

様々なユーザに対するビデオ配信のための手法

代表研究者	柴田直樹	滋賀大学経済学部准教授
共同研究者	Klara Nahrstedt	イリノイ大学アーバナシャンペーン校
共同研究者	安本慶一	奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科

1 あらまし

情報通信技術の発展に伴い、様々な通信方式を用いてビデオ配信が行われるようになってきている。本研究では利用者によって通信方式、ディスプレイの解像度等が異なり、また、利用可能帯域、リンク品質等が刻々と変化する場合に効率よく動画配信を行うための手法の構築を目指すものである。この目的の実現のためには、通信品質の変化にすばやく適応し、また受信者毎に異なる要求品質のビデオを品質の過不足無く効率よく配信するための技術が必要となる。そのために、様々な状況における動画配信のための手法について研究を行った。本稿では、海外渡航中に行った以下の3つの研究トピックについて順に述べる：1. 携帯電話端末で、WiFiによる相互通信を利用することで動画配信のための通信帯域を抑えるための手法、2. 自動車間で、レイテンシを抑えつつ、高品質な動画配信を可能にする手法、3. インターネットにおける帯域推定を従来より低いオーバーヘッドで行う手法。以下、1.の手法について詳しく述べた後、2, 3の手法について簡単に述べる。

2 携帯電話向け動画配信のための複数の通信方式を併用した協調ダウンロード方式

2-1 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。この様な状況で、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検索等)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。ユーザのコンテキストに合わせた動画配信ができれば、従来と比べ高い効率が期待できる。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 BitTorrent 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)への適用事例も報告されている。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。この時、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、近隣の端末からWiFi通信により受信する、持っている断片については近隣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、スケーラビリティ、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 500mx500m 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。

2-2 関連研究

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すために IEEE 802.11 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 [1]。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 [2]。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 [3]。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 [4]。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 [5]。Luo らは、第三世代携帯電話網 (1xEV-DO) のセル全体の有効な帯域を増やすために、IEEE 802.11b ベースの MANET を統合する手法を提案している [6]。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。

一方、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 [7]。Rajagopalan らは、MANET 上での BitTorrent の仕組みを提案し実装している [8]。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 [9]。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ー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。

2-3 問題の定式化

2.3.1 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。端末 u がダウンロードしたいコンテ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ります。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。

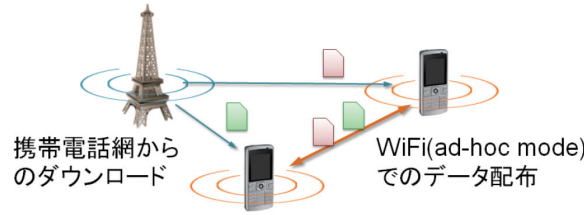


図 1 携帯電話網と WiFi の併用による協調ダウンロード

2.3.2 通信モデル

図 1 のように, 各端末 u は WiFi (IEEE802.11 アドホックモード等) と携帯電話網 (CDMA 等) 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-DO のような第三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 $N_{gh}(u, t)$ 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取る。端末が WiFi を通じて通信する時, 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当たりの伝送容量を 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。

2.3.3 問題定義

ユーザ端末に要求された全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全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)。全てのユーザが時刻 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。

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

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。

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

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。

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。

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

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

WiFi の無線範囲では、同時には一つの端末しかブロードキャストを行うことが出来ない。従って以下の制約(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。

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

次章では、本論文で提案する、上記の問題を解くためのヒューリスティックおよび分散アルゴリズムについて述べる。

2-4 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、提案する動画広告配信プロトコルを詳述する。

2.4.1 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. 全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、端末同士で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(例えば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、既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。

2.4.2 動画配信プロトコル

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 HMessage 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タ1) で定期的にブロードキャストする。各 HMessage は送信端末の需要情報と所有情報から成り、それらはコンテンツのIDと断片を既に持っているかを示すビット列で表現される。

各端末は HMessage 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 HMessage を受信する度に更新される。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。

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。一つの端末において 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。

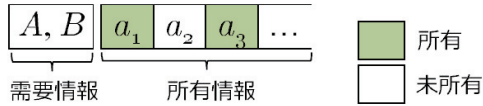


図 2 ハローメッセージ

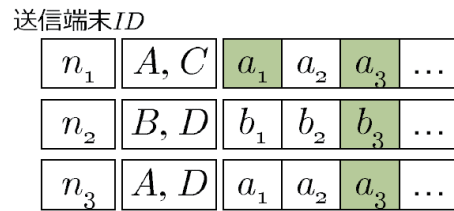


図 3 近傍表

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

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。

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 を既に所有している端末の数を $N_h(ch)$ とする。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。

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

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かまたはブロードキャストする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(9)で定義する。

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

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。

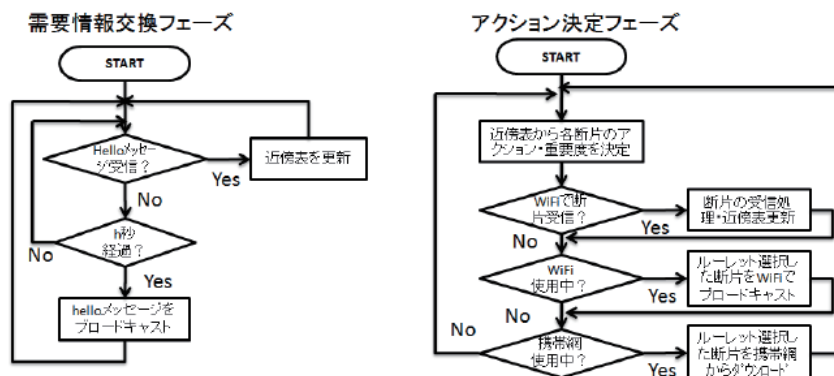


図 4 両フェーズの動作フローチャート

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。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の場合に、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 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事も確率的に選択する。

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事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% を超えた辺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。

上で説明したように、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一つ実行する)。この時、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)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。

2-5 評価実験

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、500m×500m および 1000m×1000m の障害物の無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)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 4Km/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、端末当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 β および α を変えて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。

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。

なお、実験では、各コンテンツのデータサイズは 1.5M バイトであり、1000 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 1.5K 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 1.2Mbps 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。WiFi の電波範囲は 200m とし、WiFi によるパケットの伝送成功率に仲上分布を用いた。

シミュレーション中では、同一無線範囲での通信帯域を 1.7Mbps に設定した。また、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 QualNet の IEEE 802.11 のパラメータを元に決定した。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。

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時に既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を行った。

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。

初期ノードは全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。

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 の時に比べ、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。

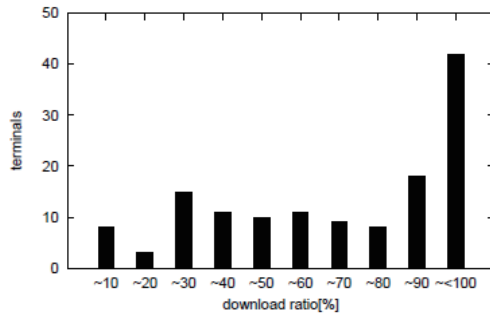


図 13 200 分経過後のダウンロード率の分布

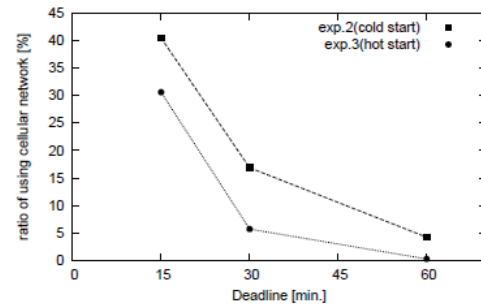


図 14 デッドライン別の携帯電話網使用率

2-6 まとめ

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)端末同士で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、提案手法を典型的な都市環境を想定し、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。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。

今後の課題として、障害物や人の動きなど、より現実の環境に近いモデルを用いて提案手法を性能評価することが挙げられる。

3 自動車用低レイテンシ映像配信プロトコル

本研究では、自動車のドライバに、事故防止のため死角車両の位置を直観的に把握させることを目的として、交差点付近にいる複数の車両が車載カメラで撮影した交差点の映像を、リアルタイムに車車間通信で交換し、受信した映像をもとに、各車両で鳥瞰映像を作成しドライバに提示するというアプリケーションを想定する。他車両からの映像を取得することで、自車両からは死角となる車両を把握できる可能性が高くなる。しかし、交差点という狭い区域内で、多数の車両が映像データを同時に送信すると、通信帯域を多く使用することにより、輻輳が生じ、映像を必要としている車両が映像データを受信できない可能性がある。また、事故防止の目的のためには、ビデオ配信に伴う通信レイテンシをできるだけ抑えることが重要となる。本稿では、通信帯域を効率良く使用し、リクエストに応えられる高品質な映像を送信できる車両を優先的に映像送信車両として選定する手法を提案する。提案手法では、交差点を格子領域に分割し、各車両は撮影している格子領域や進行方向、車両速度、映像品質などの自車両に関する情報を、車車間通信を用いてあらかじめ近隣の車両間で交換する。そして、死角部分の映像を必要とする車両（以降、要求車両）が、必要な格子領域を交差点付近の各車両に知らせる。各車両は受信した情報に基づき、前記の情報交換により把握している近隣の各車両について、映像を送信する優先度を計算する。要求された格子を多く撮影し、品質の高い映像を送信できる車両には高い優先度を与える。各車両は自身で計算した各近隣車両の優先度にもとづいて自律分散的に送信車両の選定を行う。各車両は輻輳が起らないように、進行方向ごとに優先度が高い車両から、映像の送信車両を選定する。その結果、自車両が送信車両として選ばれている場合には、以降自身の撮影したデータを送信し、そうでなければ送信しない。状況の変化に応じた車両が選定されるよう、この選択は周期的に何度も行う。

本研究では、各車両の優先度を計算する関数を決定するための予備実験、現実に近い環境で提案手法の性

能を評価するための評価実験を、それぞれネットワークシミュレータ QualNet を用いて行った。実験では地形データや無線通信規格、車両の速度、車両の台数などについて、実際の交差点を模した環境を用意し、映像フレームの到達率や、要求車両が受信した映像フレーム数、映像フレーム毎の映像品質の分布、などの評価項目を用いた。予備実験では、撮影可能な格子の数、映像の品質に対して、重みを高く設定した優先度関数を決定した。評価実験では、現実的な環境での提案手法の性能を評価するために、車両密度、通信機器の搭載率が、それぞれ3種類の場合について、評価項目の値を計測した。使用する車両の選定手法として、(i) 提案手法、(ii) 交差点付近の全車両、(iii) 撮影方向毎に交差点中央に最も近い車両、を用いた。実験結果から、車間距離が 10 [m] 以内と車両密度が比較的高く、通信機器の搭載率が全車両の 60%以上の環境では、提案手法は要求されている格子を含んでいる映像データを、特に高い品質で送信できていることを確認した。また、提案手法は、どのような車両密度、通信機器の搭載率においても他の手法より良い結果を示した。

4 インターネットにおける帯域推定を行う手法

4-1 あらまし

効率の良い P2P オーバレイネットワークを構築するためには、インターネット上の各ピア間の、使用可能帯域等の通信品質を考慮した上で、最適な経路を使用し、ネットワークを構築する必要がある。帯域、レイテンシ、パケットロス率など数値からなる経路の品質を知るために、経路の一端からもう一端までパケットを実際に送信することで、測定を行う方法が用いられてきた。Pathload は、与えられた経路の利用可能帯域をパケットを連続して送信することで計測する。利用可能帯域を超えてパケットを送った場合に、パケットのレイテンシが、増加傾向を示す性質を利用する。Abing は、2つ以上のパケットを連続して送信した場合に、どの程度これらのパケットが離れて受信されるかを観測することで、利用可能帯域を推定する。インターネット上で実際に使用されている、このような方式では、ネットワーク上で実際にパケットを通信する必要があり、実行中の他のアプリケーションの通信に影響を与えるという点、送信するパケットの量が少ないと精度が低く、測定の精度を改善するためには、多くのパケットを送信する必要あり、測定に時間がかかる点、測定を行う両端のノードで実際に計測のためのプログラムを動作させる必要があることなどの問題点がある。P2P オーバレイネットワークの、各ノードペア間の経路の全ての品質が分かれば、ネットワークの最適化のために、非常に有用であるが、経路の数はノード数の 2 乗に比例し、Abing や Pathload などの帯域測定ツール等を利用して、これらの経路全ての品質を得るのはノード数が増加するにつれて困難になる。オーバレイネットワークを用いたアプリケーションでは、アプリケーションの動作中に、実際に行った通信より、利用しているネットワーク経路の現在の品質を知ることが可能である。本論文では、過去に観測した経路の品質情報を利用して、リンクのおおまかな品質を推測する手法について述べる。これにより、新たな、計測のための通信を行うことなしにネットワークの最適化が可能になる。

本論文で提案する手法では、過去に計測した経路の品質情報より、教師あり学習を利用して、過去に観測を行った経路及び未知の経路の現在の品質を推定する。各ピアでは、観測した通信品質を中央サーバに定期的に送信する。各ピアにおいて、経路の通信品質を推定する必要が生じると、そのピアは中央サーバにクエリメッセージを送信する。中央サーバは蓄えられた過去の品質情報を用いて推定を行い、結果をピアに返す。

4-2 予備実験と考察

この章では時間の経過に伴うリンク品質の変化および、経路の類似度とリンク品質の類似度に関する、予備実験の結果について述べ、これについて考察する。インターネット上を流れるトラフィックの量は常に変化しており、曜日や季節等によっても変動がある。実際にどの程度の変化があるのか、時間の経過に対してどの程度の変化があるのかを調べるため、PlanetLab での観測およびネットワークシミュレータ ns-3 を用いて、時間の経過に伴うリンク品質の変化を観測する予備実験を行った。また、2つの異なる経路の類似度を定義し、これらとリンク品質の変化について PlanetLab および ns-3 を用いて観測する予備実験を行った。以降、実験の設定、経路の類似度の定義、実験結果について順に述べる。

PlanetLab を用いて、24 日にわたり、使用可能帯域幅とレイテンシを毎日一度観測した。PlanetLab 上で約 500 個のノード間でランダムにペアを作り、毎日ほぼ決まった時間に pathload により測定した利用可能帯域と ping を用いたレイテンシの計測を行った。これより、時間の経過に伴う帯域及びレイテンシの変動の増加はほとんど認められないことが分かった。

ns-3 シミュレータを用いて、実際のインターネットの様子を再現したシミュレーションを行った。シミュレーション用のトポロジとして、RocketFuel プロジェクト [10] により、観測によって得られたインターネットトポロジおよび、各リンクのディレイを用いた、トラフィックの、self similarity を再現するため、ト

ラフィックソースとして、on-off アプリケーションを使用し、on 時間と off 時間を pareto 分布により決定した。pareto 分布のパラメータは、実際に観測されたものに fit するように設定した。パケットのサイズの分布は実際に観測されたものに一致するように設定した。トラフィックはシミュレーション開始後 10 秒程度で定常状態に達するので、ランダムに選んだピアに対して、30 秒後に観測された値から 3 秒経過するごとに最初の観測値に対する変化の割合を観測した。この結果より、時間の経過に伴う帯域及びレイテンシの変動の増加はほとんど認められないことが分かった。

4-3 提案手法

この章では、予備実験の結果を踏まえて、実際に経路の品質を推定する手法について述べる。提案手法では、P2P ネットワーク上の各ピアが観測したリンク品質を定期的に中央サーバに送信し、これらの過去の観測データから教師つき学習手法である Weighted k-nearest neighbor algorithm(以下 WKNN 法)を用いて、あるリンクの現在の品質を推定する。

本手法で用いる教師あり学習手法である WKNN 法について述べる。WKNN 法では、学習データのインスタンスはオブジェクトと実数値の組で与えられ、オブジェクト(提案手法では、オブジェクトは経路)から実数値の関数を学習する。また、ユーザは、オブジェクト同士の距離を与える関数と、加重平均の重みを求めるための関数を与える。学習は、単純に全教師データをメモリに格納することにより行われる。推定フェーズでは、ある値に対応する実数値を推定する。教師データの中から、 k 個の最近傍のインスタンスを選択し、これらから、加重平均の重みを求めるための関数により計算される重みを用いて、加重平均を求めることで、推定値を得る。

提案手法では、多数のユーザが P2P ビデオ配信等の、ピア間で連続して通信を行うアプリケーションを、数ヶ月程度に渡って使用する場合を想定する。本手法では、P2P ネットワーク上のシステムは、1つの中央サーバと、多数のピアからなるとし、各ピアでは、通信を行っているピア間の通信品質を観測することが可能であることを仮定する。観測した通信品質は、中央サーバ上のデータベースに定期的に送信する。本論文では、集中制御による方式について述べるが、DHT などを用いて、分散実装することも可能である。中央サーバに集められたデータを元に、あるピアにおいて、以前経路品質が観測された経路と同じ、または似た経路の通信品質を推定する必要がある場合に、WKNN 法を用いて経路の品質を推定する。このとき、ピアは中央サーバに品質を推定する経路をクエリメッセージとして送信し、その後中央サーバで推定を行い、推定結果をピアに返答する。学習及び推定は、中央サーバで行う。WKNN 法においては、学習は単に全教師データをメモリに格納することにより行われるため、時間の経過とともに、このデータを格納するために必要なメモリが増大する。必要なメモリ量を限定するため、データ量が一定値を超えた場合、古いものから順に消去する。

ピアが中央サーバに品質情報を登録するまたは品質の推定結果を問い合わせる際にやりとりされるメッセージは、観測した経路と、品質からなり、30 ホップからなる経路を表現するには、200 バイト以下で済む。また、品質は、20 バイト以下で表現可能であり、このトラフィックは無視できる。また、ピア間の経路上にある全ルータの IP アドレスは、traceroute などにより特定することが可能であるとする。traceroute を実行するための時間およびトラフィックは無視できるとする。中央サーバは IP アドレスから、そのノードの存在する地理的位置の緯度・経度を得るためのテーブルを持つとする。

本手法は、学習フェーズと、推定フェーズからなる。以下、これら二つのフェーズの詳細について解説する。

学習フェーズに於いては、システムに属する各ノードは、頻繁に他のノードと通信を行っており、この際、ある経路の品質を観測できる。各ノードは、定められた期間ごとに、観測された経路の品質を中央サーバに送信する。このメッセージは、経路データと、観測された帯域、レイテンシ、パケットロス率からなる。中央サーバでは、ピアから観測データを受信した場合、メモリにそのデータ、すなわち、経路と帯域、レイテンシ、パケットロス率の組を格納する。データ量が一定値を超えている場合、最も昔に受信したデータを削除する。

各ピアは、ある経路の品質を推定する必要がある段階で、中央サーバにその経路データを含むクエリメッセージを送信する。中央サーバは、このクエリに含まれた経路の品質を推定する。あらかじめ設定された距離関数を用い、学習フェーズに蓄積された経路から、最近傍の k インスタンスを選択し、あらかじめ設定された、加重平均の重みを求めるための関数により計算される重みを用いて、加重平均を求めることで、クエリメッセージに含まれる経路の帯域、レイテンシ、パケットロス率をそれぞれ推定する。中央サーバはこれらの帯域、レイテンシ、パケットロス率をクエリメッセージを送信したピアに返答する。

本手法で利用するためには、異なった時間に観測された 2 つのリンクの類似度を定義する必要がある。上

記で述べたように、観測された経路の品質値の変化は一定時間経過後収束する傾向にある。提案手法では、時間に伴う品質値の変化を $ce^{(1-r)t}$ という式で近似する。但し e は自然対数の底、 t は経過時間、 c 、 r は定数とする。

本論文では、時間 t_0 に観測されたノード v_0 から v_1 までの経路と時間 t_1 に観測されたノード w_0 から w_1 までの経路の距離関数を $ce^{1-rt} + \text{hop}(v_0, v_1, w_0, w_1)$ と定義する。ただし、関数 hop を、2つの経路が共有するホップの割合とする。

本研究は未完成であり、引き続き受け入れ先の Nahrstedt 教授との共同研究を進める。

5 まとめ

以上、在外研究時に行った3つの研究の成果についてまとめた。

【参考文献】

- [1] G. Aggelou and R. Tafazolli: "On the relaying capacity of next-generation GSM cellular networks," IEEE Personal Communications Magazine, Vol.8 pp. 40-47 (2001)
- [2] Y.-D. Lin and Y.-C. Hsu: "Multihop cellular: A new architecture for wireless communications," Proc. of IEEE INFOCOM 2000, pp 1273-1282 (2000)
- [3] H.-Y. Hsieh and R. Sivakumar: "Performance comparison of cellular and multi-hop wireless networks: A quantitative study," Proc. of ACM the International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems(SIGMETRICS 2001) (2001)
- [4] H. Wu, C. Qiao, S. De, and O. Tonguz: "Integrated Cellular and Ad Hoc Relaying Systems:iCAR," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.19 No.3, pp. 2105-2115 (2001)
- [5] B. Bhargava, X. Wu, Y. Lu and W. Wang: "Integrating Heterogeneous Wireless Technologies: A Cellular Aided Mobile Ad Hoc Network (CAMA)," Mobile Networks and Applications, Kluwer Academic Publishers, pp 393-408 (2004)
- [6] H. Luo, R. Ramjee, P. Sinha, L. Li. and S. Lu: "UCAN: A Unified Cellular and Ad-Hoc Network Architecture," Proc. of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2005), pp. 353-367 (2003)
- [7] M. Conti, E. Gregori, 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)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] N. Spring, R. Mahajan, and D. Wetherall : Measuring ISP topologies with Rocketfuel, Proc. of ACM SIGCOMM 2002, pp.133-146, 2002.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
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. 3, pp. 885-898	2010 年 3 月
Inter-Vehicle Communication Protocol for Cooperatively Capturing and Sharing Intersection Video	Proc. of 2nd IEEE Intelligent Vehicular Communications System Workshop (IVCS' 10)	2010 年 1 月
交差点映像の協調撮影と共有を目的とした車車間通信プロトコル, (October 2009).	第 17 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集 (DPSWS2009)	2009 年 9 月
VANET における車両の経路情報を利用した情報伝播プロトコルの提案と評価	情報処理学会研究報告	2010 年 3 月