

大容量コンテンツ配信を目的とした 携帯電話網・Bluetooth 併用協調ダウンロード手法

高松 悠^{†1} 布川 雄大^{†1} 孫 為華^{†1}
山内 由紀子^{†1} 安本 慶一^{†1} 伊藤 実^{†1}

近年、YouTube などの動画共有サイトが広く普及し、携帯電話で動画などの大容量コンテンツをダウンロードすることも広まりつつある。多数のユーザが大容量のコンテンツの配信を要求すると、携帯電話網の通信帯域を圧迫し、他のサービスへ影響を与えることが問題となり得る。また、通信事業者によって各携帯端末あたりのパケット転送量に制限が設けられているため、この制限を超えてコンテンツをダウンロードすることはできない。本稿では携帯電話網と Bluetooth を併用し、携帯電話網の使用を抑制する協調ダウンロード手法を提案する。提案手法では、大容量コンテンツをサイズの小さい断片に分割し、ユーザ間で Bluetooth 通信により断片を交換する。ユーザが指定するコンテンツ取得期限内にファイルの取得が完了できるようにするため、他のユーザと交換できない断片についてのみ各携帯端末が携帯電話網を利用して取得する。提案手法では、各ユーザが移動予定経路と欲しいコンテンツをサーバに登録し、それらの情報をもとに各ユーザがいつどのユーザと Bluetooth 通信が可能となるかを計算できると仮定し、ユーザ間で交換する断片数を最大化するアルゴリズムを提案する。

A Cooperative Download Method for Large-Size Contents Dissemination through Bluetooth-Cellular Hybrid Network

YU TAKAMATSU,^{†1} YUDAI NUNOKAWA,^{†1} WEIHUA SUN,^{†1}
YUKIKO YAMAUCHI,^{†1} KEIICHI YASUMOTO^{†1}
and MINORU ITO^{†1}

Recently, due to the spreading of movie sites such as YouTube, downloading large-size contents of such as movie file, etc. by the cellular phone is becoming popular. However, the high network load occurs when a lot of users request the delivery of such contents. In order to avoid this problem, the telecommunications providers made the limitation in data amount downloaded by each cellular phone. For this reason, users cannot download contents with the data size over the limitation. In this paper, we propose a cooperative download method

for large-size contents dissemination through Bluetooth-Cellular hybrid network. By our method, each content is divided into multiple small sized chunks so that users exchange the chunks with each other through Bluetooth network. For the chunks that cannot be obtained from other users, the user downloads them through the cellular network, to meet the content acquisition deadline specified by the user. We assume that each user registers to the server the information about his/her requested contents and planned route to a destination so that the contact time with other users can be calculated. We propose an algorithm to maximize the number of chunks that can be exchanged among users under the assumption.

1. はじめに

近年、YouTube などの動画共有サイトが広く普及している。また、携帯電話向けの動画コンテンツ配信サービスなども登場し、将来的には携帯電話網を介した大容量コンテンツの取得が一般的になると予測できる。現在、携帯電話網の通信速度の向上やパケット料金定額制度により、ユーザはいつでも、どこでも手軽に大容量のコンテンツのアップロード、ダウンロードを行うことができる。しかし、携帯電話網の通信帯域は限られているため、多数のユーザが同時に大容量のコンテンツを携帯電話網を介して送受信すれば、送受信速度の低下や他のサービスの品質低下を招く。そのため、現状では、各通信事業者はユーザごとのパケット転送量に上限を設定し、特定のユーザが帯域を占有することを防止している。しかし、このような方法は多数のユーザによる大容量コンテンツのダウンロードがネットワークに与える負荷の問題を本質的には解決していない。

ネットワークの圧迫を軽減するために、BitTorrent¹⁾ では、コンテンツをダウンロードするユーザ間でファイルの一部（断片と呼ぶ）を交換することで、ネットワークの負荷を軽減する方法を提供している。しかし、ユーザ間で断片を交換する際、必要なファイルを構成する全ての断片の取得に長時間かかる問題（ラストピース問題）や、モバイル環境においては、ユーザ端末の電力消費が激しいといった新しい問題が出てくる。

本稿ではユーザの予定経路情報に基づき、各モバイルユーザ間で計画的にコンテンツの断片を Bluetooth を用いて交換し、端末の電力消費を抑えながら、携帯電話網の負荷を軽減する協調ダウンロード手法を提案する。提案手法では、Bluetooth を利用して、ユーザ間でコンテンツの断片を交換することにより、多数ユーザの大容量コンテンツのダウンロードに

^{†1} 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

よる携帯電話網への負荷を軽減し、かつ、各ユーザが指定したコンテンツの受信期限（デッドライン）までにユーザが要求したコンテンツの全ての断片を取得できることを保証する。携帯電話網では各端末（ノード）の移動や Bluetooth の通信範囲の制約により、ノード間で Bluetooth を利用し通信できるタイミングが限定されるため、断片の取得、交換を計画的に行う必要がある。そこで、本稿では、各ノードができるだけ多くの断片を Bluetooth を介して取得できるようにするため、各ユーザが欲しいコンテンツの情報と予定経路情報をサーバに事前に登録し、サーバが、各ノードがいつどのノードと Bluetooth で通信を行えるかを示す情報（コンタクトテーブル）を計算できるという仮定を置き、できるだけ多くの断片がユーザ間で交換されるような断片交換スケジュールを算出するアルゴリズムを提案する。

提案アルゴリズムでは、コンタクトテーブルの内容をもとに、各ノードの遭遇時間にノード間で交換する断片、および、実行開始時に各ノードで携帯電話網から取得しておく断片をグリーディに決定する。デッドラインまでに他のユーザから取得できない断片については、各ノードが携帯電話網から取得する。以上の処理により、携帯電話網の負荷を削減しながら、デッドラインまでに要求するコンテンツの全ての断片が取得できることを保証する。

以下、2章では、本研究の関連研究について触れ、3章で問題設定について述べる。4章にて提案手法について詳しく述べる。5章で今後行う予定の評価実験について述べ、6章でまとめを述べる。

2. 関連研究

多数のユーザがファイルを同時にダウンロードすることでコンテンツサーバおよびネットワークへの負荷が発生する。この負荷を軽減する手法として、同じファイルをダウンロードするノード群が互いに協力してダウンロードを行う BitTorrent¹⁾ が考案され、広く普及しつつある。BitTorrent はコンテンツを複数の小さな断片に分割し、各断片をユーザ間で交換できるようにすることでネットワークおよびサーバの負荷を軽減している。しかし、BitTorrent では、ダウンロードプロセスの終盤において必要な断片を持っているノードが見つからないために、ダウンロードにかかる時間が長くなってしまおうという問題がある²⁾。BitTorrent において、断片の取得順序を工夫することで、ダウンロードにかかる時間を短縮する研究もなされている。文献 3) では、ダウンロードが終了しそうなユーザが必要とする断片を優先的に集め、交換することでダウンロードが終了するまでにかかる時間を短縮する手法を提案している。

上記で述べた手法は、有線ネットワーク環境を想定しており、ユーザのモビリティにより

通信可能なユーザが頻繁に変化する環境にそのまま利用できない。ノードが移動するモバイル環境において BitTorrent を効果的に適用するには、(i) ノードのモビリティによる通信範囲の変化、(ii) 端末の消費電力、(iii) ダウンロード成功率および完了時間、を考慮する必要があると考えられる。

無線ネットワークにおいて、モバイル端末同士で効率的なファイル交換を行うために MANET や P2P 技術を用いた手法の研究が行われている。Conti らは、MANET の環境にピュア P2P である Gnutella を実装した場合のノードのモビリティやネットワークの分断、ノードの出入り等によるパフォーマンスやオーバーヘッドを調査し、クロスレイヤでの最適化を行っている⁴⁾。Rajagopalan らは、MANET 上での BitTorrent の仕組みを提案し実装している⁵⁾。モビリティと断片のサイズについてパフォーマンスが評価され、彼らの手法がネットワークの分断にも有効であることが述べられている。Nandan らは、車車間通信ネットワークを対象として BitTorrent を基にした広告配信システムを提案している⁶⁾⁻⁸⁾。これは道路脇に組み込まれたアクセスポイントや車々間通信 (VANET) を用いて通信を行う。この手法は移動ノードとして車群を成して高速移動する車を対象としている。持ち運び可能な端末間でのファイル交換の効率を改善する研究として、McNamara らは通勤や通学中に通信可能な他の端末の中から、有益なファイルを持っている可能性が最も高い端末を特定し、ファイルの取得を行う手法を提案している⁹⁾。また、文献 10) では、電車などの公共交通機関利用中に頻繁に出会うユーザのなかで、通信時間が十分に確保できるユーザを予測しファイル交換を行う手法を提案している。

上記の研究は、上記 (i) の端末のモビリティに伴う通信範囲の変化を考慮しているが、断片の取得・交換を端末間でのみ行うため、動画などの大容量ファイルをダウンロード対象とした場合には、ダウンロード成功率や完了時間の点で効率が悪くなると予想される。つまり、上記 (iii) のダウンロード成功率・完了時間を十分に考慮していない。

上記 (ii) の端末の消費電力を考慮した研究として、Bluetooth を用いた協調ダウンロード手法の研究が幾つかなされている。文献 11), 12) では、Bluetooth の特徴を考慮することで、電力消費を抑えている。効率よく交換できるようにパケットサイズを選択し、ファイルの断片を交換することでファイルの取得を行う手法が提案されている。この手法では、Bluetooth アクセスポイントからコンテンツの断片を取得するため、端末が断片を取得する機会が制限されている。そのため、コンテンツ取得のデッドラインが考慮されていない。また、Bluetooth アクセスポイントにアップロードされるコンテンツの種類が多数の場合には性能が悪化することが報告されている。

上記 (iii) のダウンロード成功率・完了時間を考慮した協調ダウンロード手法として、著者らは、文献 13), 14) において、動画広告配信を目的とした携帯電話網と WiFi を併用する協調ダウンロード方式を提案した。この手法では、ダウンロードを行いたいコンテンツや既に所持している断片の情報を近隣端末間で交換し、確率的な方法に基づいて、各端末が他の端末とできるだけ重複なくそれぞれの断片を携帯電話網からダウンロードするか、WiFi 経由で近隣端末に配布する。また、各端末はコンテンツの受信期限を設定することができ、経過時間に対する断片取得率をもとに、携帯電話網からの断片のダウンロード率を動的に調整することで、期限までのダウンロード完了を達成している。しかし、この手法は、WiFi を介した通信を頻繁に行うため電力を多く消費する点や、断片の交換を計画的に行っていないため、通信可能な範囲が狭い状況では、効率的に断片の取得・交換が行えない点が問題点として挙げられる。例えば、Bluetooth のような通信範囲が狭い無線ネットワークにはこの手法は適用できない。

以上述べたとおり、既存研究では、(i) ノードのモビリティによる通信範囲の変化、(ii) 端末の消費電力、(iii) ダウンロード成功率および完了時間、の全てを考慮した協調ダウンロード方式は実現されていない。本稿では、モバイルユーザへの大容量コンテンツ配信を目指し、上記 (i)-(iii) を考慮した、携帯電話網と Bluetooth を併用する協調ダウンロード手法を提案する。

3. 問題設定

本章では、複数携帯端末による携帯電話網と Bluetooth を併用する協調ダウンロード問題の定式化を行う。本稿で使用する記号の一覧を表 1 に示す。

全てのユーザがどのコンテンツの断片も持っていない状態から協調ダウンロードをスタートする場合をコールドスタートと定義する。一方、既に断片を取得済みのユーザが存在する状態からスタートする場合をホットスタートと定義する。本章では、コールドスタート時について、問題を定義する。なお、ホットスタート時についても同様の方法で問題を定義できる。

3.1 仮定

3.1.1 通信モデル

本研究で想定した環境では、各端末 u は携帯電話網と Bluetooth による通信機能を使用できると仮定し、携帯電話網からダウンロードしたコンテンツの断片を Bluetooth を使い近隣端末と交換することで、携帯電話網の圧迫を軽減することを目指す。

表 1 各記号の説明

記号	記号の説明
u	ユーザ・端末
c	コンテンツ
ch	コンテンツの断片
$Size$	断片のサイズ
$u.Contents$	ユーザがダウンロードしたいコンテンツの集合
$u.Chunk$	ユーザが欲しい断片の集合
$c.deadline$	コンテンツの受信期限
$ch.deadline$	コンテンツの断片の受信
BW_c	携帯電話網の帯域
CAP_c	携帯電話網に同時に接続できる端末数
BW_b	Bluetooth の帯域
$Range$	Bluetooth の通信範囲
$Neighbor$	近隣端末の集合
s	サーバ
$u.T$	ユーザが目的地に到着する時刻

全携帯電話端末の集合を $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ とする。各ユーザはそれぞれ 1 台の端末を持つとし、 $u \in U$ はユーザもしくは端末を表すとする。各端末が使用可能な携帯電話網の通信帯域（伝送容量）を BW_c とし、携帯電話網の各基地局に同時に接続できる最大端末数を CAP_c とする。Bluetooth で通信可能な距離を $Range$ とする。各端末 u は Bluetooth を使用し、 u を中心とした半径 $Range$ の円内にいる他のユーザ端末と通信を行うことができる。Bluetooth の伝送容量を BW_b とする。時刻 t にユーザ端末 u と通信可能なユーザ端末の集合を $Neighbor(u, t) \subseteq U$ とする。

3.1.2 システムモデル

コンテンツの集合を $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ とする。各コンテンツ c_i は複数の同一サイズ $Size$ の断片から構成されている。コンテンツ c_i の j 番目の断片を $ch_{i,j}$ と表記する。ユーザ u がダウンロードしたいコンテンツの集合を $u.Contents$ とし、各要素を $u.c_i \in u.Contents$ とする。ユーザ u が必要なコンテンツの断片の集合を $u.Chunk$ とし、各要素を $u.ch_{i,j} \in u.Chunk$ とする。ユーザ u の各コンテンツ u_i の受信期限を $u.c_i.deadline$ と表記する。また、コンテンツ c_i の j 番目の断片 $ch_{i,j}$ の受信期限は c_i の受信期限と同じに設定され、 $ch_{i,j}.deadline$ と表記する。

コンテンツサーバ s はコンテンツの集合 C を保持しており、各端末が携帯電話網を通じてアクセスできる固定ネットワークに接続されているとする。各端末はサーバに格納された

<i>User</i> \ <i>TimeSlot</i>	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
u_1		u_2		u_4	u_3	u_7		u_8	
u_2		u_1	u_3			u_4	u_8	u_7	
u_3			u_2	u_7	u_1				u_5
u_4	u_5			u_1	u_8	u_2			u_6
u_5	u_4			u_8		u_6			u_3
u_6			u_7			u_5			u_4
u_7		u_8	u_6	u_3		u_1		u_2	
u_8		u_7		u_5	u_4		u_2	u_1	

表 2 コンタクトテーブルの例

任意のコンテンツの任意の断片を携帯電話網を通じてダウンロードできる。

各ユーザ u は、自身が欲しいコンテンツの情報、および、現在地から移動予定目的地までの経路情報をサーバ s に登録するとする。ユーザが登録した経路情報からサーバ s は各ユーザ端末が他のユーザ端末と Bluetooth で通信可能な時間が予測できるとする。予測した通信可能な時間から表 2 のようなユーザ間の通信可能な時間を表したコンタクトテーブルが導出できるとする。

表 2 において、*TimeSlot*、 t_1, t_2, \dots は現在時刻からの時間経過のある時間間隔（例えば 1 分間隔）で区切った時間帯を表している。表 2 では、ユーザ u_1 は、タイムスロット t_2, t_4, t_5, t_6, t_8 に、それぞれ、ユーザ u_2, u_4, u_3, u_7, u_8 と Bluetooth 通信可能な範囲に居合わせる予定であることを表している。

3.2 問題定義

ユーザ u に要求された全てのコンテンツの受信期限（例えば、目的地に到着する時刻）を $u.T = u.c.deadline$ と表記する。要求されたコンテンツをダウンロードする際に、全てのユーザ端末が携帯電話網を経由して取得するデータ量を最小化する問題を定式化する。

ユーザ端末 u が断片 ch を時刻 t に携帯電話網からダウンロードするアクションを $D(u, ch, t)$ とする。また、ユーザ端末 u が断片 ch を時刻 t に Bluetooth を使い送信するアクションを $S(u, ch, t)$ 、受信するアクションを $R(u, ch, t)$ とする。全てのユーザが時刻 $u.T$ までに行うダウンロードアクション、送信アクション、受信アクションの集合をそれぞれ *Download*、*Send*、*Receive* とする。

各ユーザ u が要求するコンテンツの断片 $u.ch_{i,j}$ は携帯電話網からダウンロードするか Bluetooth を使い受信しなければならない。この制約式を式 (1) で示す。

$$\forall u \in U, \forall i, \forall j, u.ch_{i,j} \in u.Chunk, \exists t, D(u, ch_{i,j}, t) \vee R(u, ch_{i,j}, t) \quad (1)$$

全ての断片はデッドラインまでに取得されなければならない。携帯電話網から断片をダウンロードするには $Size/BW_c$ の時間がかかる。この制約式を式 (2) で示す。

$$\begin{aligned} \forall D(u, ch, t) \in Download, t + Size/BW_c \leq ch.deadline \\ \wedge \forall R(u, ch, t) \in Receive, t \leq ch.deadline \end{aligned} \quad (2)$$

断片を送信するには前もってダウンロードが受信している必要がある。この制約式を式 (3) で示す。

$$\begin{aligned} \forall S(u, ch, t) \in Send, (\exists D(u, ch, t') \in Download, \\ t' + Size/BW_c < t \vee \exists R(u, ch, t'') \in Receive, t'' < t) \end{aligned} \quad (3)$$

アクション *Send* では、Bluetooth の通信範囲内にいる端末にしか送信できない。送信時刻 t をパケットを送り始めた時刻、受信時刻 t' を送信端末がパケットを送り終えた時刻とすると、この制約式は式 (4) で与えられる。

$$\forall S(u, ch, t), \exists R(u', ch, t'), u' \in Neighbor(u, t) \wedge t' = t + Size/BW_b \quad (4)$$

携帯電話網を介して同時にダウンロードを行える端末数は制限される。この制約式を式 (5) に示す。

$$\forall D(u, ch, t), |\{u' | D(u', ch', t'), u \neq u', |t - t'| \leq Size/BW_c\}| \leq CAP_c \quad (5)$$

上記の制約を満たし、かつ携帯電話網の使用量を最小化するアクションの集合 *Download*、*Send*、*Receive* を求めることが本問題の目的である。本問題の目的関数を式 (6) に示す。

$$minimize |Download| \quad subject \ to \ (1) - (5) \quad (6)$$

上記の問題は、典型的な組み合わせ最適化問題であり、最適解を実用時間内で求めることは困難である。そのため、次章において、準最適解を求めるヒューリスティックアルゴリズムを提案する。

4. 提案手法

本章では、前章で定義した問題を解くための基本方針を示し、経路情報を利用したコンテンツ交換アルゴリズムを示す。

4.1 基本方針

Bluetooth を利用し断片を交換できる可能性のある 2 台の端末が携帯電話網を使い同じ断片をダウンロードすることは携帯電話網の使用量の面で効率的でない。このような状況を避けるため、提案手法は携帯電話網の使用量を軽減することを目標に、各端末が Bluetooth で通信可能になる際に断片を交換する。交換によって取得できない断片は携帯電話網からダウンロードする。提案手法を実現するために、以下の 3 点を基本方針とし、各端末がどの時

間にどの断片についてダウンロード、送信、受信のアクションを行うかをスケジューリングする。

- (1) 各端末に公平に断片の送信を行わせるため、各コンテンツを同じサイズの複数の断片に分割する。
- (2) 携帯電話網の使用量をできるだけ削減するため、移動中に他のユーザ端末と Bluetooth でコンテンツの断片を交換する。
- (3) 各端末は、他の端末から受け取れない断片を携帯電話網を使ってダウンロードすることで、受信期限までにコンテンツ全体の取得を完了させる。

仮定より、各ユーザがサーバに経路情報を登録すると、各ユーザ端末がどの端末という通信可能範囲に居合わせるかを示す接触テーブル(表2)が導出できる。接触テーブルを利用し各ユーザがいつどのアクションを行うかを決定する。

4.2 アルゴリズム

本アルゴリズムは、各ユーザがいつどの断片についてどのアクションを行うかを決定する。本アルゴリズムでは、携帯電話網を利用するアクションであるダウンロード回数をできるだけ少なくする。ダウンロードの回数を削減するには受信期限までに多くの断片をユーザ間で交換する必要がある。そこで、より多くの断片をユーザ間で交換できるよう、同じコンテンツを取得したい複数のユーザが、それぞれ、そのコンテンツの異なる断片をダウンロードすることで、それらユーザの端末間で断片を交換する機会を最大限に活用できるようにする。図1に示すように、本アルゴリズムは接触テーブル分割フェーズとアクション決定フェーズからなる。

4.2.1 接触テーブル分割フェーズ

コンテンツ毎にアクションの決定を行うため、接触テーブルから各ユーザがサーバに登録した欲しいコンテンツに関する情報をもとに、同じコンテンツを要求するユーザのスケジュールを抽出する。抽出したユーザのスケジュールからコンテンツ毎の接触テーブルを作成する。作成したコンテンツ毎の接触テーブルは、そのコンテンツを要求しているユーザのみを要素としたものになる。例として、表2を使い説明する。コンテンツ c_1, c_2 を要求しているユーザをそれぞれ $\{u_1, u_4, u_6, u_7\}, \{u_2, u_3, u_5, u_8\}$ とすると、コンテンツ毎の接触テーブルはそれぞれ表3, 4のようになる。

4.2.2 アクション決定フェーズ

分割した接触テーブルからコンテンツ毎に各端末のアクションを決定する。

ユーザは初期状態では断片を何も持っていないため、Bluetooth 通信で他のユーザと断片

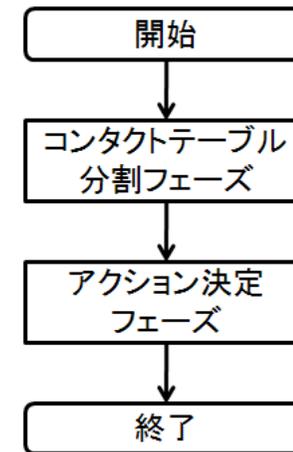


図1 アルゴリズムのフローチャート

を交換するには、最初に携帯電話網を利用しコンテンツの断片を取得する必要がある。そこで各ユーザは最初に一定時間携帯電話網からのダウンロードにより断片を取得する。その後、取得した断片を移動中に会ったユーザと交換するようにアクションをスケジューリングする。

最初に、Bluetooth 通信で利用する断片を取得するために、各ユーザは最初にダウンロードを行う。この時ダウンロードする断片は他のユーザと違うものを選択すると、後に通信可能になる他のユーザと持っていない断片を交換することができるので、携帯電話網の使用量を軽減できる。また、同じコンテンツを要求しているユーザ間で公平に携帯電話網を使用するように、最初にダウンロードする断片数が等しくなるようにする。表3,4では、コンテンツ c_1 の断片 $ch_{1,1}, ch_{1,2}, ch_{1,3}, ch_{1,4}$ を u_1, u_4, u_6, u_7 がそれぞれダウンロードし、コンテンツ c_2 の断片 $ch_{2,1}, ch_{2,2}, ch_{2,3}, ch_{2,4}$ を u_2, u_3, u_5, u_8 がそれぞれダウンロードする。ダウンロードは他のユーザと交換を開始する前に行われる。

次に、各ユーザの送信、受信のアクションを決定する。ユーザ間で公平に断片の交換を行うよう、他のユーザからある断片を受信した場合、そのユーザがまだ持っていない断片を送信する。各ユーザは同じコンテンツを要求している他のユーザと移動中に会った場合、Bluetooth で断片の送受信を行う。各ユーザが送信する断片は、最初に携帯電話網を利用し取得した断片とする。表3では、時刻 t_3 に u_6 と u_7 が断片 $ch_{1,3}, ch_{1,4}$ を交換し、時刻 t_4

TimeSlot \ User	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉
u ₁				u ₄		u ₇			
u ₄				u ₁					u ₆
u ₆			u ₇						u ₄
u ₇			u ₆			u ₁			

表 3 コンテンツ c₁ に関するコンタクトテーブル

TimeSlot \ User	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉
u ₂			u ₃				u ₈		
u ₃			u ₂						u ₅
u ₅				u ₈					u ₃
u ₈				u ₅			u ₂		

表 4 コンテンツ c₂ に関するコンタクトテーブル

に u₁ と u₄ が前もってダウンロードした断片 ch_{1,1}, ch_{1,2} を交換する．表 4 では，時刻 t₃ に u₂ と u₃ が断片 ch_{2,1}, ch_{2,2} を交換し，時刻 t₄ に u₅ と u₈ が前もってダウンロードした断片 ch_{2,3}, ch_{2,4} を交換する．また，表 3,4 では，ユーザは時刻 t₄ 以降に，他のユーザと断片を交換する機会があるので，その時更に必要な断片を交換する．u₁ の場合，時刻 t₆ に u₇ と断片を交換できるので，断片 ch_{1,1} と ch_{1,4} を交換する．

最後に，Bluetooth で送信と受信を行っていない時に携帯電話網から断片をダウンロードするようにスケジュールする．デッドラインまでに要求する断片がそろわない状況为了避免するため，断片の送受信を行っていない時に携帯電話網から断片をダウンロードする．この時ダウンロードする断片は受信のアクションで取得する可能性のない断片とする．表 3 の u₁ の場合，時刻 t₅, t₇, t₈, t₉ に最初にダウンロードした断片 ch_{1,1}，交換によって取得する断片 ch_{1,2}, ch_{1,4} 以外の断片を携帯電話網からダウンロードで取得する．

このようにコンテンツテーブル毎に各ユーザのアクションを決定していく．コンテンツの断片数を 5 とした場合の各ユーザのアクションは表 5,6 のようになる．D(ch_{i,j}) は，断片 ch_{i,j} を携帯電話網からダウンロードすることを表す．S(ch_{i,j}, u_n) は断片 ch_{i,j} をユーザ u_n に Bluetooth で送信することを表し，R(ch_{i,j}, u_n) は断片 ch_{i,j} をユーザ u_n から Bluetooth で受信することを表している．

コンテンツ毎のコンタクトテーブルに対して，各ユーザが自分のアクションを示した行の情報に対してアクセスすることで，どのように行動するか知ることができる．

4.3 提案手法の拡張

提案手法の拡張方法として，出会った他のユーザと欲しい断片を交換するだけでなく，他のユーザを中継することで欲しい断片を取得する間接交換が考えられる．間接交換を行うことで本来 Bluetooth で通信できないユーザが持っている断片の取得が可能になる．例として図 2 のように，ユーザ A とユーザ B が直接 Bluetooth で通信することはできない場合，間接交換を行うには，まず，ユーザ B が，後にユーザ A と通信可能になるユーザ C に持って

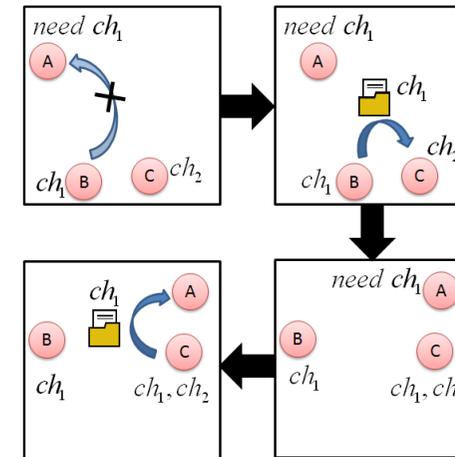


図 2 間接交換の例

いる断片を渡す．次に，ユーザ B からもらった断片をユーザ C がユーザ A に渡すことで，ユーザ A とユーザ B が直接通信を行わず，ユーザ A はユーザ B の断片を取得できる．携帯電話網の使用率を減らすには，Bluetooth でより多くの断片を取得する必要があるので，間接交換を行うことで携帯電話網の圧迫をさらに軽減できると考えられる．

5. 評価実験に向けての検討事項

本章では，提案手法を評価するためのシミュレーション実験についての検討事項を述べる．経路情報を利用し，ユーザの行動をスケジューリングすることの有効性を示すために，スケジューリングを行わずに新たに Bluetooth で通信可能になったユーザ端末から欲しい断片をランダムに取得する方法と提案手法を比較する．この実験では，提案手法の方がより携帯

<i>TimeSlot</i> <i>User</i>	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
u_1	$D(ch_{1,1})$			$S(ch_{1,1}, u_4), R(ch_{1,2}, u_4)$	$D(ch_{1,3})$	$S(ch_{1,1}, u_7), R(ch_{1,4}, u_7)$	$D(ch_{1,5})$		
u_4		$D(ch_{1,2})$		$S(ch_{1,2}, u_1), R(ch_{1,1}, u_1)$		$D(ch_{1,4})$		$D(ch_{1,5})$	$S(ch_{1,2}, u_6), R(ch_{1,3}, u_6)$
u_6	$D(ch_{1,3})$		$S(ch_{1,3}, u_7), R(ch_{1,4}, u_7)$		$D(ch_{1,5})$		$D(ch_{1,1})$		$S(ch_{1,3}, u_4), R(ch_{1,2}, u_4)$
u_7		$D(ch_{1,4})$	$S(ch_{1,4}, u_6), R(ch_{1,3}, u_6)$	$D(ch_{1,2})$		$S(ch_{1,4}, u_1), R(ch_{1,1}, u_1)$			$D(ch_{1,5})$

表 5 コンテンツ c_1 に関するコンタクトテーブル

<i>TimeSlot</i> <i>User</i>	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
u_2	$D(ch_{2,1})$		$S(ch_{2,1}, u_3), R(ch_{2,2}, u_3)$		$D(ch_{2,3})$		$S(ch_{2,1}, u_8), R(ch_{2,4}, u_8)$	$D(ch_{2,5})$	
u_3		$D(ch_{2,2})$	$S(ch_{2,2}, u_2), R(ch_{2,1}, u_2)$	$D(ch_{2,5})$		$D(ch_{2,4})$			$S(ch_{2,2}, u_5), R(ch_{2,3}, u_5)$
u_5	$D(ch_{2,3})$			$S(ch_{2,3}, u_8), R(ch_{2,4}, u_8)$	$D(ch_{2,1})$		$D(ch_{2,5})$		$S(ch_{2,3}, u_3), R(ch_{2,2}, u_3)$
u_8		$D(ch_{2,4})$		$S(ch_{2,4}, u_5), R(ch_{2,3}, u_5)$		$D(ch_{2,5})$	$S(ch_{2,4}, u_2), R(ch_{2,1}, u_2)$	$D(ch_{2,2})$	

表 6 コンテンツ c_2 に関するコンタクトテーブル

電話網の使用量が減少することが期待される。

次に、以下で示すパラメータを変化させた場合の携帯電話網の使用量を評価するシミュレーション実験を行うことを予定している。パラメータは以下のようにする。

- ユーザ数
- 全コンテンツ数
- ユーザが要求するコンテンツ数
- コンテンツ取得期限までの時間

ユーザ数または各ユーザが要求するコンテンツ数が増加すると、他のユーザと Bluetooth を使い通信可能になる機会が増加し、より多くの断片を他のユーザから取得できる。よって、携帯電話網の使用量が減少することが期待される。全コンテンツ数が増加すると、要求しているコンテンツが一致する他のユーザの数が減少する。そのため、他のユーザと断片を交換する機会が減り、携帯電話網の使用量が増加することが予想される。受信期限までの時間が長くなると、断片の交換に確保できる時間が増加するため、より多くの断片を他のユーザから取得できる可能性が高くなる。よって、携帯電話網の使用量が減少することが期待される。

6. ま と め

本稿では、多数のユーザに大容量コンテンツを配信する際の携帯電話網の使用量を軽減することを目的とした携帯電話網と Bluetooth を併用した協調ダウンロード手法を提案し

た。提案手法では、ユーザが経路情報をサーバに登録することで、各ユーザがいつ、誰と Bluetooth で通信可能になる時間が予測でき、コンタクトテーブルが作成できると仮定した。コンタクトテーブルを利用し、効率的に断片の交換が行えるようにスケジューリングを行い、各ユーザが Bluetooth でコンテンツの断片を交換することで携帯電話網の使用量を軽減する。今後、提案手法の有効性を示すため、スケジューリングを行わずに Bluetooth で通信可能になったユーザからランダムで欲しい断片を取得する方法と比較実験を行う。また、各パラメータが携帯電話網の使用量に与える影響を評価するための実験を行う。

今後の課題として、ホットスタート時のアルゴリズムの考案や、間接交換法の詳細設計および評価が挙げられる。

参 考 文 献

- 1) BitTorrent: <http://ww.bittorrent.com/>
- 2) Bhambe, A.R., Herley, C., and Padmanabhan, V.N.: "Analyzing and Improving a BitTorrent Network's Performance Mechanisms," *Proc. of 25th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2006)*, pp. 1-12 (2006).
- 3) Wu, C.-J., Li, C.-Y., and Ho, J.-M.: "Improving the Download Time of BitTorrent-like Systems" *Proc. of 2007 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC-07)*, pp.1125-1129 (2007).
- 4) Conti, M., Gregori, E., and Turi, G.: "A cross-layer optimization of gnutella for mobile ad hoc networks," *Proc. of ACM MobiHoc 2005*, pp. 343-354 (2005).
- 5) Rajagopalan, S. and Shen, C.-C.: "A Cross-layer Decentralized BitTorrent for Mobile Ad hoc Networks," *Proc. of 3rd Annual Int'l. Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems: Net-*

- works and Services (MOBIQUITOUS 2006)* (2006).
- 6) Nandan, A., Das, S., Zhou, B., Pau, G., and Gerla, M.: "AdTorrent: Digital Billboards for Vehicular Networks," *Proc. of 1st Int'l. Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications (V2VCOM 2005)*, pp. 286-294 (2005).
 - 7) Nandan, A., Tewari, S., Das, S., Gerla, M., and Kleinrock, L.: "AdTorrent: Delivering Location Cognizant Advertisements to Car Networks," *Proc. of 3rd Annual Conf. on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS 2006)*, pp. 203-212 (2006).
 - 8) Nandan, A., Tewari, S., and Kleinrock, L.: "Modeling Epidemic Query Dissemination in Ad-Torrent Network," *Proc. of IEEE Consumer Communications and Networking Conf. (CCNC 2006)*, pp. 1173-1177 (2006).
 - 9) McNamara, L., Mascolo, C. and Capra, L.: "Content Source Selection in Bluetooth Networks," *Proc. of Int'l Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services (MobiQuitous-07)*, pp.1-8 (2007).
 - 10) McNamara, L., Mascolo, C. and Capra, L.: "Media Sharing based on Colocation Prediction in Urban Transport," *Proc. of the 14th ACM Int'l. Conf. on Mobile computing and networking (MobiCom-08)*, pp.58-69 (2008).
 - 11) Jung, S., Lee, U., Chang, A., Cho, D.-K., and Gerla, M.: "BlueTorrent: Cooperative Content Sharing for Bluetooth Users" *Proc. of 2007 IEEE Int'l. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom-07)*, pp.47-56 (2007).
 - 12) Lee, U., Jung, S., Chang, A., Cho, D.-K., and Gerla, M.: "P2P Content Distribution to Mobile Bluetooth Users" *IEEE Trans. on Vehicular Technology (to appear)* (2010).
 - 13) Hanano, H., Murata, Y., Shibata, N., Yasumoto, K., and Ito, M.: "Video Ads Dissemination through WiFi-Cellular Hybrid Networks," *Proc. of 2009 IEEE Int'l. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom-09)*, pp.322-327 (2009).
 - 14) 花野博司, 村田佳洋, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤実: "携帯電話端末への低コスト動画広告配信を目的とした WiFi 併用協調ダウンロード方式", 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 2 (2010).