

すれ違い通信を活用したスマートフォン向け省電力協調動画ダウンロード手法 Energy-Aware Cooperative Download Method for Smart Phones utilizing Street Pass communication

孫 為華† 高松 悠† 山内 由紀子‡ 安本 慶一† 伊藤 実†
Weihua Sun† Yu Takamatsu† Yukiko Yamauchi‡ Keiichi Yasumoto† Minoru Ito†

1. はじめに

近年、スマートフォンなどの高性能携帯端末と YouTube などの動画共有サイトが普及し、携帯電話網を介して大容量のコンテンツを取得することが一般的になってきている。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コンテンツを携帯電話網を介し送受信すれば、携帯電話網の通信容量が不足し、送受信速度の低下や他のサービスの品質低下を招く。ユーザの通信帯域を制限する方法は、多数のユーザの大容量コンテンツのダウンロードによる携帯電話網の通信帯域不足の問題を本質的には解決しておらず、ユーザの利便性を低下させるものだと思われる。

本研究では、携帯端末ユーザが移動中（通勤・通学、ショッピングなど）に動画のような大容量コンテンツを取得し、目的地（駅など）に到着後、それを視聴するサービスを想定する。前述した携帯電話網の通信帯域を圧迫する問題を解決すべく、本論文では、ユーザが移動中に Wi-Fi や Bluetooth のような近距離無線通信の通信範囲に入った他のユーザからコンテンツの一部（以降断片と呼ぶ）を近距離無線によって取得する協調ダウンロード手法を提案し、

(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近距離無線通信にかかる端末の消費電力の抑制、(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は、できるだけ多くの断片を他のユーザから近距離無線通信経由で取得することが望ましい。そのため、各ユーザ端末は携帯電話網からの断片の取得、他の端末からの断片の取得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が近距離無線の通信範囲に入る（遭遇と呼ぶ）時刻と確率、他の端末が所有する断片の情報を含むコンタクトテーブルに基づきどの断片を優先して取得するかを選択する。これを実現するため、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、自身が所有しているコンテンツの断片（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、サーバはその端末との距離が一定範囲内の他の端末との遭遇時刻と遭遇確率を計算し、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、他の端末からの取得機会が少ない断片（希少断片）を特定し、希少断片から先に取得する。また、ユーザが定めた受信期限までにコンテンツの取得を完了することを保証するため、他の端末から期限内に取得できない断片を携帯電話網からダウンロードする。

さらに、端末の近距離無線通信による消費電力を抑えるために、コンタクトテーブルに示された他の端末との遭遇

予定時刻に基づき、近距離無線通信デバイスの制御を行う。提案手法では、他の端末から断片の取得ができない時は近距離無線通信デバイスをスリープさせる。

スマートフォンの実機により計測した消費電力量に基づいて、シミュレーション実験を行った結果、提案手法は、端末数が 1000 台とユーザの密度が高い場合、近距離無線デバイスを常に起動し断片を集める方式（常時起動法）よりも約 50% 多くの断片を取得でき、同時に端末が消費した電力は 80% に抑制できることを確認した。また、提案手法は、遭遇時刻が 100% 正確に分かる理想の方法と比べても約 65% 断片の取得ができることを確認した。

2. 関連研究

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 環境に Gnutella を実装した場合のユーザのモビリティやネットワークの分断等のパフォーマンスやオーバ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¹⁾。Rajagopalan らは、MANET 上での BitTorrent の仕組みを提案し実装している²⁾。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、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³⁾⁻⁵⁾。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。

モバイル端末間でのファイル交換の効率を改善するために、端末移動性に対する予測の研究として、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が提案している⁶⁾⁻⁷⁾。上記の研究は、ユーザの移動による通信相手端末の変化を考慮しているが、断片の取得を端末間でのみ行っている。しかし、断片の収集を計画的に行っていないため、ダウンロード成功率・完了時間の点で性能が保証できない。

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 9) 及び 10) 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る手法が提案されている。しかし、この手法では、断片を取得する成功率が低下し、コンテンツの取得期限も考慮されていない。

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、花野らは携帯電話網と Wi-Fi を併用する協調ダウンロード方式を提案した¹¹⁾。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、各端末が断片を携帯電話網からダウンロードするか、Wi-Fi 経由で近隣端末に配布する。

† 奈良先端科学技術大学院大学, Nara Institute of Science and Technology

‡ 九州大学, Kyushu University

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、Wi-Fi を介した通信を頻繁に行うため電力を多く消費する点が問題点として挙げられる。また、文献 8) では、各端末がアドホックネットワークを形成し、同じファイルを共有できる近隣端末の情報を携帯電話網を通じアクセスできるサーバに通知する。サーバは各端末に対し断片を取得するためのスケジュールを提示することで、高いファイル取得率を実現する。しかし、この手法は頻繁にメッセージを交換する必要があり、端末が多く電力を消費する。

既存研究では、(i) ユーザの移動による通信相手端末の変化、(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) - (iii) を考慮した、携帯電話網と近距離無線通信を併用する協調ダウンロード手法を提案する。

3. 複数携帯端末による協調ダウンロード問題

本章では、複数携帯端末による携帯電話網と近距離無線通信を併用する協調ダウンロード問題の定式化を行う。

3.1 想定アプリケーションと目的

本研究では、多数の携帯端末を備えた移動ユーザが指定した期限までに、インターネット上のコンテンツを要求するアプリケーションを想定する。その際、携帯電話網の通信帯域の圧迫とユーザの帯域制限を回避することを目的とする。そのために、Wi-Fi や Bluetooth のような近距離無線通信機能を利用し、他の端末から断片を取得することで携帯電話網の使用量を抑える。更に、ユーザが指定した受信期限までにコンテンツの取得を完了させることを保証する。

3.2 仮定

通信モデル

全携帯電話端末の集合を U とする。各ユーザはそれぞれ 1 台の携帯電話端末（以後端末と呼ぶ）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 とする。各端末の近距離無線通信機能の伝送容量を BW_w とし通信可能な距離を R とする。近年、Wi-Fi Direct¹²⁾ と呼ばれる端末間で直接通信するための仕様が発表され、端末間の直接通信が可能になりつつある。今後は、Wi-Fi だけでなく他の無線規格でも同様のことが可能になると予測される。そのため、本研究では、各端末 u は近距離無線通信機能を使用し、 u を中心とした半径 R の円内にいる他のユーザ端末と直接接続できるものとする。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。

システムモデル

端末がダウンロードする大容量ファイルをコンテンツといい、全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_j は複数の断片に分割されており、全ての断片は同じ容量 (CSize) とする。コンテンツ c_j の j 番目の断片を ch_{ij} とする。端末 u が要求するコンテンツの集合を $u.Contents \subseteq C$ とし、 $u.Contents$ の各要素を $u.c_i \in u.Contents$ とする。端末 u が要求するコンテンツの断片の集合を $u.Chunk$ とし、 $u.c_i$ の j 番目の断片を $u.ch_{ij} \in u.Chunk$ とす

る。端末 u の各要求コンテンツ $u.c_i$ の受信期限を $u.c_i.deadline$ とする。また、各断片 $u.ch_{ij}$ の受信期限は $u.c_i$ の受信期限と同じに設定され、 $u.ch_{ij}.deadline$ と表記する。コンテンツサーバ s はコンテンツの集合 C を保持している。各端末は携帯電話網を通じてコンテンツサーバ s にアクセスできる固定ネットワークに接続できる。各端末は現在位置・時刻にかかわらずサーバに格納された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。**ユーザの移動モデル**

ユーザが移動するフィールドは図 1 のようなリンク重み付きグラフ $G = (V, E, w)$ で表現する。フィールドには交差点とユーザが出入りするスポット（駅、ショッピングセンタ等）がある。交差点とスポットはそれぞれグラフ G の頂点集合 V の部分集合 V', V'' と表記する。ここで、 $V' \subset V$ かつ $V'' = V - V'$ である。交差点間の距離をリンクの重み w

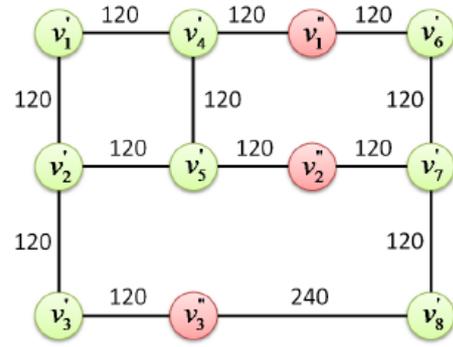


図 1 フィールドのグラフ表現

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ものとする。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近距離無線通信を同時に使用できる。端末にはフィールドの情報 G が格納されており、端末が現在どの道のどの地点を移動しているか、なんらかの手段（GPS や Wi-Fi による位置推定など）で分かるとする。位置情報の誤差はないものとする。端末はフィールドの情報と現在位置に基づいて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。

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 に到達したユーザが隣接する各交差点 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、ユーザの平均移動速度も分かっている。

3.3 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 に近距離無線通信を使い送信するアクシ

ジョンを $S(u, ch, t)$, 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近距離無線通信を使い受信しなければならない。この制約を式(1)で示す。

$$\forall u \in U, \forall ch \in u.Chunk, \forall t, \\ D(u, ch, t) \in DL \vee R(u, ch, t) \in RCV \quad (1)$$

全ての断片は受信期限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。この制約を式(2)で示す。

$$\forall D(u, u.ch, t) \in DL, t + CSize/BW_c \leq u.ch.deadline \\ \wedge \forall R(u, u.ch, t) \in RCV, t \leq u.ch.deadline \quad (2)$$

$Send$ では, 近距離無線通信機能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, この制約は式(3)で与えられる。

$$\forall S(u, ch, t) \in SND; \exists R(u', ch, t') \in RCV, \\ u' \in Neighbor(u, t) \wedge t' = t + CSize/BW_w \quad (3)$$

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。この制約を式(4)で示す。

$$\forall S(u, ch, t) \in SND, (\exists D(u, ch, t') \in DL, \\ t' + CSize/BW_c < t \vee \exists R(u, ch, t'') \in RCV, t'' < t) \quad (4)$$

同一無線範囲内では, 同時に一つの端末しか断片の送信を行うことができない。この制約を式(5)で示す。

$$\forall S(u, ch, t) \in SND, \neg \exists S(u', ch', t') \in SND, \\ u' \in Neighbor(u, t) \wedge u \neq u' \wedge |t - t'| < CSize/BW_w \quad (5)$$

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 $Download, Send, Receive$ 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(6)に示す。

$$\text{minimize } |DL| \text{ subject to } (1) - (5) \quad (6)$$

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, 準最適解を求めかつ近距離無線通信で消費する電力量を抑えるヒューリスティックアルゴリズムを提案する。

4. 複数携帯端末による省電力協調ダウンロード

本章では, 複数携帯端末による携帯電話網と近距離無線通信を併用する協調ダウンロード問題の定式化を行う。

4.1 基本アイデア

提案手法では以下の3つの方針を採用する。

(1) 携帯電話網の使用量を削減するため, 他の端末から近距離無線通信経由で断片を取得する

(2) 端末の電力消費を削減するため, 必要な時だけ近距離無線通信デバイスを起動する

(3) 受信期限までにコンテンツの取得を完了するため, 他の端末から取得できない断片を携帯電話網から取得する

提案手法では, 移動中にどの端末といつどのくらいの確率で通信可能かを予測するため, 各端末はユーザの移動している道と方向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。各端末が携帯電話網からの断片のダウンロード, 他の端末から断片の取得を計画的に行っていくために, サーバは各端末が登録した情報を利用し, 表1のような**コンタクトテーブル**を各端末が情報を登録した時にそれぞれの端末に対し生成する。

表1 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	$c_2\{2, 4, 5, \dots\}, \dots$

表1は端末 u_1 に対するコンタクトテーブルの例である。表中の ID は通信相手端末の ID, probability はその端末との遭遇確率, time は通信可能になる時刻, chunk はその通信相手端末が所有している断片である。例えば, 表1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の端末と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。

携帯電話網の負荷を軽減するには, 将来取得できる可能性が低い断片を優先的に取得し, その断片を他の端末にも配布していくことが望ましい。提案手法では各端末がコンタクトテーブルから将来通信可能になる他の端末およびその所有断片を精査し, 将来他の端末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近距離無線通信によって取得する。携帯電話網から断片をダウンロードする場合も他の端末からの取得機会が少ない断片から先に取得する。具体的方法については, 4.3.1節で説明する。また, 端末は消費電力を抑えるために, コンタクトテーブルに記された他の端末と通信可能になる時間を考慮しながら近距離無線通信デバイスを制御し, 他の端末との通信可能な時間以外は近距離無線通信デバイスをスリープ状態に切り替える。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取得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端末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の更新をするため, この2つのフェーズは繰り返し実行される。

4.2 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で示す手順で行う。

[端末の動作] サーバへの情報登録

端末はユーザが交差点を通過する時に, 交差点の ID と出発時刻を自動的に記録し, 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。端末がサーバに登録する情報は, 端末の 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。端末はユーザが交差点を通過する度, サーバに登録した情報を更新する。

[サーバの動作1] 通信可能な候補の絞り込み

サーバと端末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端末の絞り込みを行う。コンタクトテーブルには, 端末が必要とする断片の中で他の端末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 つの条件を満たす端末に対して次の通信可能な時間・確率の計算を行う。

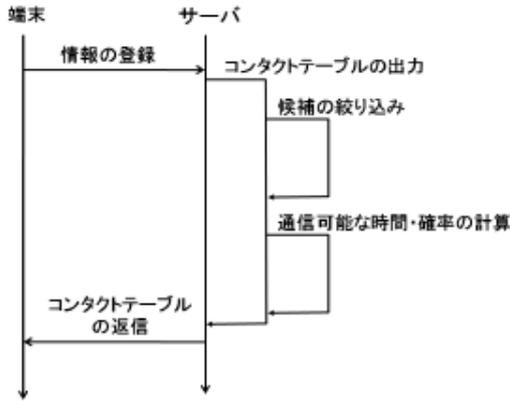


図 2 コンタクトテーブル取得フェーズ

[サーバの動作] 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ユーザの平均移動速度, 端末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. 端末 u が次の交差点に到着するまでに端末 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. 端末 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), (b) に示す.

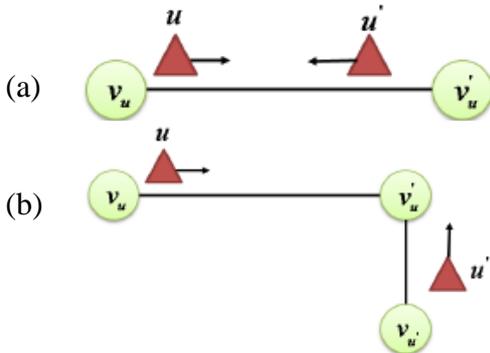


図 3 端末が遭遇する状況 2

端末 u と端末 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) の長さと同じになる時 (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) の長さの和と一致する時 (状況 2 の場合) である. これを考慮し, 端末 u と端末 u' のコンタクトタイム $CT_u(u')$ を式(7) で決定する.

ここで, 交差点 v, v' 間にある道の距離を $L(v, v')$, ユーザの平均移動速度を a , 端末 u が直近の交差点を出発した時刻を T_u とする. 端末 u と端末 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(8) で決定する.

$$CT_u(u') = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{L(v_u, v'_u)}{a} + T_u + T_{u'} \right), & \text{Case 1} \\ \frac{1}{2} \left(\frac{L(v_u, v'_u) + L(v_{u'}, v'_u)}{a} + T_i + T_h \right), & \text{Case 2} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_u(u') = \begin{cases} 1, & \text{Case 1} \\ MP(v'_u, v_u), & \text{Case 2} \end{cases} \quad (8)$$

コンタクトタイムと遭遇確率を計算すると, サーバは端末にコンタクトテーブルを返信する. コンタクトテーブルに含める端末を絞り込むことで, 端末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, 遭遇確率が閾値以上のエントリのみをコンタクトテーブルに含めることで絞り込みを行う. α はシステムパラメータであり, サービス提供者がサーバやネットワークの負荷を考慮し, 予め定めるものとする.

4.3 アクションフェーズ

端末は断片交換のスケジュール作成及び消費電力の軽減のために, コンタクトテーブルを利用し取得する断片の選択や近距離無線通信デバイスをスリープさせる. 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.

初期状態で端末はコンタクトテーブルを所有していない. コンタクトテーブルを所有していない時は, 近距離無線通信デバイスを常に起動し, 他の端末から取得する断片, 携帯電話網からダウンロードする断片をランダムに選択する.

4.3.1 取得する断片の選択

端末間で断片の送受信を効率よく行うには, 他の端末から近距離無線通信経路で取得できる機会が少ない断片 (その断片を持った他の端末との遭遇回数が少ない) を優先的に取得し, その断片をより多くの端末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端末からの取得機会期待値を計算する. 他の端末からの取得機会期待値が少ない断片は, 持っている端末が少ない断片か, 遭遇確率が低い端末しか持っていない断片だと考えられる.

端末 u が他の端末 u' から断片 ch を取得するには, u と u' が遭遇し, u' が断片 ch を所有している必要がある. これを考慮し, 端末 u が他の端末 u' から断片 ch を取得する確率 $w_u(u', ch)$ を式(9) で計算する. ここで, $D_{u'}$ は端末 u' の所有断片の集合である.

$$w_u(u', ch) = \begin{cases} P_u(u'), & \text{if } ch \in D_{u'} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$Rarity_u(ch) = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{u' \in N_u} w_u(u', ch)}, & \text{if } ch \in M_u \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

さらに, コンタクトテーブルに登録されている全端末の所有断片を考慮し, 端末 u における断片 ch の取得機会期待値を式(10) で計算する. ここで, N_u は端末 u のコンタクトテーブルに登録されている他の端末の集合, M_u は端末 u の要求断片である.

$Wh_u(ch)$ の値が低い断片は他の端末から取得できる機会が少ないため, 端末は $Wh_u(ch)$ 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.

4.3.2 携帯電話網からの断片のダウンロード

近距離無線通信による端末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 11) と同様の方法を用いる. 文献 11) ではコンテンツのダウンロードを受信期限までに完了させるために, 携帯電話網使用率調整機能を

導入している。この機能では、受信期限に対する時間の経過率（時間経過率, ElapsedTimeRatio）よりコンテンツのダウンロードを完了した割合（ダウンロード率, ACratio）が下回ると、携帯電話網から断片をダウンロードする。更に、受信期限の少し前にダウンロードを完了させるための係数として安全率（1 より小さい実数定数, β ）を導入し、以下の式(11) が成立する時は携帯電話網から断片をダウンロードする。

$$AC_{ratio} < \frac{ElapsedTimeRatio}{\beta} \quad (11)$$

携帯電話網から断片 ch をダウンロードする際、他の端末から断片を取得する時と同様に $Wh_u(ch)$ が最も低い断片を先に取得する。

4.4 コンタクトテーブル更新頻度の調整

これまでに述べた提案手法では、他の端末との遭遇時刻を確率的に予測するため、実際には他の端末と遭遇しない時に近距離無線通信デバイスを起動させ、余分に電力を消費してしまう場合がある。また、各交差点間の距離が等しくない場合、遭遇すると予測されない端末と遭遇する可能性があり、断片取得の機会を失う可能性がある。

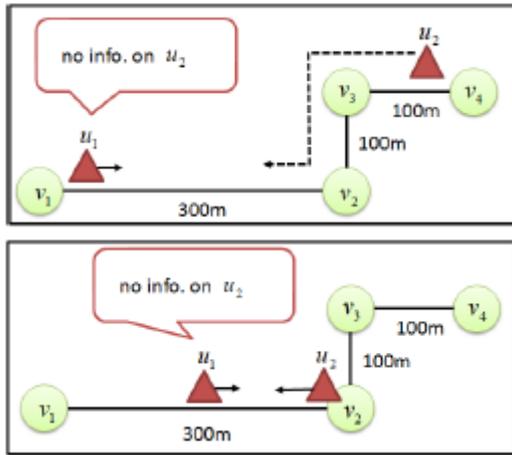


図 4 他端末との遭遇を予測できない場合

例えば、図 4 のような場合、 u_1 が v_1 を出発後に取得したコンタクトテーブルに u_2 の情報は入っていない。このまま u_1 と u_2 が移動すると、 u_1 が v_2 に到着する前に、 u_2 が v_2 から v_1 へ移動を開始する。これまでに述べた提案手法では、コンタクトテーブルの更新は交差点出発直後のため、 u_2 が v_2 から v_1 に移動する際、 u_1 と遭遇することがわかり、ピンポイントに通信デバイスを起動させる。一方、 u_1 は u_2 と遭遇することはわからないため、通信デバイスを起動させない。その結果、断片交換の機会を失い、 u_2 は無駄に電力消費し、提案手法としては十分な性能を発揮できなくなる。

これらの状況を回避するために、交差点間を移動中にもコンタクトテーブルの取得を行い、他端末との遭遇情報を最新のものに更新する。移動中にコンタクトテーブルの取得を行うため、コンタクトテーブルの取得間隔を FU とし、端末 u は交差点出発後 FU 秒ごとにサーバからコンタクトテーブルの取得する。取得間隔 FU を小さくすると、コンタクトテーブルの取得が頻繁に行われる。その結果、携帯電話網の使用量が増加する。その反面、他の端末と遭遇することをより確実に予測でき、より多くの断片を取得できるようになる。そのため、コンタクトテーブル取得にかか

るオーバーヘッドと取得断片数及び消費電力間にトレードオフが存在する。次章では、シミュレーション実験により、最も効率の良い更新頻度を探索する。

5. 評価実験

提案手法を用いて携帯電話網の使用量がどれだけ削減されるかを評価するために、シミュレーションによる評価実験を行った。同時に、提案手法によって消費される端末の電力量の評価も行った。シミュレーションによる評価実験を行うにあたり、実機を用いて Bluetooth, 3G 携帯電話網、それぞれの通信速度、消費電力の測定を行い、測定結果をシミュレーションに取り入れた。

5.1 実機を用いた予備実験

表 2 予備実験の結果

実験項目	回数	平均結果
Bluetooth 通信速度	5	408Kbps
Bluetooth 消費電力・75KB 送信	5	0.0008%
Bluetooth 消費電力・75KB 受信	5	0.0006%
3G 携帯電話網通信速度	5	556Kbps
3G 消費電力・75KB 受信	5	0.0084%
待機消費電力(秒)	5	0.0008%

実験では ipodtouch を 2 台使用し、1 台を送信端末、もう 1 台を受信端末として使用した。端末の Bluetooth のバージョンは 2.1+EDR であり、プロファイルは Personal Area NetworkProfile(PAN) を使用し、2 台の端末を P2P で接続した。送信端末は Bluetooth を使いデータを送信することで消費する電力量を推定するため、端末が満充電の状態からバッテリーを 5%消費するまで 75KB のデータを送信し続け、その際の送信回数を計測した。同様に、受信端末は Bluetooth を使いデータを受信することで消費する電力を推定するため、送信端末と同様に端末がバッテリーを満充電状態から 5% 消費するまで 75KB のデータを受信し続け、その際の受信回数を計測した。測定した結果を表 2 に示している。Bluetooth の平均通信速度は 408Kbps であり、75KB のデータ送信に消費した電力はバッテリー総量の 0.0008%に相当し、受信に消費した電力は総量の 0.0006%に相当する。

一方、iPhone 3GS 2 台を使用し、携帯電話網を使用することで端末が消費する電力と携帯電話網の通信速度を測定した。満充電の状態からバッテリーを 5% 消費するまで携帯電話網を利用し 75KB のデータを取得し続け、データの取得回数を測定した。端末は Google App Engine 上に作成した、75KB のデータを返信するサーバから HTTP 通信を使いデータを取得した。測定した結果を表 2 に示している。3G 携帯電話網の平均通信速度は 556Kbps であり、75KB のデータ受信に消費した電力はバッテリー総量の 0.0084%であり、Bluetooth で受信する場合と比べ、約 14 倍の結果となった。

そのほか、端末は Bluetooth 通信機能に電力を消費する以外にも、ディスプレイのバックライトなどに待機電力を消費する。それらを含む待機電力の消費を計測するため、Bluetooth や携帯電話網を利用した通信を行わず、照明等を起動したまま、送信端末、受信端末共に実験開始から満充電状態からバッテリーを 5% 消費するまでにかかった時間を 5 回測定した。結果、満充電から 5%のバッテリーを消費するまで、平均 66 分 36 秒経過したため、1 秒あたりの待機消費電力は 0.0008%である。

5.2 シミュレーション設定

各実験で共通に用いたパラメータを表3に示す。

表3 シミュレーションで用いる共通のパラメータ

断片数	200
chunk 断片の容量	75KB
要求コンテンツ数 (Zipf 分布)	2/端末
ユーザの移動速度	0.8-1.2s/m
端末の初期所有断片数	0-100
コンタクトテーブルの1エントリ	1KB
閾値	0.25

近距離無線通信の通信範囲を 10m とし通信速度は 407.5kbps に設定した。携帯電話網の通信帯域を予備実験の結果から 556Kbps とした。時間は 60 分とした。電力消費モデルは前節で構築したものをを用いる。

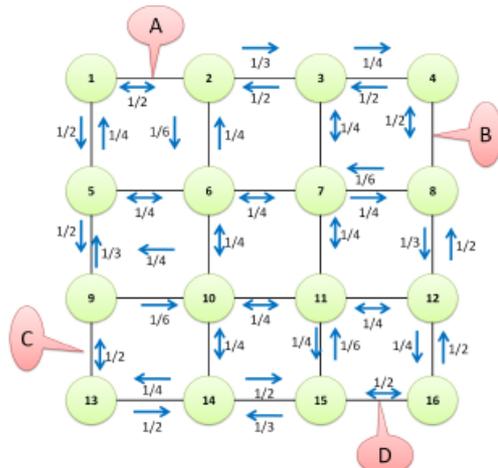


図5 用いたフィールドと統計的な移動確率

フィールドの全ての交差点において、交差点間の距離が等しくなるように設定した。ユーザが入り出るスポットは A-D とし、辺の中央に設置した。スポット間を移動するユーザのルートは予め数通りを用意された。サーバが保持するユーザの統計的な移動確率は図5のようになる。

ユーザは決められた回数スポット間を移動するとシステムから離脱する。スポット間の移動回数は受信期限の長さとしてフィールドのサイズに応じて調整する。ユーザがシステムから離脱すると新しいユーザがシステムに参加する。その際、新規ユーザ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。ユーザ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。

5.3 最適なコンタクトテーブルの更新頻度を求める実験

最も効率の良いコンタクトテーブルの更新頻度を求めるために実験を行った。この実験では交差点を出発してからのコンタクトテーブルの更新頻度を 80 秒～10 秒は 10 秒刻み、10 秒～1 秒は 1 秒刻みに変化させ、実験を行った。その他のパラメータを表4に示す。

評価項目として、端末が他の端末から取得できた断片数と端末のバッテリー消費量を測定した。同時に、コンタクトテーブルの更新によって使用された携帯電話網の通信帯域を測定するため、取得したコンタクトテーブルの全容量を測定した。各評価項目の相加平均を実験結果として表示す

る。端末が他の端末から取得した断片数とコンタクトテーブルの全容量を図6に示す。

表4 コンタクトテーブルの更新頻度を求める実験

端末数	500
コンテンツ種類数	20
受信期限	16 分
スポット間の移動回数	2 回
フィールドのサイズ	500m x 500m

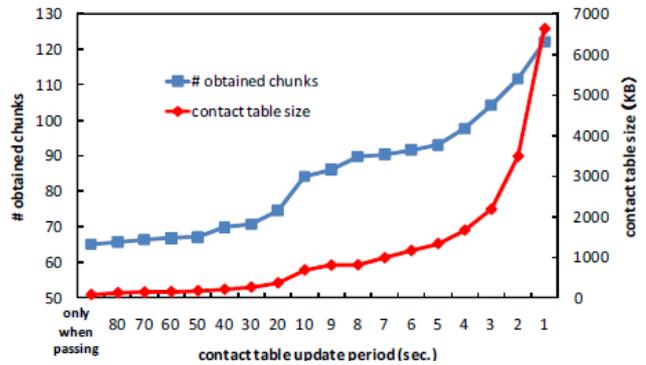


図6 コンタクトテーブルの更新頻度に対する取得断片数とコンタクトテーブルの総容量

コンタクトテーブルの更新頻度が高くなるにつれて他の端末から取得できた断片数が若干増加しており、更新頻度が 40 秒以下になるころから、増加量が伸びている。これはコンタクトテーブルの更新を頻繁に行うことで他の端末と遭遇することがより正確に予測できたからだと考えられる。取得したコンタクトテーブルの総容量は更新頻度が高くなるにつれて指数関数的に増加している。端末が消費したバッテリーに関しては、コンタクトテーブルの更新頻度が高くなるにつれて減少しているが、更新頻度が 8 秒を超えたころから増加している。これは、コンタクトテーブルの更新を頻繁に行うことで、他の端末といつ遭遇するか正確に予測でき、遭遇時間以外は近距離無線通信デバイスをスリープさせることができたが、更新頻度が 8 秒を超えるころから近距離無線デバイスをスリープさせることで節約できたバッテリー消費より、コンタクトテーブル更新に消費するバッテリー消費が大きくなったためだと考えられる。

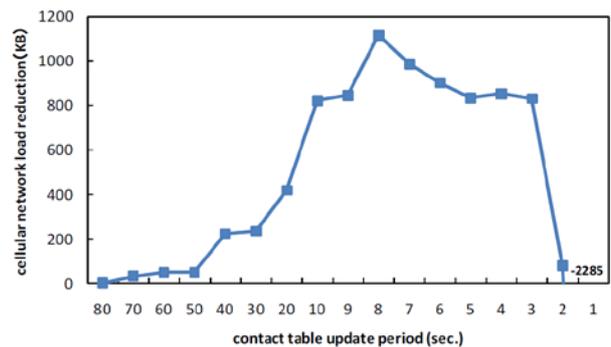


図7 コンタクトテーブルの更新頻度に対する節約できた携帯電話網の通信容量

コンタクトテーブルの更新頻度を増加させることで増加した取得断片の容量とコンタクトテーブルの更新にかかったオーバーヘッドの差を節約できた携帯電話網の通信容量と考え、それを図7に示す。この実験では、更新頻度が 8 秒の時、最も携帯電話網の通信帯域を節約できていると言

える。また、端末のバッテリー消費に関しても更新頻度が 8 秒の時が最も、バッテリー消費が少ない。これらより、最も効率の良い更新頻度は 8 秒と考え、今回の評価実験では、コンタクトテーブルの更新頻度は 8 秒に設定し、実験を行う。

5.4 提案手法の性能評価実験

提案手法の比較対象として、常時起動法とコンタクトオラクル法を使用した。提案手法の性能を評価するために、パラメータを様々に変化させ実験を行った。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、端末が他の端末から取得できた断片数である取得断片数を測定した。また、各端末のシステム滞在中のバッテリー消費量を測定し、これらを評価項目として用いる。受信期限より長くシステムに滞在している端末の評価項目の値をそれぞれ記録し、記録した値の相加平均を実験結果として表示する。また、要求コンテンツ全てを携帯電話網からダウンロードした時の端末のバッテリー消費量も示す。

常時起動法

端末は常に無線通信デバイスを起動させ、他の端末を探索し、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、遭遇するすべての端末を発見し、通信を行う。他の端末から断片を取得する際、取得する断片は通信相手端末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方法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。

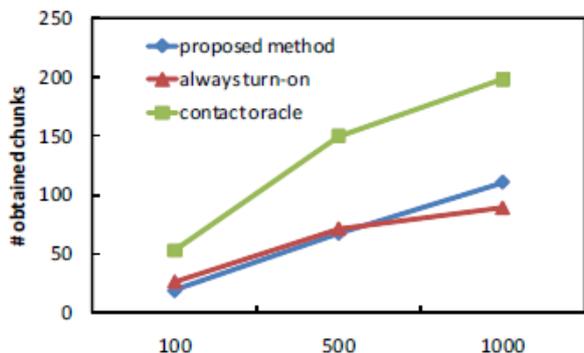


図 8 端末数変化 vs. 取得断片数

コンタクトオラクル法

各端末は全端末の位置情報、所有断片情報を所有しており、いつどの端末と通信可能になるか分かる。他の端末と通信を行わない時は常に無線通信デバイスをスリープさせ、消費電力を抑える。同じコンテンツを要求する他の端末が通信範囲内に入ると、無線通信デバイスを起動し、接続を開始する。他の端末から取得する断片、携帯電話網からダウンロードする断片は提案手法と同様、取得機会期待値が最も低い断片を選択する。携帯電話網からの断片のダウンロードの方法は、提案手法や常時起動法と同じである。この手法は、無線通信デバイスや携帯電話網などの通信機能を使うことなく他の端末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。

常時起動法は、他の端末といつ遭遇するか予測することで、取得断片数、電力消費量の性能がどれだけ良くなるか確かめるために比較手法として用いる。また、コンタクト

オラクル法は全ての端末といつ通信できるか把握しているため、取得断片数及び無線通信デバイス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。そのため、提案手法の性能の上界を示す手法として用いる。

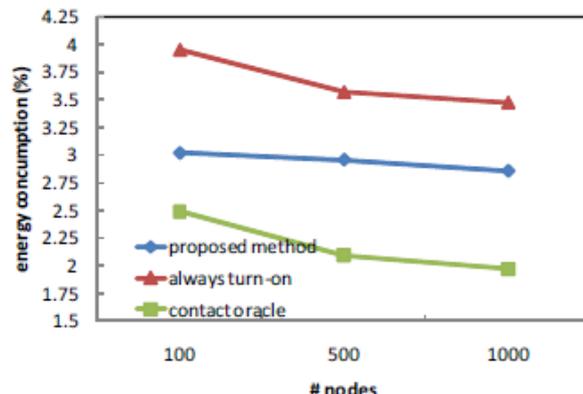


図 9 端末数変化 vs. 端末バッテリー消費

5.4.1 実験 1: 端末数が与える影響

端末数が与える影響を確認するため、端末数を変化させ実験を行った。実験のパラメータは表 4 と同じである。ただし、端末数を 100, 5000, 1000 と変えて実験を行った。

提案手法と各比較手法における取得断片数（ダウンロード断片+交換取得断片）を図 8 に、端末のバッテリー消費量を図 9 に示す。

端末数が増加することで、どの手法においても取得断片数が増加している。これは端末数が増加することで他の端末が近距離無線の通信範囲内に入ってくる頻度が増え、より多くの断片を取得することができたからである。バッテリー消費は、端末数が増加することでどの手法においても減少している。これは端末が増加することでより多くの断片を他の端末から取得できるようになり、より電力が必要な携帯電話網からのダウンロードの回数を減少させることができたからだと考えられる。提案手法は端末数が 1000 台と多い状況において、常時起動法の約 1.5 倍の断片を他の端末から取得しつつ、バッテリー消費は約 80% に抑えることができていた。また、要求断片の約 30% を近距離無線通信経由で取得することができていた。提案手法は端末数が多いほどバッテリー消費が少なくなり、端末数が 1000 台の時、要求断片全てを携帯電話網からダウンロードした時よりもバッテリー消費を抑えることができた。これらから、提案手法は端末数が多い環境で有利に働くと考えられる。

5.4.2 実験 2: コンテンツ種類数が与える影響

コンテンツの種類数が与える影響を確認するため、コンテンツ種類数を様々に変化させ実験を行った。実験のパラメータを表 4 と同じである。ただし、コンテンツ種類数を 10, 20, 40, 100 と変えて実験を行った。

提案手法と各比較手法における取得断片数を図 10 に、端末のバッテリー消費量を図 11 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他の端末から取得できる断片数が減少している。バッテリー消費に関しては、コンテンツ種類数が増加すると常時起動法は増加しているが、提案手法とコンタクトオラクル法はそれほど増加していない。コンテンツ種類数が増加すると同じコンテンツを要求している他の端末が少なくなり、提案手法とコンタクトオラクル

ル法は無線通信デバイスをスリープさせる時間が長くなる。その結果、バッテリーを節約できたのだと考えられる。提案手法はコンテンツ種類数が 10 と少ない場合、コンタクトオラクル法の約 65% 他の端末から断片を取得できているのに対し、コンテンツ種類数が 100 と増加した場合は、コンタクトオラクル法の約 40% 程度しか他の端末から断片を取得できていない。また、コンテンツ種類数が 10 と少ない時は、要求断片全てを携帯電話網からダウンロードするよりバッテリー消費が小さくなっている。これらより、提案手法はコンテンツの種類が少ない環境で有利になると考えられる。

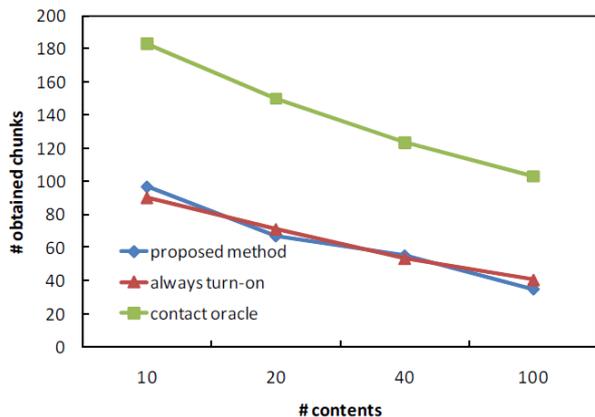


図 3 コンテンツ種類数変化 vs. 取得断片数

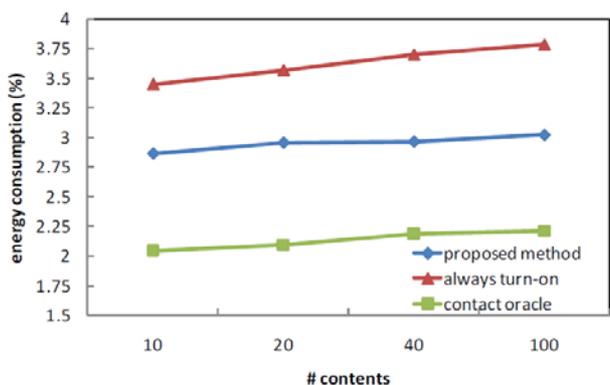


図 4 コンテンツ種類数変化 vs. 端末バッテリー消費

6. おわりに

本論文では、多数のユーザが大容量コンテンツ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端末間でコンテンツの断片を Wi-Fi や Bluetooth などの近距離無線通信で送受信する協調ダウンロード手法を提案した。提案手法は、各端末がいつどの端末と遭遇するか、端末がサーバに登録した移動経路、交差点の出発時刻から予測し、近距離無線を使用することで増加する消費電力を抑えながら、各端末が断片の取得を効率よく行う点に特色がある。評価を行った結果、提案手法は端末数が 1000 台とユーザの密度が高い場合、他の端末から要求断片の約 30% 取得することができ、端末が消費した電力も常時起動法の 80% 程度に抑えることができた。

また、提案手法は端末数が多い状況、またはコンテンツ種類数が少ない状況で携帯電話網の使用量を抑えつつ、要

求コンテンツを全て携帯電話網からダウンロードする場合よりも端末のバッテリー消費を抑えることができた。提案手法は、端末の OS やキラーアプリのアップデートなどにより多数のユーザが同時に更新を行う際などに特に有効であると考えられる。

参考文献

- 1) M. Conti, E. Gregori, and G. Turi: "A cross-layer optimization of gnutella for mobile ad hoc networks," Proc. of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, (MobiHoc 2005), pp. 343-354 (2005)
- 2) S. Rajagopalan and C.-C. Shen: "A Cross-layer Decentralized BitTorrent for Mobile Ad hoc Networks," Proc. of the 3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networks and Services (MOBIQUITOUS 2006), CD-ROM (2006)
- 3) A. Nandan, S. Das, B. Zhou, G. Pau, and M. Gerla: "AdTorrent: Digital Billboards for Vehicular Networks," Proc. of The First International Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications (V2VCOM 2005), pp. 286-294 (2005)
- 4) A. Nandan, S. Tewari, S. Das, M. Gerla, and L. Kleinrock: "AdTorrent: Delivering Location Cognizant Advertisements to Car Networks," Proc. of The 3rd Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS 2006), pp. 203-212 (2006)
- 5) A. Nandan, S. Tewari, and L. Kleinrock: "Modeling Epidemic Query Dissemination in Ad-Torrent Network," Proc. of IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2006), pp. 1173-1177 (2006)
- 6) L. McNamara, C. Mascolo, and L. Capra: "Content Source Selection in Bluetooth Networks," Proc. of International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networks and Services (MOBIQUITOUS 2007), pp.1-8 (2007).
- 7) L. McNamara, C. Mascolo, and L. Capra: "Media Sharing based on Colocation Prediction in Urban Transport," Proc. of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2008), pp.58-69 (2008).
- 8) S.-S. Kang and M. Mutka: "Efficient Mobile Access to Internet Data via a Wireless Peer-to-Peer Network," Proc. of 2004 IEEE Int'l. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom2004), pp.197-205 (2004).
- 9) S. Jung, U. Lee, A. Chang, D.-K. Cho, and M. Gerla: "BlueTorrent: Cooperative Content Sharing for Bluetooth Users," Proc. of 2007 IEEE Int'l. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom2007), pp.47-56 (2007).
- 10) U. Lee, S. Jung, A. Chang, D.-K. Cho, and M. Gerla: "P2P Content Distribution to Mobile Bluetooth Users," IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 59, No. 1, pp.344-355 (2010).
- 11) 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 Wi-Fi 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).
- 12) Wi-Fi Alliance: Wi-Fi Direct™, http://www.wi-fi.org/Wi-Fi_Direct.php (accessed on April 23rd, 2011).