

消費電力量を考慮したプリフェッチに基づく WiFiオフローディング手法の提案

尾上 佳久¹ 玉井 森彦¹ 安本 慶一¹

概要: 本稿では, Web ブラウジング, 動画視聴などの実時間性が重要なアプリケーションが生成するモバイル・データ・トラフィックを WiFi ネットワークへオフロードすることを目的に, WiFi を利用可能な間に, ユーザが今後 3G 回線経由で閲覧する可能性があるコンテンツを予測し事前にダウンロード (プリフェッチ) する WiFi オフローディング手法を提案する. 提案手法では, 移動端末のバッテリーの制限を考慮して, オフロードに利用する電力量に制約を設け, その制約の中でオフロード量の最大化を目指す. この目標を実現するために, オフロードに利用可能な電力量の消費スケジューリング方法を提案する. 更に, 期待オフロード量という尺度でコンテンツを評価し, オフロード効果が最も期待できるコンテンツの集合をプリフェッチする方法を提案する. WiFi オフローディングに対するプリフェッチの有用性を評価するためにトレース駆動シミュレーションを行った. シミュレーションの結果, ユーザが 3G 回線のみが利用できる場所で閲覧した全コンテンツのデータ容量の内 71% がオフロードされたことを確認し, プリフェッチの WiFi オフローディングに対する有効性を確認した.

A WiFi Offloading Method Based on Energy-aware Prefetching

YOSHIHISA ONOUE¹ MORIHIKO TAMAI¹ KEIICHI YASUMOTO¹

1. はじめに

移動体通信加入者の増加, 移動端末からのインターネットへのアクセス需要の増加, さらにはスマートフォンの普及により, モバイル・データ・トラフィックが急増している [1]. これにより, 人口の集中する都市部では, 携帯電話回線の通信遅延や通信断, 接続不可などの問題が生じている.

この問題に対して携帯電話事業者各社は, モバイル・データ・トラフィックを携帯電話回線から固定回線へオフロードする取り組みを進めている [2], [3]. 多くの移動端末が WiFi ネットワーク・インタフェースを搭載していること, 固定回線とのゲートウェイとなる WiFi アクセスポイント (WiFi AP) が安価に設置可能なことから, WiFi を利用するオフローディング方式 (WiFi オフローディング) が即効性のある対策として注目されている. しかし, WiFi AP の接続可能範囲 (WiFi エリア) は携帯電話基地局のセルと比較して狭く, また WiFi AP の設置箇所は, 個人の家,

特定の店舗, 駅, 空港などに限られており, WiFi オフローディングの利用可能エリアは大きく制限されている. そのため, WiFi オフローディングの効率向上のためには, WiFi の限られた利用機会を利用して, いかにオフロード量を増加できるかが重要な課題となる.

WiFi オフローディングに関する既存研究として, 通信遅延を許容した WiFi オフローディング手法が提案されている [4], [5], [6], [7]. これらの手法では, メールを送受信など, 通信遅延をある程度許容可能なアプリケーションを対象としている. 3G 回線のみが利用できる場所 (3G エリア) にユーザがいる場合には, これらのアプリケーションの通信を抑制しておき, その後, ユーザが移動して WiFi エリアに入った際に抑制していた通信を行うことで, WiFi の限られた利用機会を有効活用したオフローディングを可能としている.

しかし, モバイル・データ・トラフィックの大部分は, Web ブラウジングや動画視聴など, 閲覧の実時間性を重視するアプリケーションが生成していることが知られている [1], [8], [9]. これらのアプリケーションにおいては, 通

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

信遅延を許容するオフローディング手法の適用は、ユーザの使い勝手を大きく低下させるという問題を招く。そのため、これらのアプリケーションに対してオフローディングを適用するためには、WiFiの利用可能機会を有効活用したうえで、かつ、通信遅延が生じない手法の考案が求められる。

本稿ではこのような課題を解決するため、プリフェッチに基づいたオフローディング手法を提案する。提案手法では、WiFiエリアの滞在中に、今後WiFiエリア外に移動した際に携帯電話回線を利用してダウンロードされる可能性があるコンテンツを予測し、それらのコンテンツをプリフェッチしておく。これにより、WiFiエリア外でそれらのコンテンツをユーザが要求した際に、通信遅延なくコンテンツを提示する。

オフローディング量を増加させるためには、単純には、ユーザが閲覧する可能性のあるコンテンツを全てプリフェッチすればよいと考えられる。しかし、移動端末のバッテリー容量には制限があるため、無制限にプリフェッチを行うことはバッテリー消費の点から望ましくない。例えば文献[10]では、バッテリー残量が少なくなると、ユーザは端末の利用を控える傾向があることが報告されている。プリフェッチの多用により電力を消費しすぎることによって、ユーザの利便性を損なうことがないように配慮する必要がある。

この問題に対処するため、提案手法では、消費電力量に関して制約を設ける。具体的には、プリフェッチで消費される電力量が、プリフェッチなしで（すなわち携帯電話回線を利用して）コンテンツをダウンロードする場合の消費電力量を上回らないようにする。そして、消費電力量の制約のもとでオフローディング量を最大化することを目指す。

効果的なプリフェッチのためには、WiFiエリア外に移動した際に、ユーザが閲覧する可能性の高いコンテンツを高精度に予測することが求められる。そこで提案手法では、ユーザが過去に閲覧したコンテンツ、それらを閲覧した場所、時刻、WiFiエリアの滞在開始時刻と退出時刻についてログを取る。このログを基に、ユーザがWiFiエリア外に移動した際に閲覧する可能性の高いコンテンツの集合を求め、それらのコンテンツごとの容量と閲覧確率を算出する。その結果に基づき、コンテンツごとのオフローディング期待値（そのコンテンツをプリフェッチすることでオフローディングされるデータ量の期待値）を求める。さらに、WiFiエリアを退出するまでの時間を予測する。以上の情報をもとに、WiFiエリアごとに設定された消費電力量の制約のもとで、オフローディング期待値が最大になるようにコンテンツを選択しプリフェッチする。

提案手法の有効性を確認するため、Android端末上に提案手法を実装し、複数のユーザによる評価を行った。その結果についても報告する。

以下、2章では、関連研究について述べ、既存手法の課

題を明らかにする。3章では、既存手法における課題を解決するための基本方針、本研究の目標などを述べる。

2. 関連研究

本章では本研究と関連の深い既存研究について述べる。

文献[4], [5], [6], [7]では、通信遅延を許容可能なアプリケーションを対象としたオフローディング手法が提案されている。これらの手法では、3Gエリアを自動車で走行中のユーザについて、それらのユーザが通信を要求した際、近い未来にWiFiエリアに入る可能性がある場合、その時まで通信を保留しておくことで、WiFiの限られた利用機会を有効活用したオフローディングを実現する。

それらの手法の一つとして、Balasubramanianらは文献[4]において、Wifflerと呼ばれるシステムを開発した。Wifflerでは、遅延許容期限をアプリケーション毎に設定する。そして、WiFiエリア外でアプリケーションが通信を要求した場合、次にWiFiエリアに入るまでの移動に要する時間を予測する。アプリケーションの遅延許容期限までにWiFiエリアへの移動が可能であると予想された場合は、その時まで通信を保留し、さもなくば直ちに3G回線経由で通信を行う。

Leeらは文献[11]において、通信遅延を許容したオフローディング手法について、歩行者を対象とした詳細な調査を行った。それによると、アプリケーションが設定する遅延許容期限の長さに比例して、オフロード可能なデータ量が増加することが明らかにされている。

上で述べたオフローディング手法は、メールや、ファイル転送など実時間性がそれほど重要でないアプリケーションのトラフィックをオフロードするには有効である。しかし、モバイル・データ・トラフィックの大半がWebページや、Webページに埋め込まれた動画データなどのコンテンツ（以下、Webコンテンツとよぶ）であることが知られている[8]。これらWebコンテンツでは、閲覧までの遅延が生じることによって、使い勝手が大きく低下することが知られている[12], [13]。それを考慮すると、遅延を許容するオフローディング手法を用いてWebコンテンツをオフロードする場合には、遅延許容期限の値として、3G回線経由でコンテンツを取得するのに要する時間程度に設定することが望ましい。しかし、文献[11]によると、ユーザが一旦WiFiエリアを離れ、再びWiFiエリアに移動するのに、平均40分かかると報告されている。このため、遅延を許容可能なオフローディング手法でオフロードできるものは、実質的には、ユーザがWiFiエリア内に滞在中に要求した通信分に限られる。

提案方式では、プリフェッチによりWebコンテンツをあらかじめダウンロードしておくため、アプリケーションからのコンテンツの要求に即座に対応することができ、Webコンテンツに要求される閲覧の即時性に適したオフロー

ディング手法となっている。

3. 消費電力量制約のもとでのオフロード量の最大化問題

提案手法では、ユーザが WiFi エリアの滞在中に、WiFi エリアを離れたあとに携帯電話回線（以下、3G とよぶ^{*1}）でユーザが閲覧する可能性のあるコンテンツをプリフェッチすることで、オフロードを実現する。プリフェッチにより一定の電力量が消費されてしまう一方、ユーザが WiFi エリアを離れたあとに、必ずしもプリフェッチされたコンテンツを閲覧するとは限らないため、閲覧の可能性のある、あらゆるコンテンツをプリフェッチすることは望ましくない。そこで、プリフェッチにより消費可能な電力量に制約を設け、その制約を満たしたうえで、オフロードされるデータ量（オフロード量）を最大化することを目指す。

以下では、想定環境についての定義や仮定を述べた後、提案手法が対象とする問題設定について述べる。

3.1 諸定義と仮定

3.1.1 端末とオフロードの対象期間

端末は、主にスマートフォンなどの WiFi と 3G 用のネットワーク・インタフェース・カード（NIC）を搭載した端末を想定する。なお、プリフェッチしたコンテンツを保存するためのストレージ容量には、制限がないものとする。

ユーザは、端末が消費したバッテリーを定期的に充電する。典型的には、毎日夜に自宅で充電することが想定される。

提案手法では、プリフェッチにより消費可能な電力量をあらかじめ決めておき、ある一定期間の間で、その電力量の範囲内でプリフェッチを行うようにすることで、消費可能な電力量の制約を満たす。このとき、バッテリーがある程度充電されると、これまでの消費電力量制約をリセットし、新たな消費電力量制約を設定する必要がある。本稿では、一回設定された消費電力量制約について、それが対象とする期間を「単位オフロード期間」とよぶ。単位オフロード期間は、ユーザの充電の傾向に基づいて任意に設定可能であるが、例えば、0 時から 24 時までの 24 時間を単位オフロード期間に設定することができる。ある単位オフロード期間が終了すると同時に、次の単位オフロード期間が開始するものとする。

3.1.2 アプリケーション

端末には、ブラウザ、RSS リーダ、その他 Web コンテンツ閲覧用のアプリケーション（動画共有サイトの閲覧やニュースサイトの閲覧用）などがインストールされているものとする。これらのアプリケーションには、本研究で提案する WiFi オフローディング手法が統合されているものとする。ユーザがコンテンツを要求した場合、アプリケー

ションはまず、ローカル・ストレージ内のアプリケーション専用のキャッシュ・フォルダ内に、要求されたコンテンツが存在するかどうか調べる。キャッシュ内に要求されたコンテンツが存在する場合、それを表示する。一方、要求されたコンテンツが存在しない場合、3G を利用してリモート・サーバからそのコンテンツを取得する。

3.1.3 ネットワーク環境

端末が接続可能な各 WiFi AP について、その AP の通信可能範囲を、その AP の WiFi エリアとよぶ。各 WiFi エリアは、固有の SSID（Service Set Identifier）、または ESSID（Extended SSID）で識別可能とする。

ある単位オフロード期間内に、ユーザが滞在した全 WiFi エリアの集合を、 $A^{wifi} = \{A_0^{wifi}, A_1^{wifi}, \dots, A_n^{wifi}\}$ と表記する。ここで、各 A_i^{wifi} は単位オフロード期間内にユーザが滞在した i 番目の WiFi エリアを表すものとする。従って、ある単位オフロード期間内に同じ WiFi エリアに複数回滞在した場合、それぞれ別の添字で区別される。端末は、WiFi エリアの滞在中は全ての通信を WiFi 経由で行い、3G は利用しないものとする。

WiFi エリア以外の領域を 3G エリアとよぶ。ある WiFi エリア A_i^{wifi} について、 A_i^{wifi} から離れた直後にユーザが滞在する 3G エリアを便宜上 A_i^{3G} と表記する。

ある単位オフロード期間内にユーザが滞在した全 3G エリアの集合を A^{3g} と表記する。また、ユーザが移動可能な領域は全て A^{wifi} 、または A^{3g} に属していると仮定する。

3.1.4 コンテンツ

本研究では、オフロードの対象となるコンテンツとして、1 つ以上のファイル（HTML ファイル、CSS、JavaScript、画像データ、動画データなど）で構成された Web ページを想定する。また、各コンテンツは固有の URL で識別可能とする。

端末が閲覧可能なインターネット上の全コンテンツの集合を $C = \{c_0, c_1, \dots, c_m\}$ と表記する。また、コンテンツ $c_i \in C$ のデータ量を $c_i.size$ (byte) と表記する。ユーザがある単位オフロード期間内で、3G エリア滞在中に、あるアプリケーションを利用して閲覧した全コンテンツの集合を C^b と表記する。また、同じ単位オフロード期間内に端末がプリフェッチした全コンテンツの集合を C^p と表記する。なお、 C^p には、ユーザが閲覧しなかったコンテンツも含まれる。さらに、ユーザが 3G エリア滞在中に、3G 経由で取得された全コンテンツの集合を C^{3g} と表記する。なお、3G エリアで取得されたコンテンツは、ユーザが閲覧したコンテンツの集合に含まれる（すなわち、 $C^{3g} \subset C^b$ ）。

3.1.5 電力消費モデル

コンテンツを取得する際には、3G と WiFi のそれぞれのインタフェースにおいて一定の電力量が消費される。コンテンツ $c_i \in C$ を 3G 経由で取得する際の消費電力量を $E^{3g}(c_i)$ 、WiFi 経由で取得する際の消費電力量を $E^{wifi}(c_i)$

^{*1} LTE など、3.9G の普及が進んでいるが、本稿ではそれらも含めて 3G とよぶ。

と表記する。

3.2 問題設定

3.3 消費電力量についての制約

閲覧されないコンテンツをプリフェッチしてしまうことで、無駄に電力量が消費されてしまうことを防ぐため、プリフェッチに使用可能な電力量に対する制約を設ける。以下ではその制約について述べる。

ある単位オフロード期間内に、プリフェッチにより WiFi インタフェースで消費される全電力量 $E^{offload}$ は、

$$E^{offload} = \sum_{c_i \in C^p} E^{wifi}(c_i) \quad (1)$$

となる。プリフェッチされたコンテンツの集合 C^p について、それに属す各コンテンツは、最終的にユーザに閲覧されたものとされなかったものの 2 つに分けることができる。このとき、ユーザに閲覧されたコンテンツの集合は、 $C^p \cap C^b$ であり、それらのコンテンツが仮にプリフェッチされなかった場合、3G 経由でダウンロードされることになる。そのときの全消費電力量は、

$$\sum_{c_i \in C^p \cap C^b} E^{3g}(c_i) \quad (2)$$

となる。

提案方式では、単位オフロード期間内にプリフェッチにより消費される全電力量が、式 (2) で表される電力量を超えないよう制約を設ける。すなわち、

$$\sum_{c_i \in C^p \cap C^b} E^{3g}(c_i) \geq E^{offload} \quad (3)$$

とする。

文献 [14] によると、単位データ量を送受信する際の消費電力について、WiFi は 3G の約 6 分の 1 であることが報告されており、プリフェッチのヒット率（プリフェッチしたコンテンツが閲覧される確率）をある程度確保できれば、閲覧されない無駄なプリフェッチによる消費電力量を踏まえたうえで、式 (3) の制約を満たすプリフェッチが可能である。

3.4 目的関数

単位オフロード期間内で、式 (3) の制約を満たしながらオフロード量を最大化することが提案手法の目的である。すなわち目的関数は、

$$\begin{aligned} & \text{maximize} && \sum_{c_i \in (C^p \cap C^b)} c_i.size \\ & \text{subject to} && (3) \end{aligned} \quad (4)$$

と表される。

4. 消費電力量制約を考慮したプリフェッチに基づく WiFi オフローディング手法

本章では、前章で定義した問題を解決するための手法

を提案する。まず、提案手法の概要について、以下に説明する。

提案手法では、ある単位オフロード期間に対し、その開始時点において、その期間全体でプリフェッチに利用可能な電力量を決定する。このとき、前章で述べた消費電力量に関する制約を考慮するため、過去の単位オフロード期間におけるユーザのコンテンツの閲覧履歴を参考にする。具体的には、単位オフロード期間内において、ユーザが平均的にコンテンツの閲覧のためにどの程度通信に電力量を消費しているかについて履歴をとり、それに基づきその後の単位オフロード期間における消費可能電力量を決定する。

さらに、ある単位オフロード期間において、その期間内に消費可能な電力量を利用してオフロードを行った結果、式 (3) の制約を満たせなかった場合、次の単位オフロード期間内で利用可能な電力量を減少させる。また、式 (3) の制約に対し、実際の消費電力量が少なかつた場合には余裕があるとみなし、次の単位オフロード期間内で利用可能な電力量を増加させる。

オフロード量を増加させるためには、オフロードに割り当てられた電力量をどのタイミングでどれだけ消費できるかについての、電力消費スケジュールを適切に決定する必要がある。提案手法では、各時間帯ごとのユーザの 3G 回線経由のデータ通信量の推移に着目し、より多くのコンテンツが閲覧される可能性のある時間帯の直前に、より多くの電力を消費可能となるようスケジュールすることで、割り当てられた電力量を効率良く消費する。

また、オフロード量の増加の効果が高いコンテンツを優先的にプリフェッチすることも重要である。提案方式では、単純にコンテンツの閲覧確率の高いものをプリフェッチするだけでなく、コンテンツのデータ量も考慮したうえで、プリフェッチを行う。

以下では、上で述べた内容の詳細について、まず、オフロードに割り当てる電力量の決定方法を述べ、次に、割り当てられた電力量の消費スケジュールの決定方法を述べる、その後、プリフェッチするコンテンツの決定方法について述べる。

4.1 オフロードに割り当てる電力量の決定方法

4.1.1 基本方針

オフロードに割り当てる電力量 $E^{offload}$ は、単位オフロード期間の開始時刻に決定する。ここで、 $E^{offload}$ は、単位オフロード期間において式 (3) で示す制約を満たす値になるよう設定する。

単位オフロード期間内に、3G エリア滞在中に閲覧する全コンテンツを 3G 回線経由で取得するのに消費する電力量の予測値を E とする（プリフェッチされるコンテンツについても、仮に 3G と同じ電力を消費するものと仮定している）。このとき、式 (3) は以下の式に等しい。

$$E - \sum_{c \in C^{3g}} E^{3g}(c_i) \geq E^{offload}. \quad (5)$$

この式より、 $E^{offload}$ を、 E に対する割合で表記可能であることが分かる。 E のうち、 $E^{offload}$ に割り当てる割合を a として、 $E^{offload}$ を次式で求める。

$$E^{offload} = E \cdot a. \quad (6)$$

式 (6) に基いて $E^{offload}$ を決定するためには、まず E を求める必要がある。3G 回線を経由するデータ通信量に関して、文献 [15] では、週日と週末・休日では傾向に違いがあるものの、週日に属す各日の間、もしくは週末・休日に属す各日の間には大きな差が見られないことが報告されている。したがって、単位データ量を 3G 回線で取得するのに消費される電力量が一定であると仮定すると、単位オフロード期間内で 3G エリア滞在中に閲覧する全コンテンツを 3G 回線経由で取得する際に消費する電力量についても、週日に属す各日の間、もしくは週末・休日に属す各日の間には大きな差がないと推測できる。そこで提案手法では、週日と週末・休日のそれぞれについて、固有の E を求める。

次に、単位オフロード期間が週日である場合を例に、 E の具体的な求め方を説明する（週末・休日の場合も同様である）。単位オフロード期間毎に、ユーザが 3G エリア滞在中に閲覧する全コンテンツを 3G 回線経由で取得する際に消費する電力量を求める。この電力量は、

$$\sum_{c \in C^b} E^{3g}(c_i) \quad (7)$$

と表される。各単位オフロード期間において、この値を履歴として保存する。そして、単位オフロード期間のはじまりに、直近の一定数の週日の単位オフロード期間について、式 (7) の値の平均値を求め、それを E とする。

利用する履歴の個数を「履歴期間数」とよぶ。また、履歴期間数分の履歴を集めるのに必要な期間を「履歴期間」とよぶ。履歴期間は、単位オフロード期間と履歴期間数の積で表される。なお、提案システムの動作直後は、履歴期間数分の履歴が集まっていないため、プリフェッチを行わず、履歴の保存のみを行う。

4.1.2 電力量制約に対する過去の実績の反映

次に、式 (6) における a の求め方について説明する。

単純な方法として、固定的に a の値を決定することが考えられる。しかし、プリフェッチのヒット率が低い場合、式 (3) で定めた制約を満たせない可能性がある。そして、制約を満たせなかった場合、その後もユーザに対して継続的に電力量の負担をかけてしまう可能性がある。そこで提案方式では、各単位オフロード期間の終了時点で、式 (3) の制約を満たしたかどうかを判定し、その実績に基づいて、次の単位オフロード期間で利用可能な電力量を増減させる。

具体的には、直前の単位オフロード期間で消費電力量制約を満たした場合、 a を増加させる。一方制約を満たせなかった場合は減少させる。直前の単位オフロード期間において、 E に対するオフロードに使用可能な電力量の割合を a_{prev} とすると、次の単位オフロード期間について、 a を次式で求める。

$$a = \begin{cases} a_{prev} + \delta & (\text{式 (3) を満たした場合}) \\ a_{prev} - \delta & (\text{上記以外}). \end{cases} \quad (8)$$

なお、 δ は、 a の一回あたりの増減量を表す定数である。

4.2 電力消費スケジュール

提案手法では、オフロードに利用可能な電力量の消費スケジュールを以下の項目を求めることで決定する。

- 各 WiFi エリアにおいて、プリフェッチを行う時刻。
- 各 WiFi エリアにおいて、プリフェッチで消費可能な電力量。

本節では、この 2 項目を求める方法について説明する。

4.2.1 プリフェッチを行う時刻の決定方法

コンテンツは時々刻々と更新・生成される。あるコンテンツをプリフェッチしても、その後、さらにコンテンツが更新される可能性がある。また、ある時点でプリフェッチしたコンテンツよりも、よりオフロードの効果の高い別のコンテンツが新たに生成される可能性もある。そのため、ある 3G エリアにおいて、ユーザがあるコンテンツを閲覧する場合、そのコンテンツをプリフェッチするのに最も適したタイミングは、直前に滞在していた WiFi エリアにおいて、その WiFi エリアを離れる直前である。

提案方式では、できるだけ WiFi エリアを退出する直前にプリフェッチを行うようにするため、WiFi エリアの退出時刻の予測を行う。ただし、その時刻を正確に予測することは困難である。そこで、ユーザが滞在中の WiFi エリアの滞在期間を確率変数とした、確率密度関数の累積分布関数の値が閾値（退出判定閾値とよぶ）以上になる時刻にプリフェッチを行う。なお、この累積分布関数は既存手法を用いて算出可能であるとする [16]。

提案手法では、各 WiFi エリアについて、以上の方法で予測した退出タイミングに合わせてプリフェッチを開始し、その後の 3G エリアで閲覧する可能性の高いコンテンツの集合をダウンロードする。プリフェッチには通信のために一定の時間が必要であるが、その時間については、退出判定閾値をある程度余裕を持たせて設定することで対応可能である。以下では方式の説明の便宜上、プリフェッチは一瞬で終了するものとし、各 WiFi エリアの予測退出時刻を、その WiFi エリアでのプリフェッチを行う時刻（プリフェッチ時刻とよぶ）であるとみなす。

4.2.2 各 WiFi エリアにおけるプリフェッチで消費可能な電力量の決定方法

以下では、各 WiFi エリアのプリフェッチ時刻において、そのプリフェッチで消費可能な電力量の決定方法について述べる。

ユーザが 3G エリアにおいて閲覧するコンテンツの種類や数は、そのユーザの習慣に依存し、各時間帯で様々である（例えば、朝はニュース記事を読み、夜は動画を視聴するなど）。従って、どの WiFi エリアにおいても、常に同じ電力量を消費してプリフェッチするのではなく、ユーザの習慣に合わせて、各 WiFi エリアごとにプリフェッチに消費可能な電力量を適切に設定することが望ましい。

提案方式では、単位オフロード期間内において、その間に閲覧されるコンテンツのデータ量の時間変化を予測する。また、その予測に基づき、より多くのデータ量を含むコンテンツを閲覧する時間帯については、その直前に滞在する WiFi エリアにおいて、より多くの電力量を用いてプリフェッチできるようにする。以下では、この方法についてより詳細に述べる。

ユーザが WiFi エリア A_i^{wifi} に滞在中とし、 A_i^{wifi} でのプリフェッチ時刻を T^p とする。また、 A_i^{wifi} の退出後の 3G エリア A_i^{3g} に滞在する期間の予測値を D^{3g} とする。この時、 A_i^{3g} でユーザが閲覧するコンテンツの合計データ量は、期間 D^{3g} の間にユーザが閲覧するコンテンツの合計データ量である。

ここで、時刻 t までに 3G エリアで閲覧したコンテンツのデータ量の累積値の予測値を $Tr(t)$ とすると、期間 D^{3g} の間にユーザが閲覧するコンテンツの合計データ量の予測値は、

$$Tr(T^p + D^{3g}) - Tr(T^p) \quad (9)$$

として求まる。図 1 に、 $Tr(T^p)$ と $Tr(T^p + D^{3g})$ の関係を図示する。

また、単位オフロード期間内に 3G エリアで閲覧する全コンテンツの合計データ量の予測値を Tr^{total} とする。提案手法では、 T^p において、プリフェッチに利用する電力量を次式により求める。

$$\frac{Tr(T^p + D^{3g}) - Tr(T^p)}{Tr^{total}} E^{offload}. \quad (10)$$

以降では、 $Tr(t)$ と、 D^{3g} の決定方法について述べる。

まず、 $Tr(t)$ の決定方法を述べる。

ユーザは、外出中に端末を用いてコンテンツを閲覧することが多い。例えば、文献 [17] では、ユーザは移動中に頻繁にコンテンツを閲覧することが報告されている。また、ユーザの一日の行動は、ある程度習慣化している。例えば、朝に登校して、正午近くにランチに出かけ、夕方に帰宅するなどである。したがって、3G エリアに滞在する時間帯も、その習慣に合わせて日々同様の傾向をもっている。そ

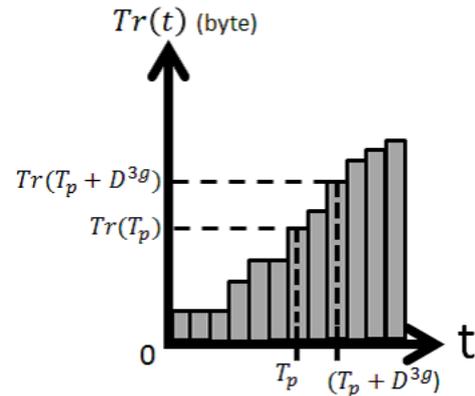


図 1 3G エリア滞在中に閲覧するコンテンツのデータ容量の累積値の時間に伴う推移

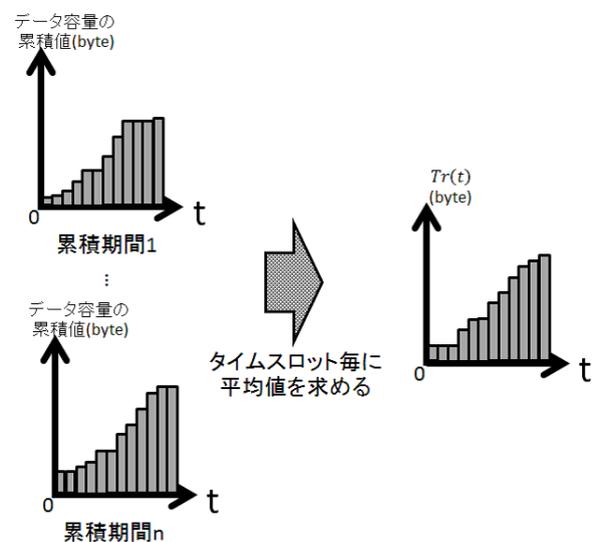


図 2 タイムスロット毎の 3G エリア滞在中に閲覧するコンテンツのデータ容量の累積値の予測方法

のため、1日を通して 3G 回線を経由するトラフィックは、日によって大きく変化することはない。例えば文献 [18] では、帰宅するユーザが多い夕方に、3G 回線を経由するトラフィックがピークを迎えることが報告されている。このため、ユーザが 3G エリア滞在中に閲覧するコンテンツのデータ量の時間変化の傾向についても、日によって大きく変化しないものと考えられる。

このようなユーザの習慣を踏まえて、以下では、 $Tr(t)$ の決定方法の詳細を説明する。

各履歴期間を任意の期間のタイムスロットに区切り、ユーザのコンテンツ閲覧履歴を基に、タイムスロット毎に閲覧したコンテンツの合計容量を求める。図 2 に、この様子を図示する。

そして、全ての履歴期間のタイムスロット毎の平均値を求めて得られるものを $Tr(t)$ とする。以上の手続きは単位オフロード期間のはじめに行う。

次に、ユーザが滞在中の WiFi エリアに対する 3G エリ

アに滞在する期間の予測値を求める。

ユーザが滞在中の WiFi エリアから、次の WiFi エリアまでの移動に要する期間、つまり WiFi エリアに対する 3G エリアに滞在する期間は、ユーザのコンテキストによって異なる。例えば、ユーザが通う学校は、WiFi が使える WiFi エリアであるとする。このユーザは、昼休みにランチをするために、学校の近くの店舗に出かけて、30 分後に学校に帰ってくるとする。学校を離れている期間は 3G エリア滞在中であるとする、3G エリアに 30 分滞在することになる。また、ユーザは学校から一時間かけて帰宅するとする。学校から自宅までの期間を 3G エリアであるとする、ユーザは 1 時間 3G エリアに滞在することになる。

以上より、1 つの WiFi エリアに対する 3G エリアの滞在期間は、ユーザのコンテキストによって様々なパターンが存在する。つまり、WiFi エリアに滞在中に、ユーザのコンテキストを推定することで、滞在中の WiFi エリアに対する 3G エリア滞在期間を推定可能である。

コンテキストを推定するためには、コンテキストを決定づける特徴、そして、コンテキストを分類する必要がある。ここで、ユーザは日々ある程度スケジュール通りに行動すると仮定する。この時、ユーザが WiFi エリアに滞在開始する時刻や、退出する時刻によって、3G エリア滞在期間の長さに、日々大きな変動がないと考えられる。つまり、ユーザのある時刻におけるコンテキストを、ユーザが WiFi エリアに滞在開始する時刻、退出する時刻、3G エリア滞在期間によって定義する。

以上より、ユーザがおかれているコンテキストを WiFi エリアに滞在開始する時間、退出する時間、3G エリア滞在期間をコンテキストを決定する特徴量とする特徴ベクトルを定義する。そして、この特徴ベクトルをクラスタ分割し、得られた各クラスタを 1 つのコンテキストとみなす。以上の考えに基づいて、コンテキスト分類方法の具体的な説明をする。ユーザが A_i^{wifi} に滞在する都度、

- A_i^{wifi} に滞在開始した時刻
- A_i^{wifi} から退出した時刻
- A_i^{3g} 滞在期間

の 3 次元の特徴ベクトルを生成する。これを、 A_i^{wifi} に関する滞在履歴ベクトルと呼び、一定期間保存する。そして単位オフロード期間のはじまりに、履歴期間内に滞在した全ての WiFi エリアに関する滞在履歴ベクトルのクラスタリングを行う。クラスタリング手法としては k-means 法などがあるが、ユーザによって、一日の行動パターン（スケジュール）が異なるため、クラスタ数を予め設定することはできない。したがって、本手法では、最短距離法などのクラスタ分割手法と、Upper Tail 法などのクラスタ数決定手法を組み合わせ、クラスタ分割する。

以上の手続きによって、コンテキストを分類する。そして、各クラスタの重心ベクトルの滞在期間の値をコンテキ

ストにおける 3G エリア滞在期間の推定値とする。

次に、コンテキスト推定に基づいて 3G エリア滞在期間を推定する方法について述べる。WiFi エリアに滞在開始する時間、退出する時間、3G エリア滞在期間を特徴量としてコンテキスト分類方法を上で述べた。そして、各コンテキストの重心ベクトルの滞在期間の値をコンテキストにおける 3G エリア滞在期間であると定義した。したがって、WiFi エリア滞在中に、ユーザのコンテキストを推定することで、滞在中の WiFi エリアに対する 3G エリア滞在期間を推定可能である。

ユーザが A_i^{wifi} に滞在開始する時刻を T_e 、プリフェッチ時刻を T_p とする。ユーザが A_i^{wifi} に滞在開始した後、

- 滞在開始時刻
- プリフェッチ時刻

の 2 次元で構成されるベクトルを生成する。そして、これを A_i^{wifi} に関する状態ベクトルと呼ぶ。そして、生成した状態ベクトルの滞在開始時刻と、 A_i^{wifi} に関する滞在履歴ベクトル空間の各クラスタの重心ベクトルの滞在開始時刻のユークリッド距離を求める。同様に、生成した状態ベクトルのプリフェッチ時刻と、 A_i^{wifi} に関する滞在履歴ベクトル空間の各クラスタの重心ベクトルの滞在終了時刻のユークリッド距離を求める。そして、以上で求めた 2 つの距離の和が最小となる重心ベクトルを求め、その重心ベクトルの滞在期間の値を、ユーザが滞在中の WiFi エリアに対する 3G エリアに滞在する期間の予測値とする。

4.3 オフロード量が最大となるコンテンツの選択方法

本項では、オフロード量が最大となるコンテンツの集合をプリフェッチする方法について述べる。オフロード量が最大となるコンテンツの集合をプリフェッチするためには、各コンテンツをオフロードに対する効果という観点で評価する必要がある。また、オフロードに利用可能な電力量は限られている。したがって、限られた電力量を利用して、オフロードの効果が最大となるようなコンテンツの集合を決定する方法が必要となる。本項では、以上で述べた、コンテンツを評価する基準、限られた電力量でオフロードの効果が最大となるコンテンツの選択方法について述べる。

4.3.1 コンテンツの評価基準

コンテンツをプリフェッチすることでオフロード可能なデータ容量の期待値に基づいて、各コンテンツを評価する。そして、各 WiFi エリアでは、この値の合計が最大となるコンテンツの集合をプリフェッチする。コンテンツをプリフェッチすることでオフロード可能なデータ容量の期待値の算出方法について述べる。ユーザが WiFi エリア A_i^{wifi} 滞在中の場合、3G エリア A_i^{3G} におけるコンテンツ c の閲覧確率を $P_b(A_i^{wifi}, c)$ とする。また、 c をプリフェッチすることでオフロード可能なデータ容量の期待値 $S_e(A_i^{wifi}, c)$ と定め、以下の式で定義する。

$$S_e(A_i^{wifi}, c) = P_b(A_i^{wifi}, c) \cdot c.size \quad (11)$$

また, $S_e(A_i^{wifi}, c)$ を以後, コンテンツ c の WiFi エリア A_i^{wifi} における, 期待オフロード量と呼ぶ.

4.3.2 閲覧確率算出方法

オフロード期待値を算出するために, 3G エリアにおけるコンテンツの閲覧確率を求める. まず, 閲覧確率を求める対象のコンテンツを絞り込む. ユーザは, インターネット上のコンテンツを万遍なく閲覧するのではなく, web サイトのトップページ, ポータル・サイトなどの一部の URL に頻繁にアクセスし, そこからアクセス可能なコンテンツを閲覧する [19]. また, ユーザの滞在場所によって, ユーザが閲覧するコンテンツの種類や, 利用するアプリケーションに特徴がある [20], [17], [21]. 以上より, 3G エリア毎に頻繁にユーザがアクセスするコンテンツが存在することがあると推測可能である. また, 履歴期間内に, 1つの 3G エリアで閾値回数以上アクセスしたコンテンツを, その 3G エリアにおける探索対象コンテンツと呼ぶ.

また, ユーザは, 探索対象コンテンツだけでなく, そこからリンクしているコンテンツを閲覧する. ブログを例にすると, ユーザはブログのトップページにアクセスする. そして, その後, ブログのエントリーにアクセスする. 1つの web ページ内に設置された各リンク先へユーザがアクセスする確率を求める手法として, アンカー・テキストに着目した手法がある [22][23]. 文献 [22][23] では, ユーザが閲覧中の web ページ内に設置されたアンカー・テキストに含まれる単語と, ユーザが好む単語との一致度を基準に, リンク毎にユーザがアクセスする確率を求めている. 以上より, 探索対象コンテンツ内のリンクからアクセス可能なコンテンツ c の閲覧確率は, アンカー・テキストに基づいて算出可能であるとする. そして, アンカーテキストに基づいて求める, コンテンツ c の閲覧確率を $P_{semantic}(c)$ とする.

ここで, A_i^{3g} に固有の探索対象コンテンツの集合を, $SC(i) = \{sc(i)_0, sc(i)_1, \dots, sc(i)_n\}$ と表す. ここで, A_i^{3g} における探索対象コンテンツ $sc(i)_k$ の閲覧確率を $P(A_i^{wifi}, sc(i)_k)$ とする. また, 探索対象コンテンツ $sc(i)_k$ 内に設置されたリンクから 1 ホップでアクセス可能なコンテンツの集合を $sc(i)_k.c = \{sc(i)_k.c_0, sc(i)_k.c_1, \dots, sc(i)_k.c_n\}$ とする. この時, $sc(i)_k.c_m$ を, そのアンカー・テキストから求まる閲覧確率は $P_{semantic}(sc(i)_k.c_m)$ となる. 以上より, A_i^{3g} 滞在中にコンテンツ $sc(i)_k.c_m$ の閲覧確率 $P(A_i^{wifi}, sc(i)_k.c_m)$ は, $sc(i)_k$ を閲覧しかつ, $sc(i)_k.c_m$ を閲覧する同時確率である. この値を求めるために, A_i^{3g} における $sc(i)_k$ の閲覧確率である $P(A_i^{wifi}, sc(i)_k)$ を求める. まず, 3G エリア A_i^{3g} に滞在する度に, そのエリア滞在中にユーザが閲覧したコンテンツの履歴を作成する. そして, 履歴期間内に A_i^{3g} で, 閾値回以上ユーザが閲覧したコンテンツをその

3G エリアにおける探索対象コンテンツ $SC(i)$ に追加し, その追加するコンテンツを $sc(i)_k$ とする. ここで, 履歴期間内に A_i^{3g} に滞在した回数を $N(A_i^{3g})$ とする. また, $N(A_i^{3g})$ の中で, 一度でも $sc(i)_k$ を閲覧した回数を $N(sc(i)_k)$ とする. 以上の時, $P(A_i^{wifi}, sc(i)_k)$ を次式で定義する.

$$P(A_i^{wifi}, sc(i)_k) = \frac{N(sc(i)_k)}{N(A_i^{3g})} \quad (12)$$

従って, $P(A_i^{wifi}, sc(i)_k.c_m)$ を次式で定義する.

$$P(A_i^{wifi}, sc(i)_k.c_m) = P(A_i^{wifi}, sc(i)_k) \cdot P_{semantic}(sc(i)_k.c_m) \quad (13)$$

また, 探索対象コンテンツは, 頻繁に更新があるコンテンツであると仮定する. したがって, キャッシュには保存しない.

4.3.3 コンテンツのデータ容量の算出

オフロード期待値を求めるために, コンテンツのデータ容量を求める必要がある. コンテンツのデータ容量は, 実際にプリフェッチして初めて明らかになる. 従って, オフロード期待値を求める際に利用するコンテンツのデータ容量として, コンテンツのデータ容量の予測値を用いる. コンテンツのデータ容量は, そのコンテンツの所属する web サイトの種類 (動画共有サイト, ニュース, SNS, ブログなど) によって異なる. また, 探索対象コンテンツは, web サイトのトップページ, ポータル・サイトなどである可能性が高い. よって, 探索対象コンテンツ毎に, そこからアクセス可能なコンテンツのデータ容量に違いがあると推測可能である. したがって, 探索対象コンテンツ毎に, そのコンテンツからプリフェッチしたコンテンツのデータ容量の履歴を作成し, 履歴期間内のデータ容量の平均値を求める. そして, その値を探索対象コンテンツ内のコンテンツのデータ容量の予測値として, オフロード期待値を求める際に利用する.

4.3.4 オフローディング量が最大になるコンテンツのプリフェッチ方法

WiFi エリアを退出する確率が閾値以上になった時刻で, プリフェッチすべきコンテンツの探索, プリフェッチを実行する. また, 探索対象コンテンツは頻繁に更新があるため, 本研究ではプリフェッチの対象から除く. コンテンツの探索にあたり, まず探索対象コンテンツをすべて取得する. 次に, 各探索対象コンテンツからワン・ホップでアクセス可能なコンテンツのアンカー・テキストを取得する. そして, 前章で述べた方法で, 各コンテンツのオフロード期待値を算出する. その後, その時刻でオフロードに利用可能な電力量を用いて, オフロード期待値が最大となるコンテンツの集合を求め, そのコンテンツの集合をプリフェッチする. また, オフロードに利用可能な電力量で,

オフロード期待値が最大となるコンテンツの集合を求めるとい問題は、オフロードに利用可能な電力量をナップサックの容量とみなし、また、オフロード期待値をナップサックに詰める商品の価値とした場合のナップサック問題と捉えることができるため、動的計画法を用いて解く。

5. 実験と評価

本章では、プリフェッチに基づく WiFi オフローディング手法の有用性を評価するために行ったシミュレーションの方法、結果、結果に対する考察を述べる。

5.1 シミュレーションの目的と方法

オフロードに対するプリフェッチの有用性を評価するために、ユーザの行動履歴に基づいたトレース・ドリブン・シミュレーションを行った。また、オフローディングに対するプリフェッチの有用性を評価する基準として、ユーザが 3G エリア滞在中に閲覧した全コンテンツのデータ容量の合計に対する、オフロードできたコンテンツの合計データ容量の割合を求める。

コンテンツがオフロードされたとみなす条件を定義をする。本シミュレーションでは、コンテンツが更新された時刻から、ユーザがコンテンツを閲覧するまでに、一度でもユーザが WiFi エリアに滞在した場合、そのコンテンツはオフロードしたと定義する。以上で述べたシミュレーションを実行するためには、以下のデータが必要となる。

- ユーザが閲覧したコンテンツの更新時刻、データ容量、閲覧時刻の履歴
- ユーザが WiFi エリアと 3G に滞在開始した時刻、エリアから離れた時刻の履歴

シミュレーションに必要な、履歴を作成する方法を述べる。ユーザは自らのスマートフォンにインストールしているブラウザを利用してコンテンツを閲覧する。そして、ブラウザにブックマークされている web サイトを探索対象コンテンツとみなし、ブックマークされているサイトから、ワン・ホップで到達するコンテンツを閲覧した時刻、コンテンツの更新時刻、データ容量の履歴を作成する。また、ユーザのスマートフォン上で、WiFi と 3G 回線への接続状況を監視するアプリケーションを用いて、WiFi エリアと 3G エリアに滞在開始した時刻と、エリアから離れた時刻の履歴を作成した。

被験者は 1 名であり、週日の 4 日間に渡り履歴の収集を行った。また、ブックマークされている web サイトは 4 つであり、全てブログに分類される。また、全館で WiFi が利用可能な建物内を移動する際、頻繁にハンドオーバーが発生する。その結果、WiFi と 3G 回線に接続した時間が数秒から数分程度の WiFi、3G エリアが大量に発生した。全館で WiFi が利用可能な場合は、それら短期間の接続は考慮しなくてよいと考え、滞在期間が 5 分未満のエリアは全て

取り除き、その前後の期間をマージした。

5.2 結果

3G エリア滞在中に閲覧したコンテンツの合計データ容量は 60579 byte であり、その内の 71.4% に当たる、43257 byte をオフロードできた。

5.3 考察

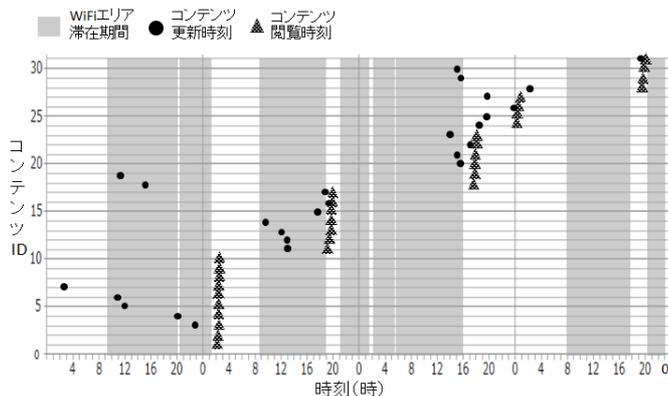


図 3 WiFi エリア滞在期間とコンテンツ閲覧時刻

履歴を収集した 4 日間に、被験者が滞在した WiFi エリア、コンテンツを閲覧した時刻、そして、閲覧したコンテンツの更新時刻を図 3 に示す。この図では、被験者が閲覧した各コンテンツに対して、固有のコンテンツ ID を割り当てている。被験者は 18:00 から深夜 2:00 にかけて集中的にコンテンツを閲覧していた。また、履歴を収集した期間において、被験者は 09:00 前後から、16:00 以降まで WiFi エリアに滞在していた。そして、コンテンツの更新は日中に活発に行われた。以上より、被験者が WiFi エリアに滞在している日中にコンテンツが活発に更新されたため、全コンテンツのデータ容量の 71.4% ものデータ容量をオフロードできたと考えられる。

また、文献 [18] において、3G 回線のトラフィックのピークは、帰宅する時間帯にあたる夕方にピークを迎えることが報告されている。そして、ユーザが、帰宅途中に閲覧するコンテンツは、主に日中に更新されたコンテンツであると推測できる。したがって、日中に更新されたコンテンツを、ユーザが日中に滞在している WiFi エリアでオフロードすることで、ピーク時におけるネットワークの負荷を効果的に軽減可能である。

6. おわりに

本稿では、ユーザが WiFi エリア滞在中に、ユーザが 3G エリアに移動した際に閲覧するコンテンツを予測し、WiFi 回線でプリフェッチする、通信遅延の小さい WiFi オフロード手法を提案した。また、提案手法では、移動端末の限られたバッテリー容量を考慮して、オフロードに利用する電力

量に制約を設けることで、ユーザへの負担を抑えている。

プリフェッチに基づく WiFi オフローディング手法の有用性を評価するために、ユーザの行動履歴に基づいたトレース・ドリブン・シミュレーションを行った。その結果、3G エリアで閲覧したコンテンツの合計データ容量の 71.4% のデータ容量をオフロードできることを確認し、プリフェッチに基づく WiFi オフローディング手法の有用性を確認した。今後は、提案手法が、SNS や、動画共有サイトなど、本シミュレーションでは取り扱わなかった種類のコンテンツに対しても有効であるかを評価する予定である。また、様々な生活スタイルを持ったユーザを対象に実機に基づいて提案手法の評価実験を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 25730059 の助成のもと行った。

参考文献

- [1] Cisco Visual Networking Index : 全世界のモバイル データトラフィックの予測、2011 ~ 2016 年アップデート, available from (http://www.cisco.com/web/JP/solution/isp/ipngn/literature/white_paper_c11-520862.html) (accessed 2013.03.28).
- [2] annual report 2012 KDDI, available from (http://www.kddi.com/corporate/ir/library/annual_report/pdf/kddi.ar2012.j.pdf) (accessed 2013.03.28).
- [3] Annual Report 2011 China Mobile Limited available from (<http://www.chinamobileltd.com/images/pdf/2012/ar/en/2011.ar.e.full.pdf>) (accessed 2013.03.28).
- [4] A. Balasubramanian, R. Mahajan, and A. Venkataramani: "Augmenting Mobile 3G Using WiFi," In Proc. of MobiSys' 10, pp. 209-222, 2010.
- [5] V. A. Siris, and D.Kalyvas: "Enhancing mobile data offloading with mobility prediction and prefetching," In Proc. of MobiArch '12, pp17-22 2012.
- [6] J. Eriksson, H. Balakrishnan, and S. Madden: "Cabernet: Vehicular Content Delivery Using WiFi," In Proc. of MobiCom, pp. 199-210, 2008.
- [7] S. Dimatteoy, P. Huiy , B. Hanyz, and V. O.K. Li: "Cellular Traffic Offloading through WiFi Networks," In Proc. of IEEE MASS, pp. 192-201, 2011.
- [8] TRAFFIC AND Market data report Ericsson 2011,11 available from (<http://hugin.info/1061/R/1561267/483187.pdf>) (accessed 2013.03.28).
- [9] Q. Xu, J. Erman, A. Gerber, Z. Mao, J. Pang, and S. Venkataraman: "Identifying diverse usage behaviors of smartphone apps," In Proc. of IMC '11, pp. 329-344, 2011.
- [10] K. N. Truong, J. A. Kientz, T. Sohn, A. Rosenzweig, A. Fonville, and T. Smith: "The design and evaluation of a task-centered battery interface," In Proc. of Ubicomp '10, pp 341-350, 2010.
- [11] K. Lee, I. Rhee, J. Lee, S. Chong, et al.: "Mobile Data Offloading: How Much Can WiFi Deliver?," In Proc. of Co-Next, pp. 425-426, 2010.
- [12] S. S. Krishnan, Bangalore, R. K. Sitaraman: "Video Stream Quality Impacts Viewer Behavior: Inferring Causality Using Quasi-Experimental Designs," In Proc. of IMC '12, pp 211-224, 2012.
- [13] Steve Lohr. For impatient web users, an eye blink is just too long to wait. New York Times, February 2012.
- [14] N. Balasubramanian, A. Balasubramanian, and A. Venkataramani: "Energy consumption in mobile phones: a measurement study and implications for network applications," In Proc. of. IMC '09, pp. 280-293, 2009.
- [15] M. Z. Shaq, L. Ji, A. X. Liu, and J. Wang: "Characterizing and modeling internet traffic dynamics of cellular devices," In Proc. of. SIGMETRICS ' 11, pp. 305-316, 2011.
- [16] T. M. T. Do, and D. G. Perez: "Contextual conditional models for smartphone-based human mobility prediction," In Proc. of. UbiComp '12, pp. 163-172, 2012.
- [17] T. M. Do, J. Blom, and D. G. Perez: " Smartphone usage in the wild: a large-scale analysis of applications and context," In Proc. of. ICMI '11, pp. 353-360, 2011.
- [18] Y. Zhang, and A. Rvidsson,; "Understanding the characteristics of cellular data traffic," In Proc. of. SIGCOMM '12, pp. 461-466, 2012.
- [19] D. Lymberopoulos, O. Riva, K. Strauss, A. Mittal, and A. Ntoulas: "PocketWeb: instant web browsing for mobile devices," In Proc. of ASPLOS '12, pp 1-12, 2012.
- [20] I. Trestian, S. Ranjan, A. Kuzmanovic, and A. Nuccil: "Measuring serendipity: Connecting people, locations and interests in a mobile 3G network," In Proc. of. IMC '09, pp. 267-279, 2009.
- [21] Y. Cui and V. Roto: "How people use the web on mobile devices". In Proc. of. WWW ' 08, pp. 905-914, 2008.
- [22] P. Venketesh, and R. venkatesan. Article: Adaptive Web Prefetching Scheme using Link Anchor Information. International Journal of Applied Information Systems 2(1):39-46, May 2012.
- [23] C. Z. Xu, and T. I. Ibrahim, "A KeywordBased Semantic Prefetching Approach in Internet News Services" , IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 16, No. 5, pp.601-611, 2004