

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

花野博司^{†1} 村田佳洋^{†2} 柴田直樹^{†3}
安本慶一^{†1} 伊藤実^{†1}

本論文では、多数のユーザに対しコンテキストに合わせた動画広告配信を行うことを目的として、WiFiと携帯電話網を併用することにより、携帯電話網をできるだけ圧迫しない動画広告配信手法を提案する。提案手法では、ユーザのコンテキストからユーザにとって有用なコンテンツおよびそのデッドライン（ダウンロード期限）を端末が自動的に決定すると仮定し、断片に分割された動画広告ファイルに対し、近傍の端末群が同じファイルをダウンロード中の場合、それらの端末が別々の断片を携帯電話網から取得し、WiFiのアドホックモード経由で交換することで、携帯電話網の圧迫を軽減する。さらに、デッドラインまでの時間の長さに応じて携帯電話網の使用率を自動調整する機能を導入する。提案手法では、多数の端末が存在するときにもうまく動作させるため、サーバによる集中制御は行わず、各端末が自律的・確率的にとるべきアクションを決定するアルゴリズムを提案する。エリアサイズ500m×500mに携帯端末数500台が存在する場合についてシミュレーション実験を行い提案手法の性能を評価した。その結果、提案手法が携帯電話網の使用率を大きく削減できること、様々なダウンロード期限に合わせて携帯電話網使用率を自動調整し、各端末によるダウンロード期限内のコンテンツ取得を可能にすることを確認した。

A Cooperative Download Method for Low Cost Video Ads Dissemination through WiFi-cellular Hybrid Network

HIROSHI HANANO,^{†1} YOSHIHIRO MURATA,^{†2}
NAOKI SHIBATA,^{†3} KEIICHI YASUMOTO^{†1}
and MINORU ITO^{†1}

In this paper, we propose a method for video ads dissemination through a hybrid network consisting of WiFi and cellular networks, to provide timely delivery of video ads with preferred content to users according to the users' contexts. In our proposed method, we assume that each mobile terminal auto-

matically selects appropriate video ads and sets the deadline of receiving each ad according to the user context, and that the file of each video ad is divided into small-sized chunks. Our method allows mobile terminals in the same WiFi radio range download different chunks and exchange the chunks with each other over WiFi communication so that the cellular network usage becomes as small as possible. In order to make the method work effectively for a large number of nodes, we propose an algorithm which makes mobile nodes autonomously and probabilistically decide their actions without a central control. Furthermore, we introduce a mechanism to automatically control the usage of cellular network depending on the deadlines of receiving video ads. We evaluated the performance of the proposed method by simulations for a case that 500 nodes exist in 500m×500m square. As a result, we confirmed that the proposed method reduces cellular network usage to great extent and automatically controls the usage of cellular network for various lengths of deadlines and finishes downloading all the ads by their deadlines.

1. はじめに

近年、携帯電話で動画が再生できるようになり、携帯電話でデジタルテレビやダウンロードした動画を見るサービスが一般的になっている。このような状況で、携帯電話に対する動画広告配信が注目を集めている。他方、携帯電話に搭載されたセンサの情報や、ユーザの入力（スケジュール、Web検索など）の分析によってユーザのコンテキスト（位置、時刻、状況、予定など）を取得する技術が開発されている¹⁾。ユーザのコンテキストに合わせた動画広告配信ができれば、従来の広告に比べはるかに高い宣伝効果が期待できる。しかし、ユーザのコンテキストに合わせた動画広告配信を行うためには、多数のコンテンツをユーザごとに異なる時刻に配信する必要があり、携帯電話網の通信帯域を圧迫する。そのため、携帯電話網をできるだけ圧迫しない動画広告配信手法が必要となる。多数のユーザによるファイルダウンロードで発生するネットワークへの負荷を軽減する手法として、ノード群が連携して同じファイルをダウンロードすることで各ノードの利用帯域を減らすBitTorrent²⁾に基づいた情報交換手法が広く研究されており、モバイルアドホックネットワーク（MANET）

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

^{†2} 広島市立大学
Hiroshima City University

^{†3} 滋賀大学
Shiga University

への適用事例も報告されている³⁾。しかし、MANET には端末間の通信距離の制約とモビリティにより、広域へのデータの伝達率の面で問題がある。

本論文では、コンテキストに合わせて多数のユーザに動画広告を配信する手法を提案する。提案手法では、携帯電話網と WiFi のアドホックモードを併用し、本来携帯電話網のみを使用した場合に発生する複数の端末が重複して同じデータをダウンロードする無駄を削減する。これにより、高い配信率を維持したまま携帯電話網の使用率を削減する。

多数のユーザがいる都市環境を想定し、ユーザが持っている携帯電話（端末）はコンテキストの変化時にそのコンテキストに合わせて自動的にいくつかの動画広告を選択し、受信する各広告のデッドライン（受信期限）を設定すると仮定する。また、コンテンツのファイルは断片に分割されているものと仮定する。このとき、携帯電話網の使用率をできるだけ削減し、かつデッドラインまでに要求されたコンテンツの受信を行うための手法を提案する。

提案手法では携帯電話網使用率を削減するために、各端末の各時点でのアクションとして、持っていない断片については携帯電話網からダウンロードする、または、近傍の端末から WiFi 通信により受信する、持っている断片については近傍のその断片を必要としている端末に対し WiFi 経由で送信する、のいずれかから決定する。高い効率、スケラビリティ、頑健性を得るため、各端末が自らのアクションを決定する方法として集中制御ではなく、単純な操作からなる確率的な分散アルゴリズムを提案する。さらに、デッドラインまでにダウンロードを完了するために、デッドラインまでの時間の長さに応じて携帯電話網の使用率を自動調整する機能を導入する。

提案手法を評価するために、エリアサイズ 500 m × 500 m に携帯端末数 500 台が存在する場合についてシミュレーション実験を行った。その結果、デッドラインまでの時間が十分に長い場合、携帯電話網使用率を約 98.9%削減できた。また、デッドラインまでの時間を様々な長さに設定した場合でも、携帯電話網の使用率が自動調整され、デッドライン内にコンテンツ取得ができた。さらに、端末が歩行者速度で移動する場合でも静止時と同様の性能を達成することを確認できた。そして、動画広告のコンテンツ数が増えて、近傍に同じ広告を要求する端末数が減少した場合でも、提案手法は携帯電話網使用率を自動的に増加させ、デッドライン内にダウンロードが完了することを確認した。

2. 関連研究

本章では、携帯電話網と無線 LAN による近距離通信を併用することで端末の通信品質やスループットを改善する研究、無線ネットワークにおいて端末間でのファイル交換の効率を

改善する研究をサーベイし、本論文の位置づけを明確化する。

携帯電話網の帯域を節約したり、携帯電話網の有効な帯域を増やしたりするために IEEE802.11 ベースの MANET を使った研究が行われている。Aggelou らは、受信地域の拡大や無線リンクの切断に対して頑健にするために Global System for Mobile Communications (GSM) に MANET を併用した手法を提案している⁴⁾。この手法では直接基地局と通信するか、携帯端末を中継して間接的に基地局と通信するように切り替えるかを判断するために受信した信号の強度を使用している。Lin らは携帯電話網に MANET のマルチホップを併用した Multihop Cellular Network (MCN) を提案している⁵⁾。携帯電話網のみを介した Single-hop Cellular Network (SCN) に比べ、MCN では必要な携帯電話網の基地局の削減やスループットの改善が可能であることが示されている。Hsieh らは、携帯電話網と MANET の性能についてシミュレーションを行っている⁶⁾。この結果 MANET がスループットや遅延、消費電力の面でより良い性能を示す一方、モビリティがある場合に性能が大きく落ちることやネットワークの切断が発生することを示し、さらに、携帯電話網をベースとして MANET を併用することでより良い性能を示すシンプルなネットワークモデルを提案している。また、携帯電話網のセルが混雑する場合に MANET を経由して隣接する軽負荷のセルを利用するシステムが提案されている^{7),8)}。Bhargava らは、MANET を既存の携帯電話網で補助することでパフォーマンスやセキュリティの改善が行える Cellular Aided Mobile Ad Hoc Network (CAMA) と呼ばれる手法を提案している⁹⁾。Luo らは、第三世代携帯電話網 (1xEV-DO¹⁰⁾) のセル全体の有効な帯域を増やすために、IEEE802.11b ベースの MANET を統合する手法を提案している¹¹⁾。この手法では、通信品質の悪い端末へのパケットを通信品質の良い端末に中継させている。

上記で述べた既存研究は、MANET を併用することで端末の携帯電話網への接続性や端末あたりのスループットを高めることを目的としており、携帯電話基地局が扱うことが可能なキャパシティを増加させるものではない。そのため、本研究が扱う動画広告配信のように基地局経由で配信されるアプリケーションの通信データ量の増加には対応できない。

一方、無線ネットワークにおいて、モバイル端末どうして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、ノードの出入りなど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¹²⁾。Rajagopalan らは、MANET 上での BitTorrent の仕組みを提案し実装している³⁾。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^{13)–15)}。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。

これらの既存手法は MANET のみを使用したものであるため、データの到達率や伝送可能データサイズの端末数に対するスケラビリティに乏しく、動画広告配信など比較的大容量のデータを多数のユーザに配信するといったアプリケーションに適用するのは難しい。

以上に述べたように、既存研究は、(1) 携帯電話網と MANET を併用するもの、(2) MANET のみを使用するものの 2 種類がある。このうち、(1) では、MANET を併用することで端末のスループットや通信品質を向上することを目的としており、動画広告配信に十分な通信キャパシティの確保という目的には使用できない。また、(2) では、MANET のみを対象としており、動画広告配信のためには、データの到達性、配送可能データサイズなどの点で使用は困難である。一方、著者が文献 16) で提案した動画広告配信手法は、比較的大容量の動画広告の効率良い配信を目的に、携帯電話網と WiFi 通信を併用することで、携帯電話網の (基地局における) 使用率を削減し、ネットワーク全体で扱うことができるデータ量を増加させるという点で既存研究と異なる。本論文では、文献 16) で提案した動画広告配信手法に、新たにコンテンツ受信デッドラインに応じた携帯電話網使用率調整機能を拡張するとともに、本機能を含む提案手法の詳細な性能評価を行う。

3. 動画広告配信問題

本章では、動画広告配信問題の仮定を与え、問題を定式化する。

3.1 仮定

3.1.1 アプリケーションモデル

アプリケーションモデルを以下のように仮定する。全端末の集合を $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ とする。各ユーザはそれぞれ 1 台の端末を持つとし、 $u \in U$ によりユーザもしくは端末を表す。動画広告の集合を $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ とする。各コンテンツ c_i は同一サイズ $Size$ の多数の断片から構成される。コンテンツ c_i の j 番目の断片を $c_{i,j}$ とする。端末 u にはユーザ u のコンテキスト (位置, 時刻, 状況, 予定など) が与えられ、ダウンロードしたいコンテンツの集合と、各コンテンツに対するデッドラインを端末が自動的に決定する。たとえば、仕事帰りに映画を見に行く予定を端末に入力したとき、端末は映画のトレーラを自動的に選択し、ユーザが職場を出る時刻をデッドラインに設定する。端末 u がダウンロードしたいコンテ

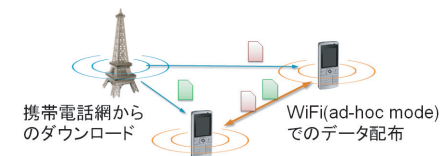


図 1 携帯電話網と WiFi の併用による協調ダウンロード

Fig. 1 Cooperative download in Cellular-WiFi hybrid network.

ンツの集合の各要素を $u.c_i$ 、そのダウンロードのデッドラインを $u.c_i.deadline$ と表記する。また、 $u.c_i$ に含まれる各断片 ch について、 ch の取得期限を $ch.deadline = u.c_i.deadline$ とする。

想定するアプリケーションでは複数のコンテンツをダウンロード中に、端末が新しいコンテンツをダウンロードの対象として追加したり、コンテキストの変化によりコンテンツのダウンロードを中止する場合がある。さらに、ダウンロードしたいコンテンツが存在しない場合も考えられる。本論文ではこれらの問題については言及しないが、提案手法において同様に扱える。

3.1.2 通信モデル

図 1 のように、各端末 u は WiFi (IEEE802.11 アドホックモードなど) と携帯電話網 (CDMA など) を同時に使用できると仮定し、携帯電話網からダウンロードしたファイルを WiFi により近隣端末に配布することで、ファイルのダウンロード効率を向上させ、かつ、携帯電話網の圧迫を軽減することを目指す。

動画配信サービスを行う地理的な領域をサービスエリアと呼ぶ。サービスエリアには全体のサービスエリアをカバーするために十分な数の基地局がある。携帯電話網では HSDPA や CDMA2000 1x EV-DO¹⁰⁾ のような第三世代通信サービスが利用可能である。各端末が使用可能な携帯電話網の帯域を BW_c とし、携帯電話網を通じてパケットを受け取るために基地局に接続できる最大端末数を CAP_c とする。WiFi の通信可能距離を R_w とする。各端末 u は WiFi デバイスを通じて u を中心とした半径 R_w の円内にパケットをブロードキャストでき、時刻 t に u の電波範囲内にいる端末の集合を $Ngh(u, t)$ とすると、これらの端末は送信端末から遠い端末ほど低い確率でパケットを受け取る。端末が WiFi を通じて通信するとき、CSMA/CA が利用できるとする。同じ電波範囲内の WiFi で利用可能な単位時間あたりの伝送容量を BW_w とする。同じ電波範囲内のすべての端末は BW_w を共有する。各端末が携帯電話網を通じてアクセスできる固定通信網上にサーバ s がある。各端末は s 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。

3.2 問題定義

ユーザ端末に要求されたすべてのコンテンツの中で最も遅いデッドラインの時刻を T とする。要求されたコンテンツをダウンロードするためにデッドラインまでにすべてのユーザ端末が携帯電話網でダウンロードした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, WiFi でブロードキャストする, WiFi から受信するアクションをそれぞれ $d(u, ch, t)$, $b(u, ch, t)$, $r(u, ch, t)$ とする (ここで, $r(u, ch, t)$ の t はアクション完了時刻, 他の 2 つの t はアクション開始時刻であることに注意)。すべてのユーザが時刻 T までにとるアクション「ダウンロード」「ブロードキャスト」「受信」の集合をそれぞれ $Cell$, $Bcast$, $Recv$ とする。

まず, 各ユーザ u が要求するコンテンツの断片 $u.c_{i,j}$ は携帯電話網を通じてダウンロードするか WiFi を通じて受信しなければならない。この制約条件を式 (1) に示す。

$$\forall u \in U, \forall u.c_i \in u.Reg, \forall j, \exists t, d(u, u.c_{i,j}, t) \in Cell \vee r(u, u.c_{i,j}, t) \in Recv \quad (1)$$

集合 $Cell$ と $Recv$ に含まれる各アクションで取得される断片はデッドラインまでに取得が完了しなければならない。また, 各ダウンロードは $Size/BW_c$ の時間がかかる。この制約条件を式 (2) に示す。

$$\begin{aligned} \forall d(u, ch, t) \in Cell, t + Size/BW_c \leq ch.deadline \wedge \\ \forall r(u, ch, t) \in Recv, t \leq ch.deadline \end{aligned} \quad (2)$$

次に, 端末 u が断片 ch を受信するには, 断片 ch は u の電波範囲内のほかの端末にブロードキャストされなければならない。送信端末がパケットの送信を完了する時刻は受信端末がパケットを受信する時刻と同じと仮定する。この制約条件を式 (3) に示す。

$$\begin{aligned} \forall r(u, ch, t) \in Recv, \exists b(u', ch, t') \in Bcast, \\ t = t' + Size/BW_w \wedge u' \in Ngh(u, t') \end{aligned} \quad (3)$$

同じ時刻に携帯電話網を使える端末数は制限される。断片をダウンロードするのにかかる時間は $Size/BW_c$ である。この制約条件を式 (4) に示す。

$$\begin{aligned} \forall d(u, ch, t) \in Cell, \\ |\{u' \mid d(u', ch', t') \in Cell, u \neq u', |t - t'| \leq Size/BW_c\}| \leq CAP_c \end{aligned} \quad (4)$$

端末が断片をブロードキャストするには, 端末はその断片を集合 $Cell$ または $Recv$ に属するいずれかのアクションで入手していなければならない。この制約条件を式 (5) に示す。

$$\begin{aligned} \forall b(u, ch, t) \in Bcast \\ (\exists d(u, ch, t') \in Cell, t' + Size/W_c < t \vee \exists r(u, ch, t'') \in Recv, t'' < t) \end{aligned} \quad (5)$$

WiFi の無線範囲では, 同時には 1 つの端末しかブロードキャストを行うことができない。したがって, 以下の制約 (6) が成り立つ。

$$\forall b(u, ch, t) \in Bcast, \neg \exists b(u', ch', t') \in Bcast, u \neq u' \wedge |t - t'| < Size/BW_w \quad (6)$$

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ようなアクションの集合 $Cell$, $Bcast$, $Recv$ を求めることが本問題の目的である。対象問題の目的関数を式 (7) で示す。

$$\text{minimize } |Cell| \quad \text{subject to } (1) - (6) \quad (7)$$

ノード間の隣接関係をつねに把握できる場合, 上記の問題は既存の自動定理証明系を用いて解くことができる^{17),18)}。しかし, 実環境では移動する端末の隣接関係をすべて知ることは難しく, また自動定理証明系による集中制御方式はノード数に対するスケーラビリティの点で問題がある。そこで, 次章では上記の問題を解くためのヒューリスティックな分散アルゴリズムを提案する。

4. 動画広告配信プロトコル

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, 提案する動画広告配信プロトコルを詳述する。

4.1 基本方針

提案手法では以下の 3 つの基本方針を採用する。

- (1) すべての端末に動画広告の伝送を公平に行わせるために, 各コンテンツを同じサイズの多数の断片に分割する。
- (2) 携帯電話網の使用量を最小化するために, 端末どうして WiFi を通じて断片を交換する。
- (3) 端末はローカルの情報だけで, 「ダウンロード」「ブロードキャスト」「受信」のアクションを自律的に決定する。

2 つの近傍端末が携帯電話網を使って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はない。このような状況を避けるために, 近傍 (たとえば 1 ホップ圏内) の需要を把握し, 断片をダウンロードし, その断片を近傍に流通させる。そのため, 次の 2 つのフェーズからなるプロトコルを提案する。

- (i) 需要情報交換フェーズ: WiFi の電波範囲内の端末は欲しいコンテンツの情報と所有している断片の情報を交換する。
- (ii) アクション決定フェーズ: 各端末はアクション (携帯電話網から断片をダウンロードするか, すでに所有している断片をブロードキャストするか, 他の端末によってブロードキャストされた断片を受信するか) を決定し, 実行する。

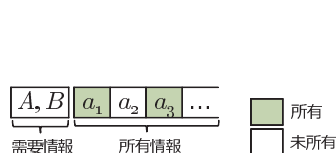


図 2 ハローメッセージ
Fig. 2 Hello message.

送信端末ID					
n_1	A, C'	a_1	a_2	a_3	...
n_2	B, D	b_1	b_2	b_3	...
n_3	A, D	a_1	a_2	a_3	...

図 3 近傍表
Fig. 3 Neighbor table.

4.2 動画広告配信プロトコル

4.2.1 需要情報交換フェーズ

端末がアクションを決定するためには、需要情報と所有情報が必要である。需要情報は端末がどのコンテンツが欲しいのかという情報、所有情報は端末がどのコンテンツのどの断片を持っているのかという情報である。各端末 u は需要情報と所有情報を他の端末に知らせるために、図 2 に示すようなハローメッセージを決められた時間間隔 h (5 章のシミュレーションで用いるパラメータ 1) で定期的にブロードキャストする。各ハローメッセージは送信端末の需要情報と所有情報からなり、それらはコンテンツの ID と断片をすでに持っているかを示すビット列で表現される。

各端末はハローメッセージを受信すると図 3 に示すような近傍表を作成、管理する。このテーブルは端末がハローメッセージを受信するたびに更新される。各端末は近傍表を検査することで近傍で誰も持っていない断片が分かる。

4.2.2 アクション決定フェーズ

このフェーズでは、各端末のアクションを決定する。1 つの端末において WiFi と携帯電話網は同時に利用可能であるため、これら 2 つのネットワークへのアクションは互いに独立に決定される。

WiFi の電波範囲内で断片 ch を望んでいる端末数を $N_w(ch)$ とする。携帯電話網を使って断片 ch をダウンロードする重要度を式 (8) で定義する。

$$w_c(ch) = \frac{1}{N_w(ch)} \tag{8}$$

重要度は端末がこのアクションを行うことがどの程度重要かを示している。直観的には、同じ断片 ch を要求する端末が近傍に複数存在する場合、それらの端末のうち 1 つが ch をダウンロード、ブロードキャストすれば十分なため、式 (8) でダウンロードする確率を決めるのは自然である。

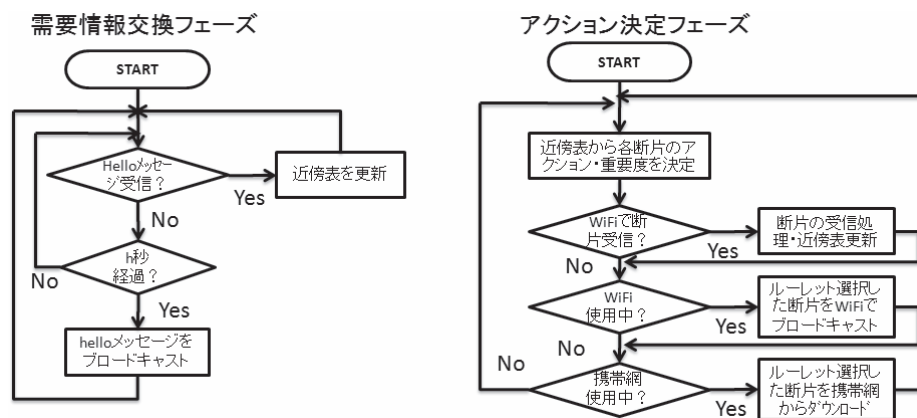


図 4 両フェーズの動作フローチャート
Fig. 4 Flowcharts of demand exchange phase and action decision phase.

他の端末が断片を欲しがっている場合、各端末は断片を共有するためにブロードキャストする。複数の端末が同じ時間に同じ断片をブロードキャストしないようにするために、各端末によるブロードキャストの確率をコントロールする。断片 ch をすでに所有している端末の数を $N_h(ch)$ とする。式 (8) と同様の考え方で、端末が WiFi を使って断片 ch をブロードキャストする重要度を式 (9) で定義する。

$$w_b(ch) = \frac{1}{N_h(ch)} \tag{9}$$

各アクションにおいて、各端末はどの断片をダウンロードするのかまたはブロードキャストするのかを決定しなければならない。その決定法としてルーレット選択を採用する。 N 個の断片 ch_1, \dots, ch_N に対し、ルーレット選択では、式 (8), (9) で定義した重要度 (以下では w と表記) を用いて端末が断片 ch_i を選択する確率 p_{ch_i} を式 (10) で定義する。

$$p_{ch_i} = \frac{w(ch_i)}{\sum_{k=1}^N w(ch_k)} \tag{10}$$

4.2.3 各フェーズの流れ

需要情報交換フェーズとアクション決定フェーズは並行して動作する。両フェーズの動作フローチャートを図 4 に示す。

需要情報交換フェーズでは、WiFi でハローメッセージが送られていれば受信する。送ら

れておらず自端末が WiFi を使用していなければ、最後にハローメッセージを送信した時刻と現在時刻を比較し、一定時間以上経過していればハローメッセージを送信する。ハローメッセージを受信した場合、近傍表を更新する。

アクション決定フェーズでは、WiFi で断片が送られていれば受信する。送られておらず自端末が WiFi を使用していなければ、断片をブロードキャストする。3.1.2 項の仮定より、端末が断片をブロードキャストする際には、WiFi の MAC 層プロトコルでのキャリアセンスにより他の端末とのフレーム衝突はある程度防げる。しかし、同一無線範囲内にブロードキャストを行う端末の数が多き場合に、衝突やバックオフによる再送を避け、効率良い通信を行わせるため、ブロードキャストはある衝突回避確率 β (5 章のシミュレーションで用いるパラメータ 2) で行わせることとした。 β は定数として与えるものとする。また、自端末が携帯電話網を使用していなければ携帯電話網を使用して断片をダウンロードする。それぞれの断片を選択するかは式 (9), (10) の重要度に従ってルーレット選択で決定する。近傍端末と WiFi 帯域を共用するため、各端末はアクションを行わないことも確率的に選択する。

4.2.4 デッドラインまでの時間を考慮した携帯電話網使用率調整機能

全端末が要求した断片数に対する携帯電話網からダウンロードされた断片数の割合のことを携帯電話網使用率と定義する。

前述の基本的なアルゴリズムについて携帯電話網使用率を調査するための予備実験を行ったところ、ダウンロード開始直後にだけ携帯電話網を使用し、近傍に必要な断片があることがハローメッセージから分析できた後は携帯電話網が使用されなくなった。また、多数の端末が異なる断片を要求する状況では、WiFi のアドホックモードで送られてきた断片が各端末にとって必要である確率 (ヒット率と呼ぶ) が低下し、コンテンツのダウンロードを完了した割合 (ダウンロード率と呼ぶ) が 90% を超えたあたりでダウンロード率の上昇が急激に遅くなってしまった。さらに、デッドラインが短い場合にダウンロードが完了しない場合があることや、デッドラインの長短にかかわらず携帯電話網の使用率が変わらないことが分かった。この問題を解決するために、携帯電話網使用率調整機能を導入する。

端末 u が取得したい各コンテンツ $u.c_i$ に対し、端末 u のダウンロード開始時刻を $u.c_i.starttime$ 、コンテンツ取得デッドラインを $u.c_i.deadline$ 、現在時刻を t とする。 u のコンテンツ $u.c_i$ 取得に対する、時刻 t でのデッドラインに対する時間の経過率 $etr(u.c_i, t)$ を以下の式で定義する。

$$etr(u.c_i, t) = \frac{t - u.c_i.starttime}{(u.c_i.deadline - u.c_i.starttime)} \quad (11)$$

また、 u のコンテンツ $u.c_i$ に対する、時刻 t でのダウンロード率を $dr(u.c_i, t)$ と表記する。4.2.2 項で説明したように、各端末において、WiFi と携帯電話網へのアクションは並行に実行される。この際、携帯電話網使用率調整機能では、端末 u は、取得したい各コンテンツ $u.c_i$ に対し、時間経過率 $etr(u.c_i, t)$ よりダウンロード率 $dr(u.c_i, t)$ が下回っていれば携帯電話網を使用する (すなわち、携帯電話網に対するアクションを 1 つ実行する)。このとき、携帯電話網に対するアクションが存在しない場合には、WiFi 経由で受信しようとしている $u.c_i$ の断片のいずれかを携帯電話網を介してダウンロードするアクション (重要度は 1 とする) に変更する。逆にダウンロード率が時間の経過率以上である間は、携帯電話網に対するアクションを実行しない。

より具体的には、デッドラインに対して少し余裕を持ってダウンロードを完了するための係数 α (1 より小さい実数定数で、安全率と呼ぶ。5 章のシミュレーションで用いるパラメータ 3) を導入し、以下の式 (12) が成立する間は、携帯電話網に対するアクションを実行し、成立しない間は、WiFi に対するアクションを実行する。

$$dr(u.c_i, t) < \frac{etr(u.c_i, t)}{\alpha} \quad (12)$$

なお、携帯電話網に対するアクションを実行する際には、自端末が必要とする断片がすべて近傍に存在する (WiFi 経由で取得できる) 場合でも、自端末が欲しい断片からランダムに選択しダウンロードする。

5. シミュレーションによる評価

デッドラインの制約を満たして動画広告のダウンロードを行う場合、提案手法によって携帯電話網の使用率をどの程度削減できるかを評価するため、シミュレーション実験を行った。シミュレーションフィールドとして、500 m × 500 m および 1,000 m × 1,000 m の障害物のない正方形領域を用いた。また、モバイルノードの移動モデルとして、モバイルアドホックネットワーク用通信プロトコルの性能評価に最も広く用いられているランダムウェイポイント (RWP: Random Waypoint)¹⁹⁾ を用いた。RWP では、各モバイルノードは、シミュレーションフィールド上のランダムに決めた目的地に向かってランダムに決めたスピードで直線的に移動し、目的地に到着後はランダムな時間 (pause time と呼ぶ) 静止した後、新しい目的地に移動する。実験では、モバイルノードが、等速度かつ連続的に移動することを想定して、速度を 4 Km/h、pause time を 0 秒で固定した。

4 章で説明したように、提案プロトコルで用いられているパラメータは、ハローメッセー

ジ送信間隔 h , WiFi ブロードキャスト時の衝突回避確率 β , 携帯電話網使用率調整機能における安全率 α である. また, 提案手法の性能に影響を与えると思われるシミュレーション時のパラメータは, 電波範囲内の端末数 (端末密度), 端末の移動の有無, コンテンツの取得デッドライン, 端末あたりの要求コンテンツ数である.

まず, 提案プロトコルの適切なパラメータ値を見つけるために h および β を変えてシミュレーションを行った. 次に, 端末密度やモビリティの影響を調べるためにフィールド面積を変更したりモビリティを導入したりしてシミュレーションを行った. さらに, 携帯電話網使用率調整機能を導入することでデッドラインに適応できることを確認するためにデッドラインを変化させてシミュレーションを行った (この際, パラメータである安全率 α には, 予備実験で得た値 0.99 を用いた). そして, 実環境でも提案手法が有効に機能することを確認するために, 実環境に近い環境を再現しシミュレーションを行った. 最後に, 提案手法のスケラビリティを評価するためにコンテンツ数を変化させてシミュレーションを行った.

5.1 シミュレーションの共通設定

実験のために 1 ミリ秒単位でイベントをシミュレーションできるネットワークシミュレータを開発した. シミュレーション時刻の 1 秒ごとに, 携帯電話網からダウンロードした断片の割合の平均を計測し, シミュレーション終了時に全端末が要求する全断片の取得にかかった時間を記録した.

携帯電話網の使用率 cr は, ダウンロードした断片数 N_d と受信コンテンツの全断片数 N_s に対して下式のように定義される.

$$cr = \frac{N_d}{N_s} \quad (13)$$

なお, 実験では, 各コンテンツのデータサイズは 1.5 M バイトであり, 1,000 個の断片に分けられているとした. すなわち各断片のサイズは 1.5 K バイトである.

携帯電話の帯域制限をシミュレーションするために, 基地局は最大 64 台までの端末が同時に接続できるという制限を設けた. また, 各端末が使用する帯域を 1.2 Mbps に設定した. また, 下式より各断片のダウンロードには 10 ミリ秒かかるとした.

$$\frac{1000}{10} \times 1.5 \text{ KB} \times 8 \text{ bit} = 1.2 \text{ Mbps} \quad (14)$$

WiFi の電波範囲は 200 m とし, WiFi によるパケットの伝送成功率に仲上分布²⁰⁾を用いた. 通信可能距離が 200 m のとき, $CR = 139 \text{ m}$ となり, 送信者と受信者間の距離 d が CR 以下のときの伝送成功率 P_R が式 (15) で定義され, d が CR より遠いときは式 (16) で

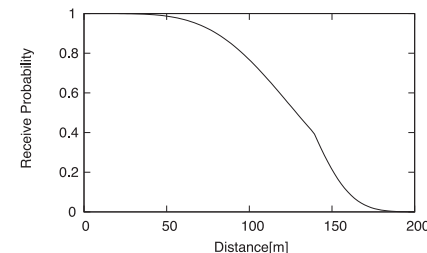


図 5 距離に対するパケット伝送成功率

Fig. 5 Successful packet reception rate vs. distance.

定義される. 図 5 に確率分布を示す.

$$P_R = e^{-3\left(\frac{4d}{CR}\right)^2} \left(1 + 3\left(\frac{4d}{CR}\right)^2 + \frac{9}{2}\left(\frac{4d}{CR}\right)^4\right) \quad (15)$$

$$P_R = e^{-3\gamma\left(\frac{(4d)^2}{CR}\right)^2} \left(1 + 3\gamma\left(\frac{(4d)^2}{CR}\right)^2 + \frac{9}{2}\gamma^2\left(\frac{(4d)^2}{CR}\right)^4\right) \quad (16)$$

シミュレーション中では, 同一無線範囲での通信帯域を 1.7 Mbps に設定した. また, 式 (17) から, WiFi のアドホックモードでのブロードキャストに 7 ミリ秒かかるとした. これは, ネットワークシミュレータ QualNet²¹⁾ の IEEE 802.11 のパラメータを元に決定した.

$$\frac{1000}{7} \times 1.5 \text{ KB} \times 8 \text{ bit} \cong 1.7 \text{ Mbps} \quad (17)$$

WiFi では MAC 層で CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) が使用でき, キャリア検出や衝突回避が自動的に行われるものとする. ただし, それでも衝突回避ができない場合やネットワークの公平利用のために 4 章で述べた衝突回避確率 β を用いる.

5.2 実験 1: 基本的なアルゴリズムにおけるパラメータ特性

提案手法のパラメータによる特性を把握し, 適切なパラメータを見つけるためにパラメータを様々に変化させてシミュレーションを行った. ここでは携帯電話網使用率調整機能は使用していない.

5.2.1 実験方法

携帯電話網のみを使用した場合と WiFi のアドホックモードを併用した場合の比較実験を行った. 実験 1 に使用したパラメータを表 1 に示す.

表 1 実験 1-4 のパラメータ

Table 1 Parameters used for experiments 1 to 4.

設定項目	実験 1	実験 2	実験 3	実験 4
コンテンツ数	4	10	10	10, 20, 30, 40
ダウンロードするコンテンツ数	2/端末	2/端末 (Zipf 分布)	2/端末 (Zipf 分布)	2/端末 (Zipf 分布)
端末数	500	500	500	500
デッドライン(ダウンロード開始から)	30 分	15, 30, 60, 90 分	15, 30, 60 分	60 分
衝突回避確率 (β)	0.0005 ~ 0.005 (0.0005 刻み)	0.0015	0.0015	0.0015
ハローメッセージ送信間隔 (h)	5, 10, 30, 60 秒	5 秒	5 秒	5 秒
安全率 (α)	-	0.99	0.99	0.99
フィールド	500, 1,000 m 四方	500 m 四方	500 m 四方	500 m 四方
モビリティ	静止, RWP (4 km/h)	RWP (4 km/h)	RWP (4 km/h)	RWP (4 km/h)

5.2.2 実験結果

携帯電話網のみを使用した場合、全端末のダウンロード完了までに約 160 秒かかった。WiFi のアドホックモードを併用するとダウンロードには約 10 分かかったが、パラメータの調整によって携帯電話網の使用率を約 7.3% に削減できた。以降、各パラメータを変化させた場合の比較結果について詳しく述べる。

5.2.2.1 衝突回避確率とハローメッセージ送信間隔

500 m 四方のフィールドにおいて衝突回避係数 β とハローメッセージ送信間隔 h を変えた場合の携帯電話網使用率と全端末がダウンロード完了にかかった時間をそれぞれ図 6 と図 7 に示す。

図 6 から、衝突回避確率 β を小さくしていくと、携帯電話網使用率はゆるやかに減少することが分かる。これはパケット衝突の頻度が減り、断片とハローメッセージの伝送成功率が改善したためと考えられる。また、ハローメッセージの送信頻度を上げることで携帯電話網の使用率は大きく減少し、最小で約 7.3% に削減できた。これは頻繁に近傍端末の断片所有状況を把握でき、重複したダウンロードを削減できたためと考えられる。

図 7 から、衝突回避確率 β を 0.001 ~ 0.0025 程度に設定した場合、ダウンロード完了時間を短くできたことが分かる。これは β を大きくしすぎると多数のパケット衝突が発生し、 β を小さくしすぎると WiFi で交換されるパケットが少なくなったためと考えられる。一方、

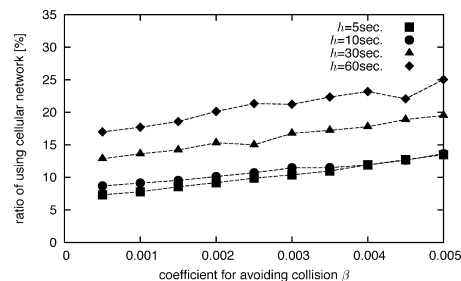


図 6 500 m 四方のフィールドにおける携帯電話網使用率 (端末静止状態)

Fig. 6 Cellular network usage (500 × 500 m, no mobility).

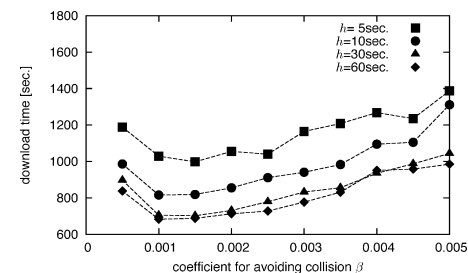


図 7 500 m 四方のフィールドにおけるダウンロード完了時間 (端末静止状態)

Fig. 7 Download completion time (500 × 500 m, no mobility).

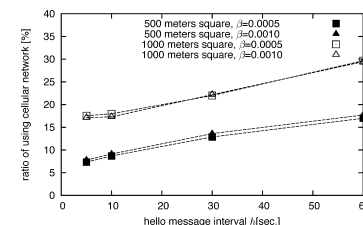


図 8 フィールド面積変化に対する携帯電話網使用率 (端末静止状態)

Fig. 8 Cellular network usage vs. field size (no mobility).

ハローメッセージの送信頻度を抑えると、全端末がダウンロードを完了するまでの時間が短くなった。これは近傍端末の状況を知ることが遅れ、多数の断片が携帯電話網からダウンロードされたためと考えられる。

5.2.2.2 フィールド面積

図 8 に 500 m 四方と 1,000 m 四方における携帯電話網使用率の比較結果を示す。フィールドが小さいときは携帯電話網使用率が低くなり、フィールドが大きいとデッドラインまでに端末がダウンロードを完了できない場合があった。これは端末密度が高い方が、ハローメッセージや断片の受信ができる機会が増え、ヒット率が向上したためと考えられる。

5.2.2.3 モビリティ

端末のモビリティを導入し、500 m 四方のフィールドにおける携帯電話網使用率とダウンロード完了時間の推移を計測した。その結果を図 9 と図 10 に示す。いずれにおいても、

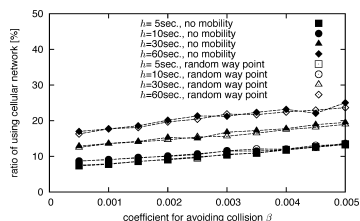


図 9 モビリティに対する携帯電話網使用率
Fig. 9 Cellular network usage vs. mobility.

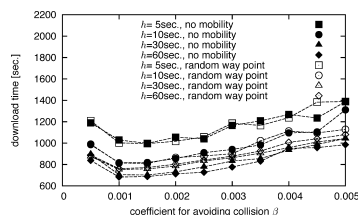


図 10 モビリティに対するダウンロード完了時間
Fig. 10 Download completion time vs. mobility.

モビリティの有無による大きな差異は見られない。これは、端末 u が 1 ホップの情報のみを使用するため、 u の電波範囲から他の端末が出て行くことがあっても、電波範囲内に別の端末が入ってくることもあり総じて u のアクション決定に大きな影響を与えないこと、本実験で歩行速度 4 km/h、ハローメッセージ送信間隔として 60 秒以内を想定しているため、モビリティによる近傍表の整合性が失われにくいこと、などが理由だと考えられる。以上のことから、提案手法では、歩行速度程度で端末が移動する場合には、端末静止時と変わらない携帯電話網使用率およびダウンロード完了時間を達成することが分かった。

以降の実験では、図 6 の結果から、最も低い携帯電話網使用率を示したハローメッセージ送信間隔 $h = 5$ 秒と、図 7 の結果から、 $h = 5$ のときに最も短いダウンロード完了時間を示した衝突回避係数 $\beta = 0.0015$ を使用する。

5.3 実験 2：携帯電話網使用率調整機能

4.2.4 項で述べた携帯電話網使用率調整機能を使用することでデッドラインが短い場合でもデッドライン内にダウンロードが完了し、デッドラインが長い場合には携帯電話網の使用率を削減できることを確認するために、この機能を使用したシミュレーションを行った。

5.3.1 実験方法

実験 2 に使用したパラメータは表 1 のとおりで、コンテンツ数を増やし、各端末がダウンロードするコンテンツは Zipf 分布に基づいて人気に偏ることとした。また、式 (12) の安全率 α は予備実験により 0.99 とした。デッドラインを変化させて、実験 1 同様にシミュレーション開始と同時にダウンロードを開始し、全端末がダウンロードを完了するまでのダウンロード率の遷移と携帯電話網を使用してダウンロードした断片数を記録した。

5.3.2 実験結果

携帯電話網のみを使用してダウンロードした場合、実験 1 と同様に全端末がダウンロード

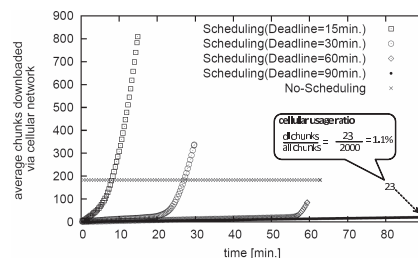


図 11 WiFi 併用時の時間経過に対する携帯電話網使用率
Fig. 11 Cellular network usage vs. simulation time.

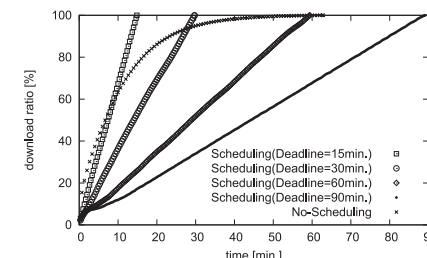


図 12 WiFi 併用時の時間経過に対するダウンロード率
Fig. 12 Download completion time vs. simulation time.

を完了するのに約 160 秒かかった。これは、携帯電話網のみを使用する場合のダウンロード完了時間がコンテンツ数の増加には影響を受けず、ノード数とダウンロードするコンテンツ数に影響するためである。しかし、実環境ではコンテンツ数が多ければユーザのコンテキストに合った動画広告の数も増え、各端末がダウンロードするコンテンツ数が増えることで携帯電話網を圧迫すると考えられる。

WiFi のアドホックモードを併用した場合の実験結果を図 11 と図 12 に示す。図 11 から、WiFi のアドホックモードを併用するが携帯電話網使用率調整機能を使用しない場合（図中の No-Scheduling）は、デッドラインにかかわらずダウンロード完了時間は変化せず、約 63 分であった。したがって、実験 1 よりもダウンロードに時間がかかるようになったのはコンテンツ数が増加したことによってヒット率が低下し、欲しい断片が送られてくる確率が下がったためである。ダウンロード完了時間がデッドラインに依存しないのは、携帯電話網の使用率も、WiFi の使用率も制御していないためである。したがって、デッドラインが 15 分、30 分、60 分では間に合わない。図 12 から、No-Scheduling の場合、ダウンロード率が 90% を超えたあたりから急にダウンロード率の上昇が遅くなっている。これは、他の端末がブロードキャストした断片をパケットの衝突などによって取りこぼしたことなどにより残りわずかに足りない断片が各端末によって様々になり、ヒット率が減少したためと考えられる。

図 11 より、携帯電話網使用率調整機能を使用した場合、デッドラインを長くすると、携帯電話網の使用率を自律的に調整し、より携帯電話網の使用率を削減できていることが分かる。これは、1 台の端末がダウンロードした断片を多数の端末で共有でき、ダウンロードさ

れる断片の重複が減ったためと考えられる。また、図 12 より、すべてのデッドラインにおいてダウンロードが完了していることが確認できる。さらに、図 11 より、デッドラインが 90 分のときには携帯電話網の使用率を約 1.1% (端末あたりの要求断片数 2,000 に対し、セルラからのダウンロードは 23 断片) に削減できていることが分かる。この実験における携帯電話網の使用率の最小値は、全端末間でいっさい重複なく携帯電話網から各断片を 1 回ずつダウンロードする場合なので、式 (13) から式 (18) が導かれ、その値は 1.0% となる。そのため、提案手法によってほぼ最小の使用率に削減できていることが確認できた。

$$\frac{\text{要求された総コンテンツ数} \times \text{断片数}}{\text{端末あたり要求コンテンツ数} \times \text{断片数} \times \text{ノード数}} = \frac{10 \times 1000}{2 \times 1000 \times 500} = 0.01 \quad (18)$$

なお、図 11 において、デッドラインに近づくとき携帯電話網でダウンロードする断片が増えていくのは、WiFi でブロードキャストされる断片の各端末でのヒット率が下がることで携帯電話網を使用しなければ追いつかなくなるためと考えられる。

5.4 実験 3: 実環境に近いシナリオ

実環境では端末がフィールドに出現したり消滅したりする。また、端末がフィールドに出現したときにすでに周りの端末は断片をある程度ダウンロードしており、デッドラインも様々である。このような実環境で提案手法が有効に機能するかを評価するために、実環境に近い環境を再現した実験 (ホットスタート) を行った。

5.4.1 実験方法

初期ノード数を 500 台とし、実環境における端末の出現を再現するために平均到着間隔 15 秒のポアソン到着でノードを出現させた。また、端末の消滅を再現するために平均 120 分、標準偏差 30 分の一様分布でライフタイムを端末に設定し、出現からライフタイムが経過すると消滅するようにした。ただし、ライフタイムがデッドラインより大きくなるように設定した。これにより、フィールドに存在するノード数を初期ノード数と同じ 500 台前後を推移するようにした。出現時にデッドラインを 15 分、30 分、60 分からランダムに設定するようにした。その他のパラメータは表 1 の値を用いた。

初期ノードはまったく断片を持っておらず、ある程度断片が配布された状態を再現するためにまず上記の条件で 200 分シミュレーションを行った。そして 200 分経過後の状態 (ホットスタート) から 100 分間、携帯電話網のみを使用した場合と WiFi のアドホックモードを併用した場合についてシミュレーションを行った。

5.4.2 実験結果

200 分経過後の時点で端末数は 507 台であり、ダウンロードが完了している端末は 372 台

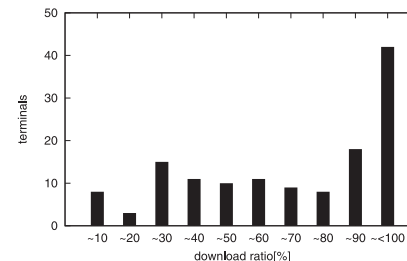


図 13 200 分経過後のダウンロード率の分布
Fig. 13 Distribution of download rate after 200 minutes elapsed.

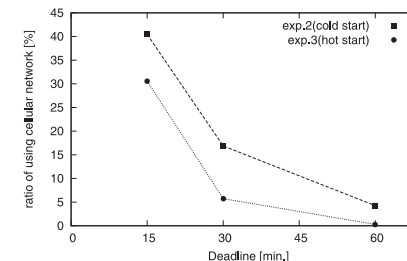


図 14 デッドライン別の携帯電話網使用率
Fig. 14 Cellular network usage vs. deadline.

であった。残りの 135 台の端末のダウンロード率の分布を図 13 に示す。

200 分経過後以降に出現し、100 分間の間にダウンロードを完了した端末 267 台について、携帯電話網使用率調整機能を用いた場合のデッドライン別の携帯電話網の使用率を図 14 に示す。この図から実験 2 のときに比べ、各デッドラインにおける携帯電話網の使用率が小さくなっていることが確認できる。これは、端末がフィールドに出現した時点でその近傍に断片が配布されており、携帯電話網を使用しなくても多くの断片を手に入れることが可能になったためと考えられる。また、端末が消滅することがあっても携帯電話網の使用率を削減できるのは、先に出現した端末がダウンロードした断片が、端末が消滅するまでに他の端末に引き継がれていくためと考えられる。なお、100 分間においてデッドラインに間に合わない端末は存在しなかった。

5.5 実験 4 スケーラビリティ

これまでの実験ではコンテンツ数が 4 個または 10 個であった。しかし、想定するアプリケーションではより多数のコンテンツが存在する。このような場合でも携帯電話網の使用率を削減できることを確認するために、コンテンツ数を 10~40 個の間で変化させた場合について実験を行った。

5.5.1 実験方法

コンテンツ数を 10~40 個まで 10 個刻みで変化させ、携帯電話網の使用率を評価する。携帯電話網使用率調整機能を使用し、デッドラインを 60 分とした。実験 4 で使用したパラメータを表 1 に示す。

5.5.2 実験結果

図 15 にコンテンツ数を変化させたときの携帯電話網の使用量 (端末あたりの平均ダウン

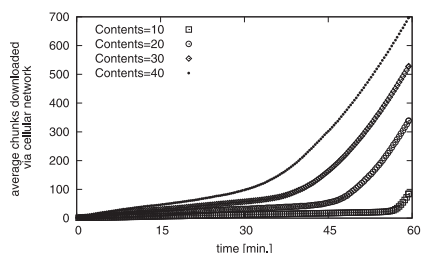


図 15 コンテンツ数を変化させた場合の時間に対する携帯電話網使用量（端末あたりの平均ダウンロード断片数）

Fig. 15 Number of downloaded chunks per user vs. number of contents.

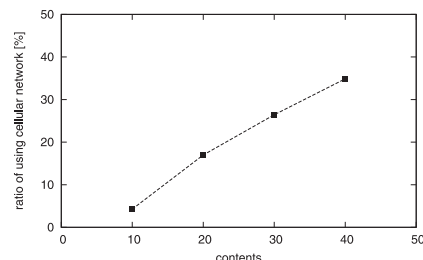


図 16 コンテンツ数を変化させた場合の携帯電話網使用率

Fig. 16 Cellular network usage vs. number of contents.

ロード断片数)を示す。図の縦軸は、携帯網からダウンロードした断片数の端末あたりの平均であり、最大は2コンテンツ×1000断片=2000となる。コンテンツ数が増えると携帯電話網の使用量が増えていることが分かる。これは、同じコンテンツをダウンロードする端末が減り、1人あたりが負担する携帯電話網の使用率が上がったためである。また、コンテンツが増えたことによりブロードキャストされてくる断片のヒット率が下がったためと考えられる。しかし、携帯電話網のみを使用した場合に比べると図16に示すとおりコンテンツ数が40個の場合でも、携帯電話網の使用率を約34.9%に削減でき、提案手法が有効に機能していることが確認できた。また、どのコンテンツ数でもデッドラインに間に合わない端末は存在しなかった。

6. おわりに

本論文では、コンテンツに対して様々な好みや要求タイミングを持った多数のユーザに対する動画広告配信を行う際の携帯電話網の使用率削減を目的とした手法を提案した。提案手法は、(i) コンテンツを同一サイズの多数の断片に分割すること、(ii) 端末どうしてWiFiを通じて断片を交換すること、(iii) 端末がローカル情報だけを使ってアクションを自律的に決定することを特徴としている。需要情報交換フェーズでは、端末がアクション決定に必要な近傍端末の需要情報と所有情報を収集するためにハローメッセージを定期的にブロードキャストする。アクション決定フェーズでは、効率的に携帯電話網とWiFiのアドホックモードを併用するために断片ごとにアクションの重要度を計算し、ルーレット選択によって

動作を決定する。さらに、デッドラインまでにダウンロードを完了するために、デッドラインまでの時間の長さに応じて携帯電話網の使用率を自動調整する携帯電話網使用率調整機能を導入した。

また、提案手法をエリアサイズ500m×500mに携帯端末数500台が存在する場合についてシミュレーション実験を行い、提案手法を評価した。基本的なアルゴリズムにおいてパラメータを変化させたところ、提案手法によって携帯電話網使用率を約92.7%削減できた。さらに、携帯電話網使用率調整機能を導入することで、携帯電話網の使用率をデッドラインに適応して調整し、最高で携帯電話網使用率を約98.9%削減できた。これは、携帯電話網のみを使用した場合に比べ、動画広告配信において見掛け上約100倍の帯域を使用できるほか、携帯電話網の基地局の増設コストの削減や携帯電話網を圧迫しないことにより他のサービスへの影響を抑えることができる。そして、ホットスタートのシミュレーションでは、端末出現時に近傍の端末に断片が普及していることで、より携帯電話網の使用率を削減できた。また、提案手法のスケラビリティを評価するための実験では、コンテンツ数を増やした場合でも携帯電話網の使用率を約65.1%削減できた。多数のコンテンツを扱えることで、ユーザのコンテキストに合ったより多くの有益な広告を配信できる。

今後の課題として、都市環境を模したシミュレーションフィールドを設定し、より現実の環境に近いモビリティモデルを用いて提案手法を性能評価することがあげられる。

参考文献

- 1) 林 智天, 川原圭博, 田村 大, 森川博之, 青山友紀: 小型モバイルセンサを用いたコンテキスト適応型コンテンツ配信サービスの設計と実装, 電子情報学会技術研究報告, IN2004-226, pp.149-154 (2005)
- 2) BitTorrent. <http://www.bittorrent.com/>
- 3) Rajagopalan, S. and Shen, C.-C.: A Cross-layer Decentralized BitTorrent for Mobile Ad hoc Networks, *Proc. 3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networks and Services (MOBIQUITOUS 2006)*, CD-ROM (2006).
- 4) Aggelou, G. and Tafazolli, R.: On the relaying capacity of next-generation GSM cellular networks, *IEEE Personal Communications Magazine*, Vol.8, pp.40-47 (2001).
- 5) Lin, Y.-D. and Hsu, Y.-C.: Multihop cellular: A new architecture for wireless communications, *Proc. IEEE INFOCOM 2000*, pp.1273-1282 (2000).
- 6) Hsieh, H.-Y. and Sivakumar, R.: Performance comparison of cellular and multi-hop wireless networks: A quantitative study, *Proc. ACM International Conference*

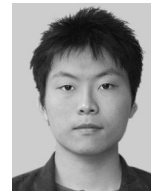
- on *Measurement and Modeling of Computer Systems (SIGMETRICS 2001)* (2001).
- 7) Wu, H., Qiao, C., De, S. and Tonguz, O.: Integrated Cellular and Ad Hoc Relaying Systems: iCAR, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.19, No.3, pp.2105–2115 (2001).
 - 8) Wu, X., Chan, S.-H.G., Mukherjee, B. and Bhargava, B.: MADF: Mobile-Assisted Data Forwarding for Wireless Data Networks, *Journal of Communication and Networks*, Vol.6, No.3, pp.216–225 (2004).
 - 9) Bhargava, B., Wu, X., Lu, Y. and Wang, W.: Integrating Heterogeneous Wireless Technologies: A Cellular Aided Mobile Ad Hoc Network (CAMA), *Mobile Networks and Applications*, pp.393–408, Kluwer Academic Publishers (2004).
 - 10) 3GPP2, C.S0024, cdma2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification.
 - 11) Luo, H. Ramjee, R., Sinha, P., Li, L. and Lu, S.: UCAN: A Unified Cellular and Ad-Hoc Network Architecture, *Proc. 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2005)*, pp.353–367 (2003).
 - 12) Conti, M., Gregori, E. and Turi, G.: A cross-layer optimization of gnutella for mobile ad hoc networks, *Proc. 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2005)*, pp.343–354 (2005).
 - 13) Nandan, A., Das, S., Zhou, B., Pau, G. and Gerla, M.: AdTorrent: Digital Billboards for Vehicular Networks, *Proc. 1st International Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications (V2VCOM 2005)*, pp.286–294 (2005).
 - 14) Nandan, A., Tewari, S., Das, S., Gerla, M. and Kleinrock, L.: AdTorrent: Delivering Location Cognizant Advertisements to Car Networks, *Proc. 3rd Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS 2006)*, pp.203–212 (2006).
 - 15) Nandan, A., Tewari, S. and Kleinrock, L.: Modeling Epidemic Query Dissemination in AdTorrent Network, *Proc. IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2006)*, pp.1173–1177 (2006).
 - 16) Hanano, H., Murata, Y., Shibata, N., Yasumoto, K. and Ito, M.: Video Ads Dissemination through WiFi-Cellular Hybrid Networks, *Proc. 2009 IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2009)*, pp.322–327 (2009).
 - 17) Duffy, D.A.: *Principles of Automated Theorem Proving*, John Wiley & Sons Inc. (1991).
 - 18) Gallier, J.H.: *Logic for Computer Science: Foundations of Automatic Theorem Proving*, Harper & Row Publishers (1986).
 - 19) Hyytiä, E., Lassila, P. and Virtamo, J.: Spatial Node Distribution of the Random Waypoint Mobility Model with Applications, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.5, No.6, pp.680–694 (2006).
 - 20) Killat, M., Schmidt-Eisenlohr, F., Hartenstein, H., Rössel, C., Vortish, P.,

Assenmacher, S. and Busch, F.: Enabling Efficient and Accurate Large-Scale Simulations of VANETs for Vehicular Traffic Management, *Proc. 4th ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2007)*, pp.29–38 (2007).

21) Scalable Network Technologies. <http://www.qualnet.com/>

(平成 21 年 5 月 18 日受付)

(平成 21 年 10 月 2 日採録)



花野 博司

2007 年 3 月奈良工業高等専門学校専攻科電子情報工学専攻修了。2009 年 3 月奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。現在 KDDI (株) に勤務。



村田 佳洋 (正会員)

2003 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。現在、広島市立大学情報科学研究科准教授。遺伝的アルゴリズム、エージェント技術等の研究に従事。



柴田 直樹 (正会員)

1996 年, 1998 年, 2001 年にそれぞれ大阪大学基礎工学部中退, 同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了, 同大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。2001 年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2004 年 1 月より滋賀大学経済学部情報管理学科講師。2004 年 4 月より現在, 滋賀大学経済学部情報管理学科助教授。分散システム, ITS, 遺伝的アルゴリズム等の研究に従事。ACM, IEEE 各会員。



安本 慶一（正会員）

1991年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1995年同大学大学院博士後期課程退学後、滋賀大学経済学部助手。2002年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。博士（工学）。モバイル、ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。ACM, IEEE 各会員。



伊藤 実（正会員）

1977年, 1979年, 1983年にそれぞれ大阪大学基礎工学部卒業, 同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了, 同大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。1979年より大阪大学基礎工学部助手。1986年より大阪大学基礎工学部講師。1989年より大阪大学基礎工学部助教授。1993年4月より現在, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授。関係データベース理論, オブジェクト指向のデータベースのアプリケーション, DNAプローブ等の研究に従事。ACM, IEEE 各会員。