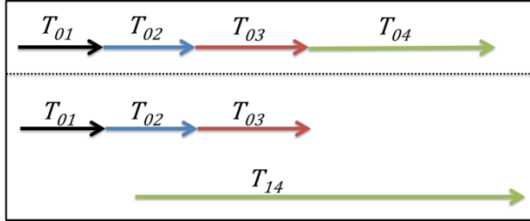


図 12 1 台の中継ノードが有効ではない場合の様子

図 12 に示すように、ノード P からノード Q へのファイル転送時間が長くなると、1 台がすべての Peer にファイルを転送する場合と比較して時間がかかり有効でないと判断できる。ノード P およびノード Q が決定した場合、1 台の中継ノードを用いる方が有効と判断される。

他のネットワーク形式についても、これらの考え方を元に各ネットワーク形態の最短転送時間の算出を行う。

4.5 N ≥ 6 の場合の所要時間算出

N ≥ 6 の場合は、受信端末のクラスタリングによって近似的にネットワーク形態を決定する。以降、N=6 の場合のファイル転送時間最小化のアルゴリズムについて述べる。

4.5.1 概要

はじめに、表 4.1 の RSSI のリストを基に、各端末の位置関係を導出しノード 0 を除く受信端末のクラスタリングを行う。受信端末のクラスタリングを終えると、各クラスタの全端末にファイルが行き渡るまでの時間を計測し、転送時間の大きいクラスタから順に、ファイルを転送する。

4.5.2 相対座標から絶対座標への変換

表 4.1 のリストは、RSSI に基づく相対的な位置関係を示すものであり、このリストでは絶対的な位置関係を推定できない。そこで位置関係の導出には、リストを擬似的な距離行列と仮定し、多次元尺度構成法 (MDS) を用いて端末を同一平面上に配置することで絶対的な位置関係を推定する。MDS は、無線端末が受信する電波受信強度情報を用いた位置測定の研究[9][10][11]に多く用いられる手法であり、本研究では、全端末を同一平面上に表現することによって、実際の端末の配置を推定することを可能にする。図 13 に、各端末間の相対距離を示す RSSI リストを MDS によって同一平面上の絶対座標に変換したものを示す。

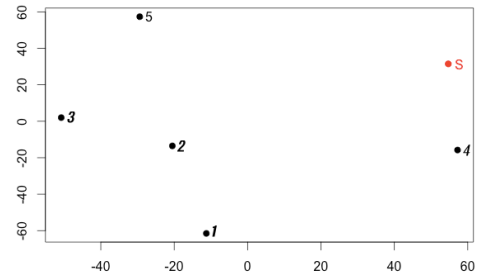


図 13 MDS による絶対座標変換

4.5.3 受信端末のクラスタリング

MDS によって推定した絶対的な位置関係を基に、受信端末のクラスタリングを行う。ノード 0 を除くすべての受信端末に対して K-means 法を適用し、受信端末のクラスタリングを行う。クラスタ数は受信端末の総数に依存し、クラスタ数を C、総端末数を N とすると、式 4.11 の条件でクラスタ数を決定する。

$$C \geq \frac{N-1}{3} \quad (4.11)$$

クラスタ内の平均端末数が 3 以下になるように設定した。例えば、N=6 の場合クラスタ数 C は 2 となり、N=8 の場合クラスタ数は 3 となる。式 4.11 の条件でクラスタ数を決定することで、クラスタ間のファイル転送時間の増加が軽減され、クラスタ間でのファイル転送時間の差も軽減されることが期待できる。図 14 で変換した絶対座標の受信端末をクラスタリングした結果を図 14 に示す。

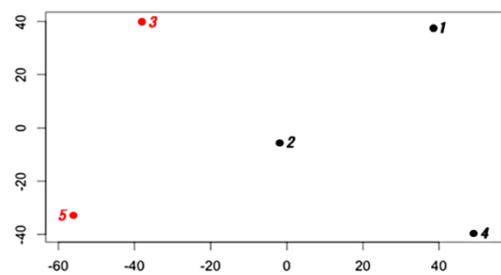


図 14 受信端末のクラスタリング

これよりノード 3 と 5、ノード 1 と 2 と 4 がそれぞれ同一クラスタに属することがわかる。

4.5.4 クラスタ内のファイル転送方法

受信端末のクラスタリングによって、複数のクラスタが生成される。各クラスタに属する受信端末数はクラスタによって異なる。クラスタ内のファイル転送は、スケジューリングアルゴリズムのルール 1 にしたがって、1 対 1 通信またはスター型ネットワークによるファイル転送を行う。クラスタ内の端末数によってファイル転送方法も異なり、

以下の3つに分類される。

1. クラスタ内の端末数が1の場合

この場合、クラスタ内の端末はノード0からファイルを受信するだけで、他の端末にファイルを転送することはない。

2. クラスタ内の端末数が2の場合

この場合、ノード0からファイルを受信する代表ノード(中継ノード)を決定する。代表ノードは、ノード0とのRSSIが最も小さい端末が選ばれる。これによって、スループットが大きい経路を選択でき、クラスタ内の端末に短時間でファイルを転送することができる。ノード0からファイルを受信した代表ノードは、同一クラスタのもう一つの端末にファイルを転送する。

3. クラスタ内の端末数が3以上の場合

クラスタ内の端末数が2のように、代表ノードを決定する。代表ノードは、クラスタの重心から最も近い端末を代表ノードとする。これによって、クラスタ内の残りのノードにファイルを転送する際、端末間のスループットの差異を考慮することなく、比較的安定したスループットでファイルを転送することができる。ノード0からファイルを受信した代表ノードは、クラスタ内の残りの端末とスター型ネットワークを構成し、スター型ネットワークのOwnerとしてファイルを転送する。ファイル転送時間は、4.4.3節のファイル転送時間にしたがって計算する。

4.5.5 ファイル転送時間最小化

クラスタごとにファイル転送時間の計算を行う。図15が示すようにクラスタリングされた場合を想定して、計算方法を述べる。

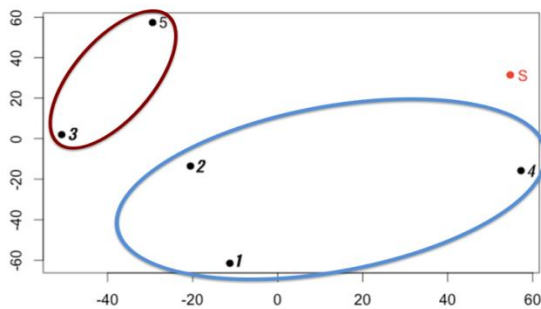


図15 受信デバイスのクラスタリング例

ノード3,5が属するクラスタをクラスタA、ノード1,2,4が属するクラスタをクラスタBとし、クラスタA、クラスタBの全ノードにファイルが行き渡るまでの時をそれぞれTA, TB示す。TAとTBを比較し、送信時間が大きいクラスタへ優先してノード0がファイルを転送する。図15

において、クラスタBのファイル転送時間TBの方がTAより大きいとすると、ノード0はクラスタBの代表ノードにファイルを転送し、そのあとクラスタAの代表ノードにファイルを転送する。クラスタ数が増加した場合も、各クラスタのファイル転送時間を比較し、ノード0は転送時間が大きいクラスタへ順にファイルを転送する。クラスタAの代表ノードをPA、クラスタBの代表ノードをPBとすると、クラスタリングに基づくファイル転送における所要時間の最小値は、式4.12のように表すことができる。

$$T^{total} = T_{0P_B} + \max \left(\sum_{\substack{j \neq 0 \\ j \neq P_B \\ j \in B}} T_{P_B j}, T_{0P_A} + \sum_{\substack{i \neq 0 \\ i \neq P_A \\ i \in A}} T_{P_A i} \right) \quad (4.12)$$

クラスタリングに基づくファイル転送における所要時間の最小値が求まると、式4.5と比較し、

$$\sum_{j \neq 0} T_{0j} \geq T_{0P_B} + \max \left(\sum_{\substack{j \neq 0 \\ j \neq P_B \\ j \in B}} T_{P_B j}, T_{0P_A} + \sum_{\substack{i \neq 0 \\ i \neq P_A \\ i \in A}} T_{P_A i} \right) \quad (4.13)$$

を満たす場合、クラスタリングを用いたネットワーク形態を決定する本手法が有効であると判断される。

5. 評価

本実験では、FTroidを用いずに1台の端末がすべてのデバイスに向けてファイルを転送する場合(逐次転送型)と、FTroidによって決定されたネットワーク形態を参照してファイル転送を行う場合とを比較することで、FTroidの性能検証を行う。実際の通信環境で考えられるリコネクションや同時通信時のスループット低下をすべて考慮した上で、ランダムに生成したRSSI行列を用いて実験を行なった。RSSI行列は総端末数ごとに10通り用意し実験を行い、それぞれの所要時間の平均を算出し、結果を求めた。送信するファイルサイズは、5MBから50MBまで、5MBずつ増加させた。また、あるノード数における10回の施行の中で、パターン1での最短転送時間を T_S^{total} 、FTroidを用いた時の T^{total} を T_F^{total} として、その差を

$$\Delta T = T_F^{total} - T_S^{total} \quad (5.1)$$

と定義する。 $\Delta T < 0$ の場合FTroidの方がパターン1と比較し、短い転送時間であることが分かる。

5.1 N=5 の場合のシミュレーション

N=5 の場合、考えられるネットワーク形態は 5 パターンである(図 16)。これらの中から所要時間が最小となるノード配置を決定し、各ネットワーク形態の最短転送時間の中から最も所要時間が短いものを結果に示す。

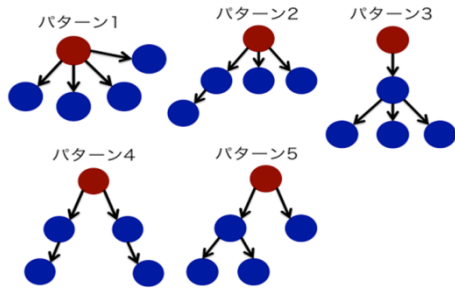


図 16 N=5 の場合のネットワーク形態のパターン候補

本シミュレーション結果を図 17 に示す。図 17 は $\omega = 0$ でシミュレーションを行なった結果を赤線、 $\omega = 5.5$ でシミュレーションを行なった結果を青線に表示している。各ファイルサイズを 10 回送信した時の平均送信時間を丸記号、その上の横棒が 10 回の中の最長送信時間、下の横棒が最短送信時間を示す。

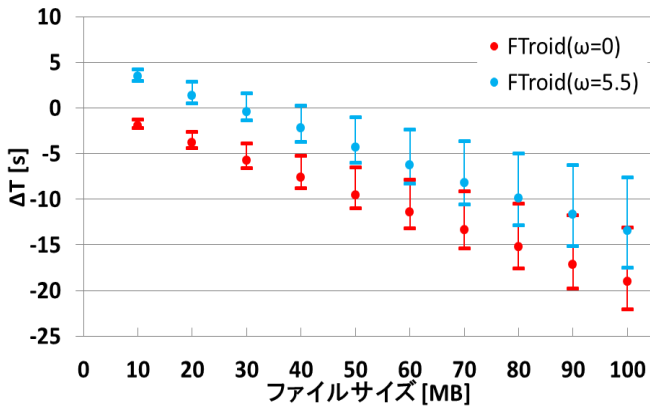


図 17 N=5 の場合のシミュレーション結果

5.2 N ≥ 6 の場合のシミュレーション

N ≥ 6 の場合は、クラスタリングに基づく近似的なネットワーク形態を決定し、そのネットワーク形態における所要時間を算出する。本シミュレーションでは、総デバイス数が 6 から 10 までのファイル転送を行う。10 MB、30MB、50 MB のファイルを転送した場合のファイル転送時間の平均結果をそれぞれ図 18、図 19、図 20 に示す。

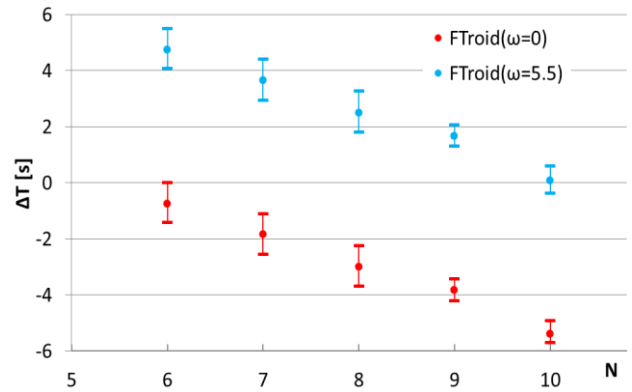


図 18 N ≥ 6 の場合のシミュレーション結果(10 MB)

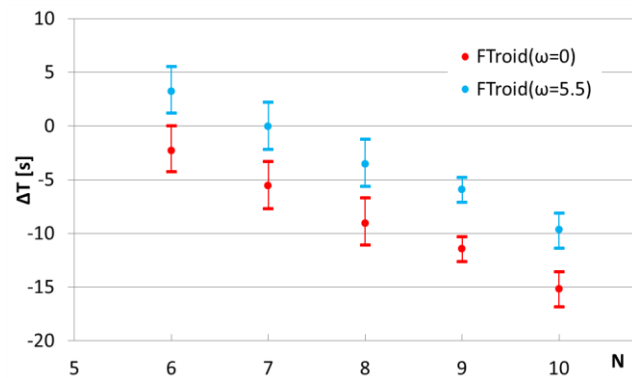


図 19 N ≥ 6 の場合のシミュレーション結果(30 MB)

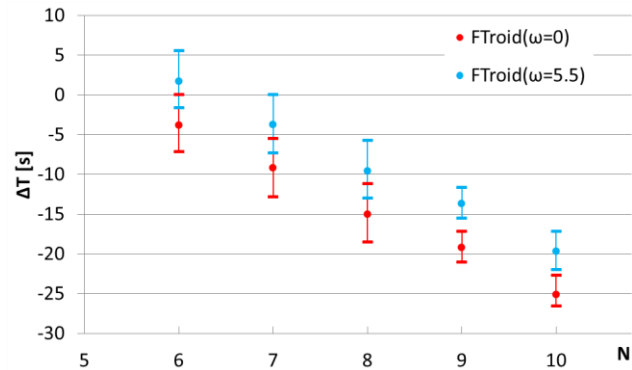


図 20 N ≥ 6 の場合のシミュレーション結果(50 MB)

5.3 結果

本項では最初に、5.1.1 項で行なった N=5 の場合シミュレーション結果である図 17 について述べる。この図より FTroid による転送ファイルサイズが増加するにつれて、逐次転送型と比較した転送時間が大きく短縮されることが分かる。また、FTroid は約 30MB 以上のファイル転送で、逐次転送型よりも短い送信時間でファイルを送れる可能性を示した。また、約 50MB 以上のファイル転送で逐次転送型よりも必ず短い送信時間で送信できる事が明らかになった。

続けて 5.1.1 項と 5.1.2 項で行なったシミュレーション実験の中から、10 MB、30MB、50 MB のファイルを転送した場合の結果をまとめたものを図 21、図 22、および図 23 に

示す。

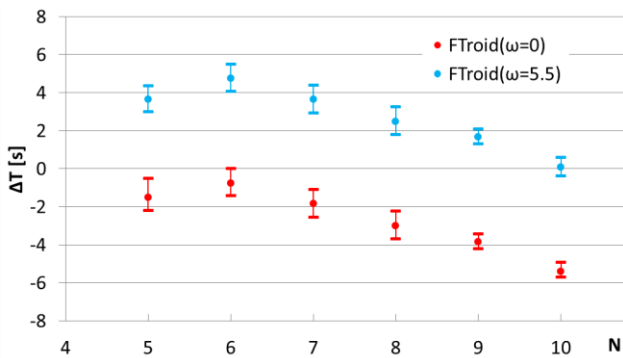


図 21 FTroid の実験結果(10 MB)

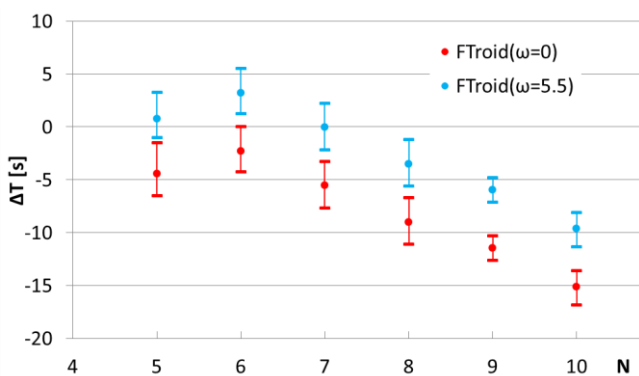


図 22 FTroid の実験結果(30 MB)

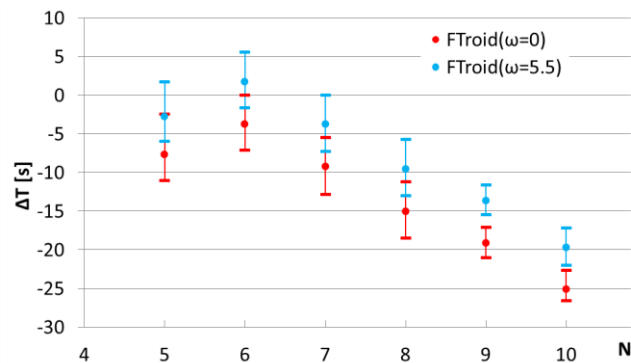


図 23 FTroid の実験結果(50 MB)

これより、10MB のファイル送信時は $N \geq 10$ 、30MB のファイル送信時は $N \geq 7$ といったように、送信ファイルサイズの増加に伴い、逐次転送型の最短転送時間より短い時間で転送できる可能性がある必要総端末数が減少することが判明した。同様に、約 30MB のファイル送信時に $N \geq 8$ の場合、約 50MB のファイル送信時に $N \geq 7$ の場合で逐次転送型の最短転送時間より短い時間で転送できることが判明した。

以上より、総端末数または送信ファイルサイズが増加するにつれて、FTroid の転送時間を短縮することが可能で

あり、 $N=5$ の場合約 50MB 以上のファイル転送で、 $N \geq 8$ の場合約 30MB のファイル転送で、 $N \geq 7$ の場合約 50MB のファイル転送で逐次転送型と比較した FTroid の性能の優位性を示すことができた。

6. 考察

5 章より、逐次転送型と比較した FTroid の優位性を示すことに成功した。これは $N \geq 6$ の場合の近似解の算出アルゴリズムであるネットワーク形態数の抑制と同一クラスター内転送を行う送信形式が、設計時の目録通りに働いているからと考えられる。また、本研究を行なった時点では Wi-Fi Direct のリコネクション時間 ω は約 5.5 秒として計算を行っているが、技術の進歩によりこの時間が短くなることで、図中の FTroid($\omega=0$)の結果へ近づき、逐次転送型と比較した場合のより大きな優位性を示すことが期待できる。

また、図 21、図 22、図 23 内の $N=6$ の場合の結果が他の結果と比べ、 ΔT の値が大きくなっていることが分かる。これは、ランダムに生成した 10 つの RSSI 行列の中に、全ての受信ノードが送信ノードの付近に配置されるような、 ω が T^{total} に大きく影響するような RSSI 値が設定されてしまった為、 T_5^{total} が極端に小さい値となり、 $N \neq 6$ の場合と比較して ΔT の値が大きくなったと推測する。

7. むすび

本論文では、デバイス間通信におけるファイル転送最適化手法の設計と実装について述べた。複数のデバイス間でファイルを共有する際、デバイス間のスループットに基づいた所要時間を最も最小化することができるネットワーク形態およびルートを決出し、より効率的にファイルを転送するプロトコル、FTroid を実装した。総デバイス数 N が 5 台以下の場合、考えられるすべてのネットワーク形態での所要時間の最小値を求め、最も所要時間が短縮できるネットワーク形態を決出した。第 5 章の実験結果より $N=5$ の場合約 50MB 以上のファイル転送で、 $N \geq 8$ の場合約 30MB のファイル転送で、 $N \geq 7$ の場合約 50MB のファイル転送で逐次転送型と比較した FTroid の性能の優位性を示すことに成功した。

参考文献

- [1] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker, "LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice", 2009
- [2] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker, "LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice 2nd Edition", 2011
- [3] Shiro Sakata, Hidenori Aoki, Kenichi Mase, "アドホックネットワークと無線 LAN メッシュネットワーク", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J89-B, No.6, pp. 811-823, 2006
- [4] Chia-Hao Yu, Doppler K., Ribeiro C.B., Tirkkonen O., "Resource Sharing Optimization for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks", IEEE Transactions on Wireless

Communications, pp.2752-2763, 2011

- [5] Seppälä, Jaakko, et al. "Network controlled device-to-device (D2D) and cluster multicast concept for LTE and LTE-A networks." *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2011 IEEE*. IEEE, 2011.
- [6] Asadi, Arash, and Vincenzo Mancuso. "WiFi Direct and LTE D2D in action." *Wireless Days (WD), 2013 IFIP*. IEEE, 2013.
- [7] Zheng Lu, Gustavo de Veciana, "Application-Aware Opportunistic D2D Link Schedulers: Traffic Offloading and User Perceived QoS", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pp.1-14, 2014
- [8] J.W.Hui and D.Culler, "The dynamic behavior of a data dissemination protocol for network programming at scale," *Proc. of ACM SenSys 04*.
- [9] 山田真太郎, 高山潤也, 大山真司, "複数の無線接続強度情報を用いた距離不等式に基づく無線端末の位置測位", *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol. J91-B, No. 6, pp.685-694
- [10] Dou, Niu, et al. "3D localization method based on MDS-RSSI in wireless sensor network." *Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS), 2010 IEEE International Conference on*. Vol. 2. IEEE, 2010.
- [11] Wei, Bing, Wu Chen, and Xiaoli Ding. "Advanced MDS based localization algorithm for location based services in Wireless Sensor Network." *Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service (UPINLBS), 2010. IEEE*, 2010.