

Bluetooth によるすれ違い通信を活用した複数携帯 電話端末による省電力協調動画ダウンロード手法

高 松 悠^{†1} 孫 為 華^{†1} 山内 由紀子^{†1}
安 本 慶 一^{†1} 伊 藤 実^{†1}

本稿では、大容量ファイルをダウンロードする際の携帯電話網の通信帯域節約を目的に、同じコンテンツを要求するユーザ間でコンテンツの一部（断片）を Bluetooth で送受信する協調ダウンロード手法を提案する。提案手法では、より多くの断片を他のユーザから取得できるようにするため、各ユーザがサーバに位置情報および所有断片情報などを定期的に通知し、要求断片を持つ他のユーザと出会う時刻を確率的に予測し、断片を効率よく取得する通信スケジュールを作成する。更に、通信スケジュールに基づき、必要な時間だけ Bluetooth デバイスを起動することで電力消費を抑える。ユーザの定めた受信期限までにコンテンツの取得を完了させるため、Bluetooth を通じ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。シミュレーションによる実験の結果、提案手法は、システム滞在時間中の約 25% Bluetooth デバイスをスリープさせながら、Bluetooth を常時起動し断片を集める方式と同程度の断片数を取得できた。

Energy-Aware Cooperative Download Method for Mobile Users Equipped with Bluetooth-Ready Cellular Phones

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

In this paper, we propose a cooperative download method to save cellular network bandwidth when downloading large-size files such as movies by exchanging a part of contents (chunks) among the users demanding the same contents. Our method stochastically estimates the time when each user meets the other users who provide the required contents from information such as location, retaining chunks, etc., that the users periodically update in the server and composes the communication schedule for efficiently obtaining chunks. In addition, it turns on the Bluetooth device only at necessary time for exchanging chunks to reduce the consumed power. To complete acquisition of contents by the specified deadline, the users download the chunks via cellular network which cannot be obtained from other users. Simulation-based validation shows that by our method, Bluetooth device is turned off during 25% of the system utilization time and the users acquire from the other users as many chunks as the conventional method always turning on the Bluetooth device.

1. はじめに

近年、YouTube などの動画共有サイトが広く普及し、大容量コンテンツを携帯電話網を介して取得することが一般的になった。しかし、携帯電話網の通信帯域は限られており、多数のユーザが同時に大容量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。

本稿では、目的地（駅など）に到着後に視聴できるよう、携帯端末ユーザが移動中（通勤・通学、ショッピングなど）に YouTube 動画のような大容量コンテンツを取得するサービスを想定する。しかし、多数のユーザが同時に携帯電話網からダウンロードすると、携帯電話網の帯域を圧迫する。そこで、ユーザが移動中に遭遇した他のユーザとコンテンツの一部（以降断片と呼ぶ）を Bluetooth によって交換する協調ダウンロード手法を提案する。提案手法では、(1) 携帯電話網の負荷の軽減、(2) 協調ダウンロードに使用する Bluetooth の消費電力の抑制、(3) 受信期限までのコンテンツの取得、の 3 点を目標とする。

携帯電話網の負荷を軽減するために、できるだけ多くの断片を他のユーザから Bluetooth 経由で取得するには、各ユーザ端末は携帯電話網からの断片の取得、他の端末との断片の交換を計画的に行う必要がある。提案手法では、ユーザ端末は他の端末と遭遇する確率と時刻を含むコンタクトテーブルを取得し、それに基づいて計画を行う。このために、固定ネットワーク内にサーバを設け、各端末が移動中の経路（移動経路）、直近の交差点の出発時刻、自身の所有しているコンテンツ断片（所有断片）、取得が必要な断片（要求断片）の情報を定期的にサーバに登録する。端末がこれらの情報を登録すると、サーバは各端末と遭遇する確率と時刻を計算し、遭遇端末の断片情報も含まれるコンタクトテーブルを作成する。各端末はサーバから取得したコンタクトテーブルを利用し、他端末からの取得機会が少ない断片を優先的に取得することで多数の端末と断片を交換する。

さらに、端末の Bluetooth による消費電力を抑えるために、他の端末との遭遇予定時刻と確率に基づき、Bluetooth デバイスへの給電スケジュールをたてる。提案手法では、Bluetooth の特性を考慮し、取得したい断片を持つ他の端末との遭遇確率に応じて Bluetooth の状態を接続要求 (inquiry) か接続要求待ち (inquiry scan) にし、コネクションの確立を速やかに行う。また、他の端末と断片を交換できない間は Bluetooth デバイスをスリープさせる。

ユーザが定めた受信期限までにコンテンツの取得が完了することを保証するため、既に取得した断片の全要求断片に対する割合がダウンロード開始から受信期限までの時間に対する経過時間の割合に比例するよう、他の端末からの取得機会が少ない断片を携帯電話網からダウンロードする。

提案手法では、端末は各交差点でコンタクトテーブルの更新を行う。そのため、交差点を通過するたびにサーバに情報を登録する。コンタクトテーブルの更新時に端末は全断片の取得機会と Bluetooth への給電スケジュールを再計算する。

提案手法を評価するために、シミュレーション実験を行った。結果、提案手法は各端末に平均 25% Bluetooth をスリープさせながら、Bluetooth を常時起動しグリーディに断片を集める方式と同程度の断片数を取得できた。

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の特定部分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

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

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 **BitTorrent**¹⁾ が提案された。**BitTorrent** はコンテンツを複数の小さな断片に分割し、各断片をノード間で交換できるようにすることで局所的な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保持しているノードが見つからない場合があり、ダウンロード時間が長くなるという問題がある²⁾。

BitTorrent において、断片の取得順序を工夫することで、ダウンロード時間を短縮する研究も行われている。文献 3) では、断片をより多く持っているノードが要求する断片を優先的に集め、配布することで、平均ダウンロード時間を短縮する手法を提案している。しかし、この手法は、有線ネットワーク環境を想定しており、ノードの移動により通信可能なノードが頻繁に変化するモバイル環境では良い性能を発揮できない。

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 **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、ノードの参加・離脱等のパフォーマンスやオーバーヘッドへの影響を調査し、クロスレイヤでの最適化を行った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。

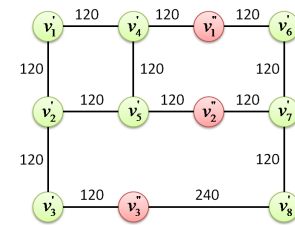
携帯端末間でのファイル交換の効率を改善する研究として、McNamara らは通勤や通学中に通信可能な他の端末の中から、有用なファイルを持っている可能性が最も高い端末を特定し、ファイルの取得を行う手法を提案している⁶⁾。また、文献 7) では、電車などの公共交通機関利用中に頻繁に出会うノードのなかで、通信時間が十分に確保できるノードを予測しファイル交換を行う手法を提案している。

上記の研究は、端末の移動に伴う通信相手ノード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のダウンロードには適さない。

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 8) では、**Bluetooth** の特性を考慮し、ファイルの断片の交換を行う通信相手を効率よく探すことで電力消費を抑え、効率よく交換が行えるパケットサイズを選択する手法が提案されている。この手法では、ユーザ端末は周辺にある **Bluetooth** のアクセスポイントと他の端末からコンテンツの断片を取得するため、端末が移動する場合、断片を取得する機会が制限される。また、**Bluetooth** アクセスポイントにアップロードされているコンテンツの種類が多数の場合、効率よく通信相手を発見できないことが報告されている。

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、花野らは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⁹⁾。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わないため、**Bluetooth** に適用した際には無線通信範囲が狭くなることにによる性能の大幅な劣化が問題点として挙げられる。

既存研究では、(i) ノードの移動による通信相手ノードの変化、(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、(iv) **Bluetooth** などの狭い無線通信範囲での利用、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、モバイルユーザが大容量コンテンツをダウンロードする状況を想定し、(i) - (iv) 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。



リンクの重み w によって表す。ユーザが移動する道はグラフ G 上のリンクである。ユーザはスポット集合 V'' の中から出発地と目的地を選択し、出発地から目的地までを移動する。出発地から目的地までのパス（ルート）は出発時に決定する。ただし、端末はユーザがどのようなルートを選択し目的地まで移動するか知ることはできない。全てのユーザが同じ速度で移動すると仮定する。ユーザは頂点間を最短距離で移動し、移動中に進行方向を変更しない。ユーザは頂点上に滞在せず、すぐに次の頂点に向かって移動する。

端末に対する仮定 各端末は携帯電話網と Bluetooth の通信機能を同時に使用できる。Bluetooth のバージョンは 2.0+EDR を想定する。端末はフィールドの情報 G を保持している。加えて、端末には GPS が搭載されており、端末が現在どの道のどの位置を移動しているか分かるとする。端末はフィールドの情報と GPS を使いユーザがどの交差点を出発し、現在どの道の上をどの方向に移動しているかを記録する。この時、交差点を出発した時刻も記録する。また、端末は現在移動している道と出発した交差点からユーザが次に向かう交差点を求めることができる。端末の Bluetooth には表 1 に示す機能を持つ 6 つの状態がある。

サーバに対する仮定 サーバはフィールドの情報 G を保持している。サーバはユーザの移動ルートは知らないが、交差点 v にいるユーザが隣接交差点 v' に向かって移動する確率（移動確率）を統計的に把握しており、また、ユーザの移動速度も分かっている。

3.2 問題定義

ユーザ 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。全てのユーザが行うダウンロード、送信、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 ch 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。

$$\forall u \in U, \forall ch \in u.Chunk, \exists t, D(u, ch, t) \in Download \vee R(u, ch, t) \in Receive \quad (1)$$

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 $CSize/BW_c$ の時間がかかる。この制約式を式 (2) で示す。

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

$Send$ 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 (3) で与えられる。

$$\begin{aligned} \forall S(u, ch, t) \in Send, \exists R(u', ch, t') \in Receive, \\ u' \in Neighbor(u, t) \wedge t' = t + CSize/BW_b \end{aligned} \quad (3)$$

断片を送信するには前もってその断片をダウンロードするか受信をする必要がある。この制約式を式 (4) で示す。

$$\begin{aligned} \forall S(u, ch, t) \in Send, (\exists D(u, ch, t') \in Download, t' + CSize/BW_c < t \vee \\ \exists R(u, ch, t'') \in Receive, t'' < t) \end{aligned} \quad (4)$$

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 $Download$, $Send$, $Receive$ の集合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 (5) に示す。

$$\text{minimize } |Download| \quad \text{subject to } (1) - (4) \quad (5)$$

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

表 2 コンタクトテーブルの例

ID	probability	time(hh:mm:ss)	chunk
2	50%	14:20:10	$c_1 \{1, 2, 5, \dots\}, \dots$
3	25%	14:20:40	$c_1 \{2, 4, 5, \dots\}, \dots$

困難である。そのため、次章において、準最適解を求めかつ Bluetooth を使用することで消費する電力量を最小化す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、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手法を記述する。

4.1 提案手法

提案手法では、移動中にどのノードといつどのくらいの確率で通信可能かを予測するため、各ノードはサーバに対し自身が移動する道を示す、出発した交差点と次に向かう交差点、交差点を出発した時刻をサーバに登録する。同時に、所有断片と要求断片の情報もサーバに登録する。サーバは各ノードが登録した情報を利用し、表 2 のようなコンタクトテーブルを各ノードが情報を登録した時にそれぞれのノードに対し生成する。表 2 は、ノード u_1 に対するコンタクトテーブルの例である。表中の ID は通信相手ノードの ID、probability はそのノードとの遭遇確率、time は通信可能になる時刻、chunk はその通信相手ノードが所有している断片である。例えば、表 2 の 1 行目の場合、コンテンツ c_1 の断片 $ch_{1,1}, ch_{1,2}, ch_{1,5}$ を所有している ID が 2 のノードと 50% の確率で時刻 14:20:10 に通信可能になることを示している。提案手法では各ノードがコンタクトテーブルから将来通信可能になる他のノードおよびその所有断片を精査し、将来他のノードから取得可能な断片の中で、取得機会がより少ない断片を優先的に Bluetooth によって取得する。携帯電話網から断片をダウンロードする場合も他のノードからの取得機会が少ない断片を優先的に取得する。また、ノードは消費電力を抑えるために、他のノードと通信できる確率を考慮しながら Bluetooth の状態を制御し、Bluetooth をスリープ状態に切り替え、バッテリーを節約する。受信期限までにコンテンツの取得を完了させるために、ダウンロード開始からの経過時間と既に取得した断片の全要求断片に対する割合に応じて携帯電話網を利用する。

以下では、コンタクトテーブルの取得開始から完了までをコンタクトテーブル取得フェーズとし、コンタクトテーブル取得後のノードの行動をアクションフェーズとして説明する。各交差点でコンタクトテーブルを更新するため、これらのフェーズは繰り返し実行される。

4.1.1 コンタクトテーブル取得フェーズ

コンタクトテーブルの取得は図 2 のシーケンスチャートに示す手順で行われる。

【ノードの動作】サーバへの情報登録 ノードは交差点を出発する時に、交差点の ID と出発時刻を自動的に記録し、GPS からの現在地情報とフィールドの情報を照らし合わせた結果から次に向かう交差点が判明次第、携帯電話網を利用してサーバに情報を登録する。ノードがサーバに登録する情報は、ノードの ID、出発した交差点、出発した時刻、次に向かう交差点、所有断片、要求断片である。ノードは交差点に到着する度、サーバに登録した情報を更新する。登録する情報を表現するのに必要なバイト数は高々数 KB であり、ノードが情報を登録するためのオーバーヘッドは小さい。

【サーバの動作 1】通信可能な候補の絞り込み サーバとノード間でコンタクトテーブルを送受信する際の携帯電話網の通信帯域を節約するため、サーバはコンタクトテーブルのサイ

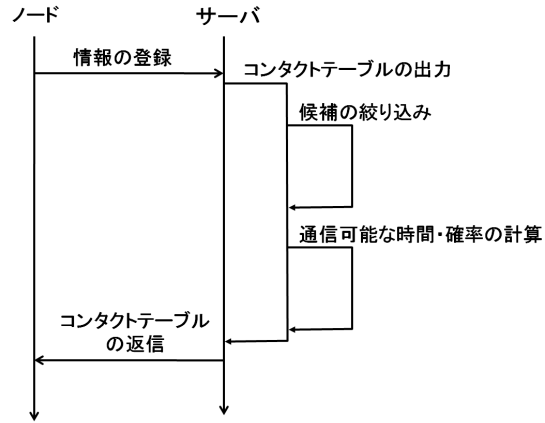


図2 コンタクトテーブル取得フェーズのシーケンスチャート

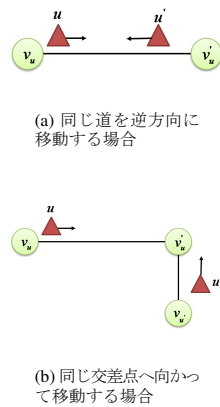


図3 ノードが遭遇する状況

ズを小さくする必要がある。そのために、サーバはコンタクトテーブルに含めるノードの絞り込みを行う。コンタクトテーブルには、ノードが必要とする断片の中で他のノードからの取得機会が少ない断片を特定するのに有益な情報が含まれることが望ましい。提案手法では以下の2つの条件を使い、絞り込みを行う。

- 次の交差点に到着するまでに遭遇する可能性がある
- 要求断片を持っている

これら2つの条件を満たすノードに対して次の通信可能な時間・確率の計算を行う。

【サーバの動作2】通信可能な時間・確率の計算 通信可能になる時刻（コンタクトタイム）は、サーバが事前に把握している交差点間の距離とノードの移動速度、ノードがサーバに登録した出発した交差点、交差点を出発した時刻、次に向かう交差点の情報から求めることができる。ノード u が次の交差点に到着するまでにノード u' と遭遇する状況として、 u' が u と同じ道を逆方向に移動している場合（状況1と呼ぶ）と、 u' が u と同じ道にいないが同じ交差点に向かって移動している場合（状況2と呼ぶ）がある。ノード u がサーバに登録した直近の出発交差点を v_u 、次に向かう交差点を v'_u とし、状況1と状況2をそれぞれ図3(a), 3(b)に示す。ノード u とノード u' が遭遇するのは、 u と u' が直近の交差点を出発してからの移動距離の総和が、道 (v_u, v'_u) の長さで一致する時（状況1の場合）か、 u' が現在移動している道 (v_u, v'_u) と u が移動している道 (v_u, v'_u) の長さの和で一致する時（状況2の場合）である。これを考慮し、ノード u とノード u' のコンタクトタイム $CT_u(u')$ を式(6)で決定する。ここで、交差点 v, v' 間にある道の距離を $L(v, v')$ 、ノードの移動速度を a 、ノード u が直近の交差点を出発した時刻を T_u とする。

$$CT_u(u') = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{L(v_u, v'_u)}{a} + T_u + T_{u'} \right), & \text{(状況1の時)} \\ \frac{1}{2} \left(\frac{L(v_u, v'_u) + L(v_{u'}, v'_{u'})}{a} + T_u + T_{u'} \right), & \text{(状況2の時)} \end{cases} \quad (6)$$

ノード u とノード u' の遭遇確率 $P_u(u')$ は、サーバが統計的に把握している交差点 v か

ら交差点 v' への移動確率 $MP(v, v')$ を利用し、式(7)で決定する。

$$P_u(u') = \begin{cases} 1, & \text{(状況1の時)} \\ MP(v'_u, v_u), & \text{(状況2の時)} \end{cases} \quad (7)$$

コンタクトタイムと遭遇確率を計算すると、サーバはノードにコンタクトテーブルを返信する。返信するコンタクトテーブルは1エントリにつきノードがサーバに登録する情報の約半分のサイズであり、コンタクトテーブルに含めるノードを絞り込むことで、ノードにコンタクトテーブルを送信する際の携帯電話網への負荷は小さくできる。提案手法では、遭遇確率が閾値 α 以上のエントリのみコンタクトテーブルに含めることで絞り込みを行う。

4.1.2 アクションフェーズ

ノードは断片交換のスケジュール作成及び消費電力の削減のために、コンタクトテーブルを利用し取得する断片の選択やBluetoothの状態を変化させる。また、受信期限までに断片の取得を完了させるために、携帯電話網を利用し断片を取得するタイミングを調整する。

取得する断片の選択 ノード間で断片の交換を効率よく行うには、他のノードからBluetooth経由で取得できる機会が少ない断片（その断片を持った他のノードとのコンタクト回数が少ない）を優先的に取得し、その断片をより多くのノードに配布できるようにすることが望ましい。そこで、要求断片に対して他のノードからの取得機会を計算する。他のノードからの取得機会が少ない断片は、持っているノードが少ない断片か遭遇確率が低いノードしか持っていない断片であると考えられる。ノード u が他のノード u' から断片 ch を取得するには、 u と u' が遭遇し、かつ、 u' が断片 ch を所有している必要がある。これを考慮し、ノード u が他のノード u' から断片 ch を取得する機会 $w_u(u', ch)$ を式(8)で計算する。ここで、 $D_{u'}$ はノード u' の所有断片の集合である。

$$w_u(u', ch) = \begin{cases} P_u(u'), & \text{if } ch \in D_{u'} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

さらに、コンタクトテーブルに登録されている全ノードの所有断片を考慮し、ノード u における断片 ch の取得機会を式(9)で計算する。ここで、 N_u はノード u のコンタクトテーブルに登録されている他のノードの集合、 M_u はノード u の要求断片である。

$$Wh_u(ch) = \begin{cases} \sum_{u' \in N_u} w_u(u', ch) & \text{if } ch \in M_u \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$Wh_u(ch)$ の値が低い断片は取得機会が少ないため、ノードは $Wh_u(ch)$ の値が最も低い断片から優先的に取得する。 $Wh_u(ch)$ の値が最も低い断片が複数ある場合は、それらの断片の中からランダムに1つを選択する。

Bluetoothによるノード間での断片交換 Bluetoothでコネクションを確立するには、まず他の端末を探索するために周辺端末に探索パケットをブロードキャストする（inquiry）端末と inquiry 端末からの探索パケットを待つ（inquiry scan）端末間で同期をとる必要がある。inquiry と inquiry scan では単位時間あたりの端末の消費電力は inquiry scan の方が大きい、inquiry scan ではより消費電力が低い inquiry scan interval に定期的に移行するため、総合的な消費電力は inquiry scan の方が小さい⁸⁾。

断片の交換で消費される電力を抑えるため、周辺に断片の交換を行うことができる端末がない時はBluetoothをスリープさせることが望ましい。提案手法では、コンタクトテーブルには他のノードといつ通信可能になるか示されているので、通信可能になる時間以外

は Bluetooth をスリープさせ、端末の電力消費を抑える。ノードは他のノードと通信可能になる時間に Bluetooth を起動する。Bluetooth を起動する際、電力消費の点から考えると、遭遇の確率が低いノードに対し inquiry で探索するのは効率が悪い。そこで、提案手法では、コンタクトテーブルに示された遭遇確率が閾値 β 以上のノードを inquiry で積極的に探索する。それ以外の時は inquiry scan で他のノードからの探索を待つ。

携帯電話網からの断片のダウンロード Bluetooth によるノード同士の断片交換だけでは受信期限までに入手できない断片がある。受信期限までにコンテンツの取得を完了するために、文献 9) と同様の方法を用いる。この方法により、各ノードは既に取得した断片の全要求断片に対する割合がダウンロード開始から受信期限までの時間に対する経過時間の割合より低くなると、他の端末からの取得機会が少ない断片を携帯電話網からダウンロードする。

5. 評価実験

5.1 シミュレーションの設定

各実験で共通に用いたパラメータを表 3、フィールドとノードの移動ルートを図 4 に示す。フィールドの全ての交差点において、交差点間のリンクの距離が等しくなるように設定した。フィールドを $500m \times 500m$ に設定し、交差点間の距離を $167m$ とした。交差点間の各道の幅は $10m$ とし、ノードは道路幅員のどの位置でも移動できる。ノードが道路幅員のどの位置を移動するかはランダムに決定する。ノードが出入りするスポットを A-D とし、リンクの中央に設置した。サーバが保持するノードの統計的な移動確率はノードの移動ルートを考慮し、表 4 のようにした。

ノードは各実験で設定したスポット間の移動回数だけスポット間を移動する。ノードはスポットに到着すると、到着したスポットが出発点となっているルートからランダムに選択し移動を続ける。ノードはスポット間の移動回数スポット間を移動するとシステムから離脱する。ノードが離脱すると新しいノードがシステムに参加する。その際、新規ノードはルートをランダムに一つ選択し、ルートの出発点のスポットに出現する。ノードは初期状態でダウンロードするコンテンツの断片をいくつか所有しており、断片の個数と要求断片のどの断片を所有しているかはランダムに決定する。

シミュレーションの初期においてノードは各実験で設定したノード数と同じ数設置される。ノードはランダムにルートを選択し、選択したルート上にランダムに配置される。

シミュレーションでは、Bluetooth の通信モデルを利用した。また、コネクションの確立にかかる遅延は文献 8) で調査された値を参考に 2 秒とした。

提案手法の比較対象として、以下の手法を使用した。

常時起動法 この手法では、ノードは常に Bluetooth を起動させ、inquiry と inquiry scan を交互に繰り返し他のノードを探索し、スリープしない。そのため、コンタクトテーブルと関係なく、遭遇するすべてのノードを発見し、通信を行う。他のノードと断片を交換する際、交換する断片は通信相手ノードが所有する断片の中からコンテンツ取得に必要な断片をランダムに選択する。携帯電話網からの断片のダウンロードの仕方は提案手法と同じである。ダウンロードする断片はコンテンツの取得に必要な断片からランダムに選択する。

コンタクトオラクル法 この手法では、各ノードは全ノードの位置情報、所有断片情報を所有しており、いつどのノードと通信可能になるか分かる。他のノードと通信を行わない時は常に Bluetooth をスリープさせ端末の消費電力を抑える。同じコンテンツを要求する他のノードが通信範囲内に入ると、Bluetooth を起動し、接続を開始する。そのため、この手法は交換断片数及び Bluetooth のスリープ時間において、いずれも提案手法の上界となる。交

表 3 シミュレーションのパラメータ

断片数	100
断片の容量	150KB
携帯電話網の通信帯域	1.2Mbps
Bluetooth の通信帯域	700Kbps
Bluetooth の通信範囲	10m
要求コンテンツ数	2/端末 (Zipf 分布)
ノードの移動速度	1.0m/s
ノードの初期所有断片数	0-50
シミュレーション時間	60 分
閾値 α	0.25
閾値 β	1.0

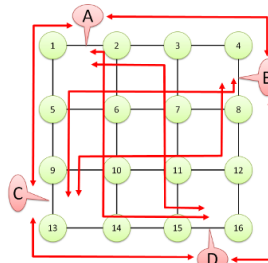


図 4 フィールドとノードの移動ルート

表 5 各実験の設定

	実験 1	実験 2	実験 3
コンテンツ種類数	10, 20, 40, 100	20	20
ノード数	500	100, 500, 1000	500
受信期限	8 分	8 分	8 分, 16 分, 32 分
スポット間の移動回数	1	1	1, 2, 4

換する断片の選択の仕方、携帯電話網からの断片のダウンロードの仕方は、常時起動法と同じである。この手法は、Bluetooth や携帯電話網などの通信機能を使うことなく他のノードの位置情報や所有断片情報を把握しているため、実装不可能である。

携帯電話網の使用量がどれだけ削減されたかを測定するため、ノードが移動中に取得できた断片数を測定した。また、Bluetooth をスリープさせることで節約できた電力量を測定するため、各ノードのシステム滞在時間に対する Bluetooth をスリープさせた合計時間の割合を計測した。提案手法でコンタクトテーブルを取得することで携帯電話網の通信帯域に与える影響を測定するため、各ノードがコンタクトテーブルを取得した回数を測定した。また、取得したコンタクトテーブルの平均エントリ数を測定した。取得断片数、Bluetooth のスリープ時間、コンタクトテーブルの取得回数、コンタクトテーブルの平均エントリ数を実験の測定項目とし、システムに受信期限より長く滞在しているノードの測定項目を記録した。記録された各測定項目の相加平均を実験結果として表示する。実験 1 ではコンテンツ種類数を変化させ、コンテンツ種類数が与える影響を確認する実験を行った。実験 2 ではノード数を変化させ、ノードの密度が与える影響を確認する実験を行った。実験 3 では受信期限の長さを変化させ、受信期限が与える影響を確認する実験を行った。実験 3 でのノードのスポット間の移動回数は受信期限の長さに応じて変化させた。各実験でのコンテンツ種類数、ノード数、受信期限、スポット間の移動回数を表 5 に示す。

5.2 実験結果

実験 1 の結果を図 5 に示す。コンテンツ種類数が増加すると、どの手法においても取得断片数が減少し、常時起動法以外はスリープ時間が増加している。これは、コンテンツ種類数が増加することで、同じコンテンツを要求する他のノードの絶対数が減るため、断片を交換できる機会が減少したからである。コンタクトテーブルの平均サイズも同様の理由で減少する。提案手法はコンタクトオラクル法と比べ、取得断片数は約 70%、スリープ時間は約 50% ~ 70% を達成している。一方、常時起動法と比べた結果、取得断片数はコンテンツ種類の増加につれ接近する。

実験 2 の結果を図 6, 7 に示す。ノード数が増加することで、どの手法においても取得断

表 4 交差点間の移動確率

交差点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
隣接交差点	2, 5	1, 3, 6	2, 4, 7	3, 8	1, 6, 9	2, 5, 7, 10	3, 6, 8, 11	4, 7, 12	5, 10, 13	6, 9, 11, 14	7, 10, 12, 15	8, 11, 16	9, 14	10, 13, 15	11, 14, 16	12, 15
移動確率	1/2, 1/2	1/2, 1/3, 1/6	1/2, 1/4, 1/4	1/2, 1/2	1/4, 1/4, 1/2	1/4, 1/4, 1/4, 1/4	1/4, 1/4, 1/4, 1/4	1/2, 1/6, 1/3	1/3, 1/6, 1/2	1/4, 1/4, 1/4, 1/4	1/4, 1/4, 1/4, 1/4	1/2, 1/4, 1/4	1/2, 1/2	1/4, 1/4, 1/2	1/6, 1/3, 1/2	1/2, 1/2

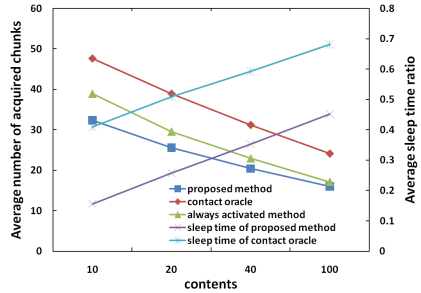


図 5 コンテンツ種類数の変化に対する取得断片数とスリープ時間

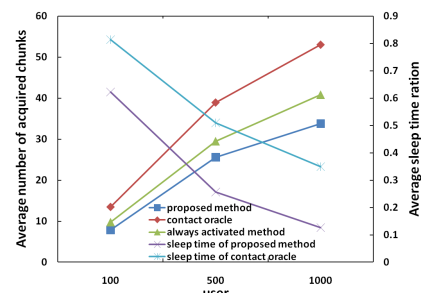


図 6 ノード数の変化に対する取得断片数とスリープ時間

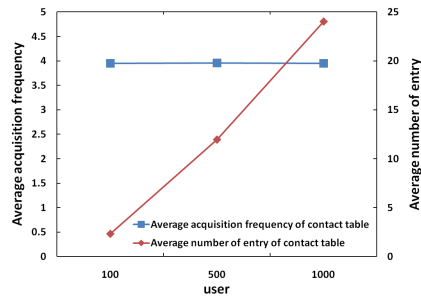


図 7 ノード数の変化に対するコンタクトテーブルの取得

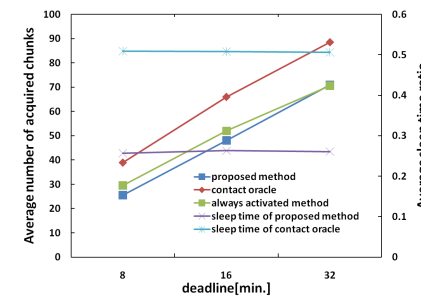


図 8 受信期限の変化に対する取得断片数とスリープ時間

片数が増加している。一方、常時起動法以外はスリープ時間が減少している。これは、ノード数が増加することでノードの密度が高くなり、他のノードが通信範囲内に入ってくる頻度が増え、より多くの断片を交換することができるからである。同様に、図 7 より、コンタクトテーブルのサイズもノード数の増加に比例し大きくなっている。ノード数が増加する場合、取得断片数の面では常時起動法との差が広がっており、スリープ時間もノード数の増加に比例して減少していることから、提案手法はノード数が極端に多い場合に不利になると推測される。常時起動法は常に通信範囲内にいる端末を探すため、ノードの密度が高くなると色々な端末と通信を行うことができる。その結果、より多くの断片を他の端末から取得することができ、常時起動法は有利となる。提案手法は他のノードと高い確率で遭遇が見込めない場合、プローブを抑えるため、取りこぼしが発生している。そのため、提案手法は取りこぼしを減少させる工夫が必要である。

実験 3 の結果を図 8 に示す。どの手法においても、受信期限の長さ按比例取得断片数は

増加している。スリープ時間は、全ての手法で受信期限に関係なくシステム滞在時間に対して一定の割合確保できている。受信期限が 32 分の場合に、提案手法は常時起動法とほぼ同等の約 70 断片（要求断片の 35%）を他のノードから取得できている。これは、受信期限が長い場合、携帯電話網からの断片のダウンロードが頻繁には行われないため、コンタクトテーブルに記されている他のノードの所有断片情報と通信を開始する直前の他のノードの所有断片に差が生じ難いので、取得機会が少ない断片の特定が機能したからだと考えられる。

提案手法は常時起動法と同程度他の端末から断片を取得しながら、システム滞在時間中約 25% Bluetooth スリープさせることができ、消費電力を抑えることができています。この結果から、提案手法の性能は受信期限との関係が強く、受信期限が長いほど多くの断片が取得でき、高い省電力効果が得られると言える。この特徴から、提案手法は移動に時間がかかる通勤・通学、ショッピングの際に利用することで有効に働くと考えられる。

6. おわりに

本稿では、大容量コンテンツをダウンロードするユーザが移動中に他のユーザと断片を交換することで、携帯電話網の利用量を削減する携帯電話網と 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、ユーザ端末はサーバが計算したコンタクトテーブルを利用し、他の端末と断片の交換が行えるときだけ Bluetooth を立ち上げ、断片の交換を行う。提案手法を評価するため、シミュレータを用いた評価実験を行った。その結果、提案手法は受信期限が 32 分の場合、要求断片の約 35% を他の端末から取得でき、システム滞在時間中の約 25% Bluetooth をスリープさせ電力消費を抑えることができた。今後は、独自に作成したスマートフォンのアプリケーションにより、Bluetooth や携帯電話網、GPS を使用することで消費する電力量の測定を行い、実機に基づくより精密な電力消費のモデル化を行う。さらに、提案手法が Bluetooth をスリープさせることで軽減される電力量と提案手法に必要な電力量の関係性について評価したい。

参考文献

- 1) BitTorrent: <http://www.bittorrent.com/>
- 2) Bharambe, A.R., Herley, C., and Padmanabhan, V.N.: "Analyzing and Improving a BitTorrent Network's Performance Mechanisms," *Proc. of IEEE 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 IEEE ICC 2007*, 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 Mobiquitous 2006*, CD-ROM (2006).
- 6) McNamara, L., Mascolo, C. and Capra, L.: "Content Source Selection in Bluetooth Networks," *Proc. of Mobiquitous 2007*, pp.1-8 (2007).
- 7) McNamara, L., Mascolo, C. and Capra, L.: "Media Sharing based on Colocation Prediction in Urban Transport," *Proc. of ACM MobiCom 2008*, pp.58-69 (2008).
- 8) Lee, U., Jung, S., Chang, A., Cho, D.-K., and Gerla, M.: "P2P Content Distribution to Mobile Bluetooth Users," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 59, No. 1, pp.344-355 (2010).
- 9) 花野, 村田, 柴田, 安本, 伊藤: "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).