

# Piggyback Transport Protocol : Participatory Sensing における低消費電力なアップロードエンジン

山本 享弘<sup>1,2,a)</sup> 猿渡 俊介<sup>1</sup> 南 正輝<sup>1</sup> 森川 博之<sup>1</sup>

受付日 2011年4月4日, 採録日 2011年10月3日

**概要:** 携帯電話を使って実空間情報を収集する Participatory Sensing ではセンシングとアップロードの動作を繰り返し行うため, バッテリ駆動である携帯電話にとっては消費電力が大きな課題となる. これに向けて, 本論文ではセンサデータのアップロードを低消費電力に行う PBTP (Piggyback Transport Protocol) について述べる. PBTP では, 携帯電話に特徴的な *inactivity timer* とトラヒックのバースト性により, ブラウザなどのアプリケーションが利用されている間には通信デバイスの空き時間が存在することに着目し, この時間を利用してセンサデータを転送することで通信電力を削減する. 本論文では, ユーザの通信モデルに 3GPP TR 101.112 を用い, センサデータの代表的なアップロードパターンを考慮して, PBTP の省電力効果をシミュレーションにより評価する. この結果, ユーザの通信頻度が高くセンサデータの転送サイズが大きい場合には, PBTP の省電力効果が顕著となることを示す. また, PBTP のようなプロトコルでは Participatory Sensing 以外の既存アプリケーションとの互換性維持や, ユーザが使用するアプリケーションの通信に影響を与えないことが重要であり, 本論文ではこれを実現するための具体的実装方法を示す. 実装した端末を使って測定した結果, PBTP により期待した省電力効果および優先制御効果が得られることを示す.

キーワード: ユーザ参加型センシング, 携帯電話, 省電力性, ヒューマンプロブ, センサネットワーク

## Piggyback Transport Protocol: Energy-efficient Upload Engine for Participatory Sensing

TAKAHIRO YAMAMOTO<sup>1,2,a)</sup> SHUNSUKE SARUWATARI<sup>1</sup>  
MASATERU MINAMI<sup>1</sup> HIROYUKI MORIKAWA<sup>1</sup>

Received: April 4, 2011, Accepted: October 3, 2011

**Abstract:** Participatory Sensing enables us to build a large platform for wide-area sensing by utilizing cell-phones as sensor nodes. One of the main problems in the participatory sensing is energy consumption on a cell-phone because of its battery. Piggyback Transport Protocol (PBTP) reduces the communication energy in the participatory sensing. Because of the *inactivity timer* and traffic burstiness, a cell-phone has some idle periods when it keeps the wireless connection but does not communicate. PBTP uploads the sensor data in these idle periods and improves the utilization efficiency of the cell-phone's modem. The paper evaluates the energy efficiency of PBTP under 3GPP TR 101.112 traffic model by simulation. The result shows PBTP reduces energy consumption compared to the previous work especially when the frequency of user communication is high and the size of sensor data is large. The paper also describes the implementation of PBTP which realizes the traffic control without changing the existing applications except for participatory-sensing applications and evaluates the influence on the user's communication using the actual cell-phone. The result represents PBTP decreases the latency of the user's communication while uploading the sensor data in parallel.

**Keywords:** participatory sensing, mobile phone, energy efficiency, human probe, sensor network

<sup>1</sup> 東京大学先端科学技術研究センター  
Research Center for Advanced Science and Technology, the  
University of Tokyo, Meguro, Tokyo 153-8904, Japan

<sup>2</sup> 株式会社コア総合研究所

CORE Research and Development Institute, Kawasaki,  
Kanagawa 215-0034, Japan

<sup>a)</sup> tak-yama@core.co.jp

## 1. まえがき

携帯電話において、GPSやマイク、カメラ、加速度センサ、地磁気センサ、角速度センサなど多彩なセンサの搭載が進められていることを背景に、携帯電話を利用して実空間情報を収集する研究が行われている [1]。個々のユーザがデータを収集してセンサネットワークを構成することから、Participatory Sensing [2] や People-Centric Sensing [3] と呼ばれている。すでに、環境モニタリング [4], [5], [6], [7], [8] やユーザ行動履歴収集 [9], ヘルスケア [10], ソーシャルネットワークでの利用 [11], [12], [13] などの分野で研究が進められている。

Participatory Sensing で使用する携帯電話はバッテリーによって駆動するため、消費電力が問題となる。特に無線通信による消費電力は大きく [11], 通信電力の削減は重要な課題である。携帯電話などの無線通信デバイスにおける通信電力を削減する手法としては、アプリケーションレベルで制御を行う方法と通信プロトコルレベルで制御を行う方法が考えられる。Musolesi らの研究 [14] では、歩行状態などのコンテキストを共有するソーシャルネットワークのアプリケーションにおいて、コンテキスト情報の精度を維持しながら、センサデータの転送回数を削減する手法を開発している。この研究では、コンテキスト情報において同じ状態が連続する場合が多いことに着目し、端末側では投票ベースの判定によって同じ状態が継続して発生した場合にデータを送信することで、センサデータの転送回数を削減している。また、サーバ側においても、マルコフ連鎖を用いてユーザの位置を予測することで、位置情報の転送回数を削減している。しかしながら、ヘルスマニタリングなどの Raw データにおいては、そのようなコンテキスト情報の特徴を利用することができないため、通信電力の削減は難しい。

一方、通信プロトコルレベルの制御によって通信電力を削減する技術については、センサネットワークや無線 LAN の分野で研究がなされてきた [15], [16], [17], [18]。これらの研究では、無線の MAC 層において通信デバイスの ON-OFF を操作することで、通信プロトコルレベルでの低消費電力化を実現している。たとえば Krashinsky らの研究 [17] では、IEEE 802.11 の PSM (Power-Saving Mode) のポーリング間隔をウェブのトラフィック特性に応じて段階的に増加させることで、通信デバイスの駆動時間を削減している。しかしながら、Participatory Sensing では、携帯電話ネットワークを利用して実現するため、携帯電話のネットワークインタフェースの規定に厳密に従う必要がある。このため、ネットワークインタフェースの変更を必要とする従来手法は適用することができない。

携帯電話の通信デバイスは、ユーザからの通信リクエ

ストの発生に応じて次のように動作する。待ち受け状態では着信確認のために通信デバイスを間欠駆動する *power saving mode* にあり、通信リクエストが発生するとデータ通信用チャンネルの割当てを受けて、通信デバイスを常時稼働する *power active mode* に遷移する [19], [20]。チャンネルの割当てには一定の時間を要することから、いったんデータ通信用チャンネルの割当てを受けると連続通信時の遅延削減のために、無通信状態が一定期間継続するまで *power active mode* にあって、チャンネルを保持する。無通信時間の計測には *inactivity timer* が使用され、WCDMA [19], [21], cdma2000 [21], LTE [20], [22], [23] などの通信方式で実装されている。この *inactivity timer* を使って *power active mode* を継続する動作は、定期的にセンサデータを転送する Participatory Sensing のアプリケーションにとっては、通信電力を増大させる要因となる。

Balasubramanian らの TailEnd [24] は、この *inactivity timer* による *power active* 期間を削減することによって携帯電話の通信電力を削減するもので、Participatory Sensing にも適用することができる。TailEnd では、センサデータをキュー内にバッファリングしておき、送信期限に達してデータ通信用チャンネルの割当てを受けたときにまとめて転送することで、センサデータを転送するたびに発生していた *inactivity timer* による *power active* 期間を集約する。しかしながら、*power active mode* に遷移したときにキュー内のすべてのデータを転送するため、転送するセンサデータのサイズが大きくなると通信デバイスの駆動時間が大幅に増加する。また、トラフィックの優先制御が考慮されていないため、アプリケーション側で制御を行わなければ、センサデータの転送によってユーザの通信のスループットが低下する可能性がある。さらに、データ通信の発生を検出するためには、アプリケーションが TailEnd の API を使用する必要があり、ブラウザやメール、ユーザが追加するネットワークアプリケーションなどの Participatory Sensing 以外のアプリケーションにも変更を加えることが求められる。

このような Participatory Sensing における通信電力の問題に対して本論文では、Participatory Sensing 以外の既存アプリケーションとの互換性の維持を実現しつつ、省電力にセンサデータの転送を行う Piggyback Transport Protocol (以下 PBTP) の設計と実装について述べる。PBTP では、TailEnd 同様に *inactivity timer* に着目する。これに加え、PBTP ではトラフィックのバースト性に着目する。一般に、ブラウザなどのアプリケーションが利用されている間には、通信の行われていない期間が多く存在することが知られており [25], PBTP ではこの空き時間を使ってセンサデータの送信を行う。TailEnd ではユーザの通信の発生を検出するとすべてのデータを送信するが、PBTP では間欠的に発生する複数の空き時間を積極的に利用してセンサデータを送信する。このようにすることで、センサデータ

送信時の通信デバイス駆動時間増加を抑制し、TailEnderと同等以上の省電力化を図る。PBTPはセンサデータの送信期限を満足しつつ、この空き時間を積極的に利用してセンサデータの送信が行われるように、データの転送の開始/中止を制御するプロトコルである。このとき、TailEnderでは実現されていなかった既存アプリケーションとの互換性を維持しつつ、PBTP内でパケットの優先制御を行う実装を実現することで、ユーザの通信への影響も抑える。

本論文では以下の構成でPBTPの設計と実装について述べる。2章では、PBTPの基本的な考え方について述べ、具体的なアルゴリズムを設計する。3章では、ユーザの通信モデルに3GPP TR 101.112を用い、センサデータの代表的なアップロードパターンを考慮して、PBTPの省電力効果をシミュレーションにより評価する。この結果、ユーザの通信頻度が高く、センサデータの転送サイズが大きい場合（ヘルスマニタリングやイベントなどにおける画像データのアップロード）には、PBTPの省電力効果が顕著となることが示される。4章では、既存アプリケーションとの互換性を維持しつつ、トラフィックの優先制御を実現するAndroid端末上での実装方法について述べる。また、実装した端末を用い、省電力効果の確認と、ユーザの通信時間に及ぼす影響を評価する。この結果、PBTPにより、期待した省電力効果および優先制御効果が得られることが示される。

## 2. Piggyback Transport Protocol

本章では、Piggyback Transport Protocolの制御アルゴリズムを設計する。これに向け、携帯電話のinactivity timerについて述べ、inactivity timerの機構を利用することで低消費電力なセンサデータのアップロードが可能となることを示す。次に、センサデータのアップロード期限を考慮しつつ、inactivity timerを利用したデータ転送方式の具体的なアルゴリズムについて述べる。

### 2.1 携帯電話の消費電力特性

携帯電話における通信デバイスの状態を消費電力の観点で見た場合には、常時駆動するpower active modeと間欠駆動するpower saving modeの2つの状態に分類することができる[19], [20]。power saving modeは通信デバイスを間欠駆動して着信確認を行う待ち受け状態であり、通信リクエストが発生するとデータ通信用チャネルの割当てを受けて、通信デバイスを常時稼働させるpower active modeに遷移する[19], [20]。いったんデータ通信用チャネルの割当てを受けると、連続通信時の遅延削減のために、inactivity timer [19], [20], [21], [22], [23]が発火するまでの間power active modeにあってチャネルを保持する。データ通信用チャネルを保持している間は、通信デバイスを常時駆動して受信データを監視するため、データの送受信が行われ

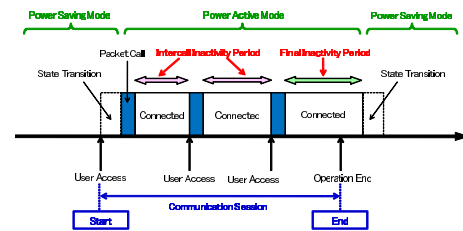


図1 ウェブ閲覧中の通信デバイスの動作  
Fig. 1 Change of energy state during web browsing.

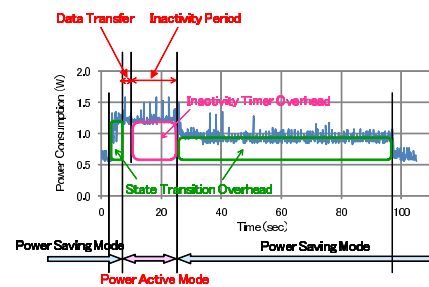


図2 10 KB 転送時の電力波形  
Fig. 2 Power consumption during 10 KB transfer.

なくてもデータの送受信が行われる間と同等の電力を消費する[19], [21]。WCDMAでは、RRC (Radio Resource Control) 状態遷移において、データ通信用チャネルを持つCell\_DCHとCell\_FACHがpower active mode、データ通信用チャネルを持たないCell\_PCHとURA\_PCHとIdle Modeがpower saving modeに該当する[19]。power active modeとpower saving modeの中の各状態によっても消費電力に違いは存在するが、提供されるソフトウェアプラットフォームから市販の携帯電話におけるRRC状態を特定することはできないため、power saving modeとpower saving modeのモデルを使って表現することとする。

一方で、携帯電話上でブラウザなどのネットワークアプリケーションが実行されている間には、トラフィックのバースト性によって通信の行われない期間が定期的発生する。たとえばウェブのトラフィックでは、ユーザが表示された画面を見て考えごとをするuser think timeが定期的発生することが確認されている[25]。そのため携帯電話では図1に示すように、inactivity timerとトラフィックのバースト性によって、データ通信用チャネルを保持してpower active modeを継続している間には、データ転送の行われていない期間が多く存在する。

図2に、power saving modeからデータ転送を行ったときの電力波形を示す。電力波形の測定は、開発用の携帯電話端末であるGDDフォンを使ってWCDMAのネットワーク上で10 KBのデータを送信し、端末とバッテリー間に挿入した0.1Ωのシャント抵抗の電圧をオシロスコープDL750で取得することによって行った。power saving modeでの消費電力が0.63 Wと高くなっているが、これはUSBケーブルを介してデータ転送の実行を指示してい



るためであり、USB ケーブルを接続しない待受状態での消費電力は 0.033 W であった。10 KB を 2 回連続して送信することによって 10 KB の転送のみに要する時間を測定したところ、平均で 0.74 秒であったことから、消費電力が上昇する期間のうち実際にデータ転送を行っている時間は非常に短いことが分かる。GDD フォンによる測定結果では、10 KB のデータ転送のみによって生じる消費電力量が 1.54 J であるのに対し、状態遷移と *inactivity timer* によるオーバヘッドで生じる消費電力量は 34.4 J であった。したがって、*power saving mode* からデータ転送を繰り返した場合には、オーバヘッドによって多くの電力を消費することになる。また、*power active mode* において、データ転送を行っているときの平均電力は 1.29 W であり、データ転送を行っていないときの平均電力 1.28 W と変わらないことから、*power active mode* を維持している期間を利用することでわずかな電力の増加でセンサデータを転送できることが分かる。以上のことから、PBTP では、他のアプリケーションによって *power active mode* に遷移している間の無通信期間を利用してセンサデータを転送することで、通信電力の削減を図る。

PBTP の動作を説明するうえで本論文では、*power active mode* にある間の無通信期間を *inactivity period* と呼び、図 1 に示すように *power active mode* における最後の *inactivity period* を *final inactivity period*、それ以外を *intercall inactivity period* と呼ぶこととする。*inactivity period* を利用してセンサデータを転送するにあたっては、転送のタイミングによって通信デバイスの駆動時間が変化する。*final inactivity period* では通信セッションが終了して、*inactivity timer* の発火後に *power saving mode* に遷移する状態にある。*final inactivity period* にセンサデータを転送した場合は、センサデータの転送によって *power active mode* の期間が延ばされるため通信デバイスの駆動時間が増大する。*intercall inactivity period* では次の通信リクエストのためにデータ通信用チャンネルを保持している状態にある。*intercall inactivity period* にセンサデータを転送した場合は、*power active mode* の期間の長さは変わらないため通信デバイスの駆動時間は増大しない。

図 2 に示されるように、通信デバイスを駆動するために必要な電力は、データ転送を行うために必要な電力と比べて大幅に大きい。そこで PBTP では、通信セッションの開始を検出するとセンサデータの転送を開始し、通信セッションの終了を検出すると転送を中止する動作によって、通信デバイスの駆動時間の増大を抑制するようにセンサデータの転送を制御する。

## 2.2 PBTP のアルゴリズム

PBTP では、他のアプリケーションによって *power active mode* に遷移した期間を利用してセンサデータを転送する

```

N: the number of sensor data in queue
ti: generation time of each sensor data
D: the deadline of transmission
r: the constant parameter in PBTP (0 ≤ r ≤ 1)
Tidle: the idle timeout value
while (true)
    wait (N > 0)
    wait ((detect a user's packet) || (t - min1 ≤ i ≤ N {ti} ≥ D))
    if (detect a user's packet)
        if (t - min1 ≤ i ≤ N {ti} < rD)
            repeat
                tidle = the idle time of user communication
                if (tidle < Tidle) upload data
                else stop upload and break
            until (N == 0)
        else upload all the data
    else if (t - min1 ≤ i ≤ N {ti} ≥ D) upload all the data
end while
    
```

図 3 PBTP のアルゴリズム

Fig. 3 PBTP algorithm.

ことで、通信デバイスの駆動時間の増大を抑制する。しかしながら、他のアプリケーションによるデータ通信が発生しなければ、センサデータを長期間転送できないという問題が発生する。また、センサデータを転送するための十分な空き時間が得られなければ、送信しきれないセンサデータが堆積していく問題が生じる。PBTP では、センサデータのキュー内での滞在時間情報を用いて送信状況を判断し、ユーザが通信を行う間の空き時間だけではセンサデータを転送できない場合には、通信デバイスを新たに駆動してセンサデータの転送を行う。

PBTP のアルゴリズムを図 3 に示す。変数  $N$  はキュー内で送信待ちになっているセンサデータの数、 $D$  はアプリケーションが定めるセンサデータの送信期限を表す。まず、センサデータが発生すると時刻  $t_i$  を記録してキューに保存し、他のアプリケーションによる通信パケットの発生を待ち受ける。時刻  $t$  のときに通信パケットの発生を検出すると、最も古いセンサデータのキューでの滞在時間  $t - \min_{1 \leq i \leq N} \{t_i\}$  が  $rD$  を超えているかチェックする。 $r$  はセンサデータの送信状況を判断するためのパラメータで  $0 \leq r \leq 1$  の値をとる。

$t - \min_{1 \leq i \leq N} \{t_i\} < rD$  であった場合は、センサデータがキューに滞在している時間が短く、送信期限内にセンサデータを転送するうえで十分な空き時間が得られていると判断する。他のアプリケーションによる通信パケットを検出するとセンサデータの転送を開始し、他のアプリケーションによる通信パケットが時間  $T_{idle}$  の間発生していない場合は *final inactivity period* と判断してセンサデータの転送を停止する。

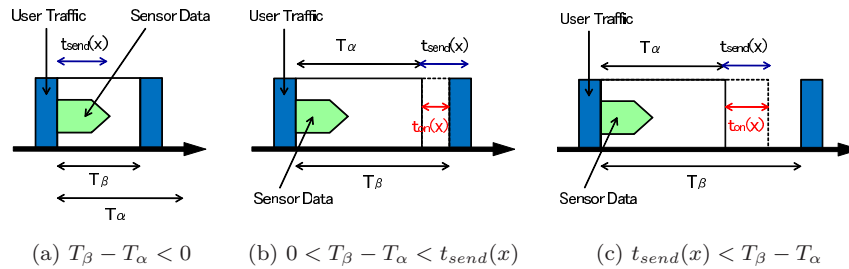


図 4 センサデータの転送による通信デバイスの駆動時間の変化  
 Fig. 4 Change of active period length due to transfer size.

残ったデータは、送信期限までの間に再度他のアプリケーションによる通信が発生する可能性が高いことから、通信パケットの発生を待ち受けて次の *intercall inactivity period* を利用して転送する。センサデータの転送によって  $N = 0$  となった場合は、次のセンサデータの発生まで待つ。

$t - \min_{1 \leq i \leq N} \{t_i\} \geq rD$  であった場合は、センサデータがキューに滞在している時間が長く、センサデータを転送するための十分な空き時間が得られていないと判断する。空き時間を使ってセンサデータを転送するだけでは送信期限内に転送できない可能性が高いため、通信セッションの終了を検出しても転送を中止せずに、引き続き通信デバイスを駆動してすべてのセンサデータを転送する。

通信パケットの発生を待ち受けている状態で送信期限に達して  $t - \min_{1 \leq i \leq N} \{t_i\} \geq D$  となった場合は、データ通信用チャンネルの割当てを受けて、すべてのデータをアップロードする。

なお、PBTP の実現においてはユーザの通信の発生を検出することがポイントとなる。後述するように、これはパケットの優先制御を実装することにより実現できる。

### 3. シミュレーション評価

PBTP では、ユーザの通信によって *power active mode* にある間の空き時間を使ってセンサデータを転送することから、通信電力の削減効果はユーザの通信パターンとセンサデータの発生パターンによって変化する。本章では、ユーザの通信パターンに 3GPP のトラヒックモデルを適用し、異なるセンサデータの発生パターンの下でシミュレーションを行うことによって、PBTP の省電力効果を評価する。

#### 3.1 通信電力のモデル化

携帯電話の通信電力をシミュレーションするためにモデル式を作成する。モデル化は、消費電力を評価する際に一般的に使用される線形式を用いて行う [26]。

サイズ  $x$  のセンサデータを転送したときに発生する消費電力量  $e_{total}(x)$  は、2.1 節で述べた携帯電話の動作から以下のように表すことができる。

$$e_{total}(x) = e_{s2a} + e_a(x) + e_{a2s} \quad (1)$$

ここで  $e_a(x)$  は *power active mode* のときに消費される電力量、 $e_{s2a}$ 、 $e_{a2s}$  はそれぞれ *power saving mode* から *power active mode*、*power active mode* から *power saving mode* に遷移する際に発生するオーバーヘッドを表す。*power saving mode* からセンサデータを転送した場合の消費電力量は  $e_{total}(x)$  となる。*power active mode* からセンサデータを転送した場合の消費電力量は、 $e_{s2a} = e_{a2s} = 0$  であるため  $e_a(x)$  となる。

$e_a(x)$  は、通信デバイスを駆動するための電力量とセンサデータを転送するための電力量の和で表すことができる。通信デバイス駆動中の消費電力を  $W_{on}$ 、通信デバイスの駆動時間の増加を  $t_{on}(x)$ 、転送による単位サイズあたりの消費電力量を  $c_0$ 、送信プロセスにかかるオーバーヘッドを  $c_1$  とすると以下となる。

$$e_a(x) = W_{on}t_{on}(x) + c_0x + c_1 \quad (2)$$

$t_{on}(x)$  は、データ転送を *power saving mode* で行うか、*final inactivity period* で行うか、*intercall inactivity period* で行うかによって変化する。各状態からデータ転送を行ったときの通信デバイスの駆動時間の増加をそれぞれ  $t_{on,saving}(x)$ 、 $t_{on,inter}(x)$ 、 $t_{on,final}(x)$  とする。

*power saving mode* でアップロードを行った場合は、センサデータを転送する時間  $t_{send}(x)$  と *inactivity timer* を使って *power active mode* を継続する時間  $T_\alpha$  の間通信デバイスを駆動することになるため、 $t_{on,saving}(x)$  は以下となる。

$$t_{on,saving}(x) = t_{send}(x) + T_\alpha \quad (3)$$

$t_{send}(x)$  は、データの伝送レートを  $R$ 、サーバの応答時間など送信データの処理にかかるオーバーヘッドを  $c_2$  とすると、 $t_{send}(x) = x/R + c_2$  と表せる。

*intercall inactivity period* でアップロードを行った場合は、*user think time* の長さ  $T_\beta$  と *inactivity timer* の長さ  $T_\alpha$  の大小関係によって通信デバイスの駆動時間が変化する。変化の様子を図 4 に示す。

したがって、 $t_{on,inter}(x)$  は以下で表すことができる。

$$t_{on,inter}(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } T_\beta - T_\alpha < 0 \\ T_\beta - T_\alpha & \text{if } 0 \leq T_\beta - T_\alpha < t_{send}(x) \\ t_{send}(x) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

*final inactivity period* でアップロードを行った場合は、センサデータの転送によって回線切断までの時間が延ばされるため  $t_{on,final}(x)$  は以下となる。

$$t_{on,final}(x) = t_{send}(x) \quad (5)$$

以上のモデル式から GDD フォンを用いて測定を行った結果、表 1 のパラメータが得られた。

### 3.2 トラフィックモデル

PBTP による通信電力の削減効果を評価するために、ユーザによる通信パターンとして図 5 に示す 3GPP TR 101.112 [27] のトラフィックモデルを適用する。

3GPP TR 101.112 のトラフィックモデルでは、ユーザの通信は複数の *packet service session* から構成され、*packet service session* は 1 つ以上の *packet call* からなる。*packet service session* はポアソン過程に従って発生し、平均発生頻度を  $\lambda_{Dps}$  で表す。*packet service session* 中の *packet call* 数は平均が  $\mu_{Npc}$  の幾何分布に従って発生する。*packet call* の直後にはユーザが考えごとをする平均時間  $\mu_{Dpc}$  の無通信期間が発生する。*user think time* を 3GPP TR 101.112 のトラフィックモデルでは *reading time* と呼ぶ。*reading time* の長さは幾何分布に従う。*packet call* には複数の *packet* が存在する。*packet* と *packet* の間にはわずかな空き時間が存在するが、この値は微小であるため本シミュレーションでは考慮しない。*packet call* の長さは平均  $\mu_{Lpc}$  とする。

表 1 GDD フォンにおける消費電力モデルパラメータ  
Table 1 Energy model parameters in GDD phone.

parameter	value
$e_{s2a}$	1.30 J
$e_{a2s}$	22.35 J
$c_0$	$2.05 \times 10^{-3}$ J/KB
$c_1$	1.03 J
$c_2$	0.51 sec
$W_{on}$	0.658 W
$T_\alpha$	16.4 sec
$R$	43.9 KB/sec

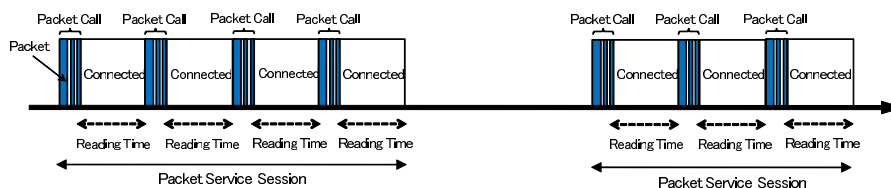


図 5 3GPP TR 101.112 のトラフィックモデル  
Fig. 5 3GPP TR 101.112 traffic model.

センサデータの発生パターンについては、センサネットワーク [28], Participatory Sensing [13] でのトラフィックパターンをもとに、センサデータの発生頻度  $\lambda_{sensor}$  とサイズ  $x_{sensor}$  を設定する。 $\lambda_{sensor}$ ,  $x_{sensor}$  の値は一定とする。

### 3.3 評価

ユーザの通信パターンに 3GPP のトラフィックモデルを適用し、3.1 節の消費電力モデルを使用して、PBTP の省電力効果をシミュレーションにより評価する。PBTP と既存研究である TailEnder は、送信期限  $D$  までの間に生じる通信期間を利用してセンサデータを転送するが、このとき発生する消費電力は送信期限  $D$  の間に蓄積されるセンサデータのサイズによって変化する。そこで Participatory Sensing の代表的なアプリケーションである環境モニタリング、ヘルスマニタリング、ソーシャルネットワークアプリケーションの中から、送信期限  $D$  の間に蓄積されるデータサイズが異なる 3 つのアプリケーションを選定してシミュレーションを行った。先行研究である文献 [13], [28] より、環境モニタリングでは 5.4KB、ヘルスマニタリングでは 5.4MB、ソーシャルネットワークアプリケーションでは 24MB のセンサデータが、送信期限  $D$  までの間に収集されるとした。省電力効果は *power saving mode* から転送を行った場合の消費電力量  $E_{normal}$  との比率によって表し、PBTP と TailEnder の省電力効果を比較する。*power saving mode* からの転送は、送信期限  $D$  の周期でデータ通信用チャンネルの割当てを受けてアップロードすることとする。

消費電力モデルの各パラメータは表 1 の値を使用し、離散分布である幾何分布を使ってシミュレーションするために *inactivity timer* の値  $T_\alpha$  は四捨五入して 16 秒とした。3GPP のトラフィックモデルの各パラメータは、文献 [27], [29] から  $\mu_{Npc}$  は 5 回、 $\mu_{Dpc}$  は 5 秒、 $\mu_{Lpc}$  は 3.84 秒とした。PBTP のアルゴリズムで使用する  $T_{idle}$  は  $T_\alpha$  と同じ 16 秒、 $r$  は 0.5 とした。消費電力は 30 回の平均値を使用した。

環境モニタリングのアプリケーションを利用したときの 1 日あたりのユーザの通信セッション数  $\lambda_{Dps}$  と省電力効果の関係を図 6 に示す。文献 [28] から、センサデータの発生頻度  $\lambda_{sensor}$  は 2 回/分、1 回あたりのセンサデータサイズ  $x_{sensor}$  は 15 byte、送信期限  $D$  は 1/8 日とした。 $\lambda_{Dps}$  が大きくなるにつれて、PBTP, TailEnder の通信電力の



削減量は *power saving mode* から転送する場合と比べてともに拡大する。PBTP と TailEnde<sup>r</sup> は通信が発生したタイミングで蓄積していたデータを送信するが、PBTP では通信デバイスの駆動時間を削減するためにユーザの通信の終了を検出すると以降の送信を中止する。しかしながら、環境モニタリングでは1回あたりの転送データサイズが小さく、PBTP と TailEnde<sup>r</sup> とで転送するタイミングの違いが生じないため、得られる省電力効果は等しくなる。

ヘルスマニタリングのアプリケーションを利用したときの1日あたりのユーザの通信セッション数  $\lambda_{Dps}$  と省電力効果の関係を図7(a)に示す。文献[28]から、センサデータの発生頻度  $\lambda_{sensor}$  は250回/秒、1回あたりのセンサデータサイズ  $x_{sensor}$  は1byte、送信期限  $D$  は1/4日とした。PBTP では、ユーザが通信を行う間の空き時間を利用してセンサデータを転送するために、センサデータのキューでの滞在時間が  $rD$  を経過していなければ、ユーザの通信セッションが終了すると以降の転送を中止する。 $\lambda_{Dps}$  が大きい場合は、 $(1-r)D$  の間にユーザの通信セッションが

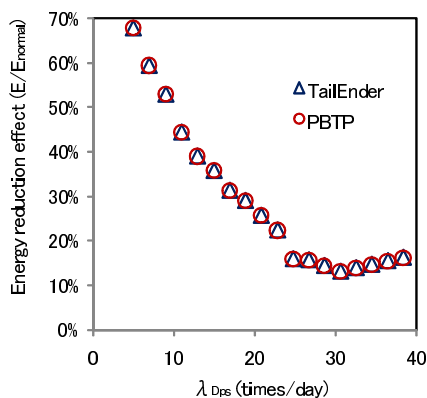


図6 環境モニタリングにおける通信セッション数と省電力効果の関係

Fig. 6 Energy efficiency with the number of packet service sessions in environmental monitoring application.

発生する確率が高くなるため、空き時間にセンサデータを転送することにより TailEnde<sup>r</sup> よりも高い省電力効果を得ることができる。 $\lambda_{Dps}$  が小さい場合は、 $(1-r)D$  の間にユーザの通信セッションが発生する確率が低くなり、送信期限に達して余分な状態遷移が発生するために TailEnde<sup>r</sup> よりも省電力効果は低下する。

ユーザの通信セッションが  $(1-r)D$  の間に再度発生するためには、ユーザの通信セッションが  $\lambda_{Dps} \geq \frac{2}{(1-r)D}$  の頻度で発生する必要がある。そこで  $r$  の値が

$$r(\lambda_{Dps}, D) = \begin{cases} 1 - \frac{2}{\lambda_{Dps} D} & \text{if } \lambda_{Dps} \geq \frac{2}{D} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

となるように設定して省電力効果を評価した。結果を図7(b)に示す。 $\lambda_{Dps}$  が大きい場合は  $r$  を0.5に固定した場合よりも通信電力が削減され、 $\lambda_{Dps}$  が小さい場合は TailEnde<sup>r</sup> と同程度の省電力効果が得られている。したがって、アプリケーションの送信期限  $D$  と1日あたりのユーザの平均通信セッション数  $\lambda_{Dps}$  に応じて  $r$  の値を調整することで、余分な状態遷移の発生を抑制することができる。このときの TailEnde<sup>r</sup> と PBTP の省電力効果の差分は、 $\lambda_{Dps} = 20$  の場合で1.2%、5.9Jであり、削減量は大きくはないが TailEnde<sup>r</sup> よりも低消費電力化を実現している。GDD フォンを使った測定結果から待受状態での消費電力は0.033Wであったことから、削減量は待受時間を3.0分間延ばす電力に相当する。

ソーシャルネットワークのアプリケーションを利用したときの1日あたりのユーザの通信セッション数  $\lambda_{Dps}$  と省電力効果の関係を図8(a)に示す。Micro-Blog [13] では、携帯電話を使って1日あたり18ページ、合計24MBのマルチメディアブログを作成していることから、発生頻度  $\lambda_{sensor}$  を18回/日、1回あたりのセンサデータサイズ  $x_{sensor}$  を1.3MBとし、送信期限  $D$  は1日とした。画像の収集をともなうソーシャルネットワークのアプリケー

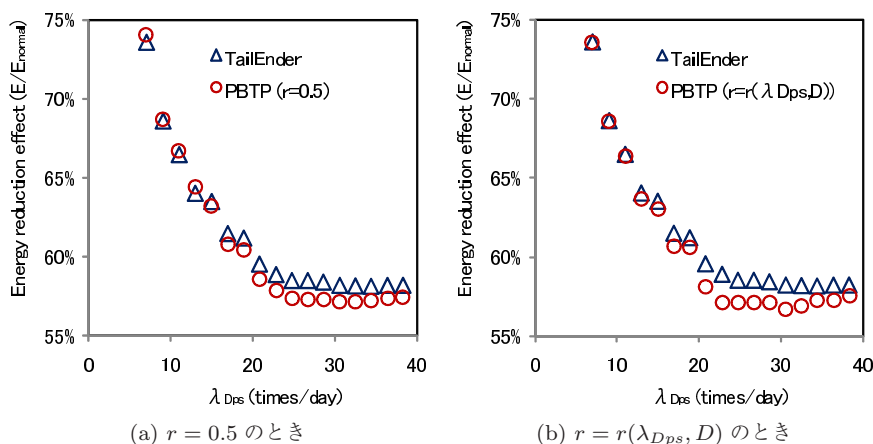


図7 ヘルスマニタリングにおける通信セッション数と省電力効果の関係

Fig. 7 Energy efficiency with the number of packet service sessions in health monitoring application.

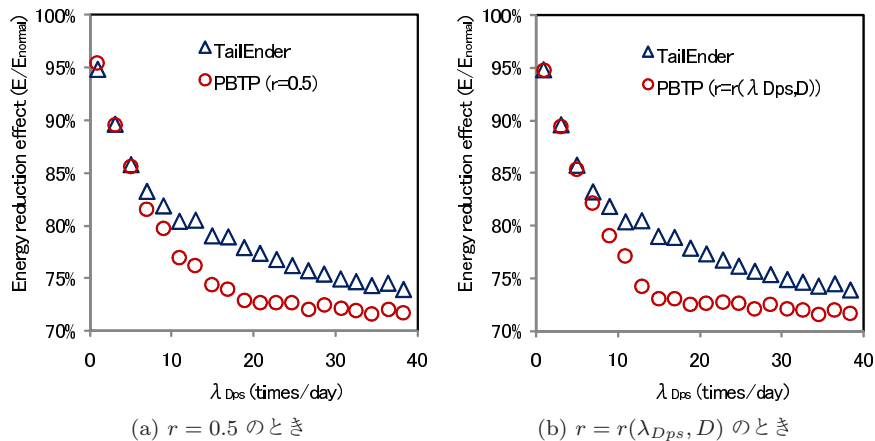


図 8 ソーシャルネットワークのアプリケーションにおける通信セッション数と省電力効果の関係

Fig. 8 Energy efficiency with the number of packet service sessions in social network application.

ションでは 1 回の送信あたりのデータサイズが大きく、TailEnd ではセンサデータの転送によって通信デバイスの駆動時間が大幅に増加する。PBTP では、空き時間を利用してセンサデータを転送することで通信デバイスの駆動時間を削減するため、TailEnd よりも高い省電力効果が得られる。ユーザの通信セッション数  $\lambda_{Dps}$  が小さく、送信期限までにセンサデータを転送しきれない場合には、余分な状態遷移が発生するため省電力効果は TailEnd の方が高くなる。しかしながら、式 (6) に沿って  $r$  の値を設定することで、図 8 (b) に示すように余分な状態遷移の発生を抑制できる。このときの TailEnd と PBTP の省電力効果の差分は、 $\lambda_{Dps} = 20$  の場合で 5.3%、24.0 J であり、ヘルスマonitoring のときに比べて収集するセンサデータのサイズが大きくなった分、消費電力の削減効果も拡大している。GDD フォンでは、この削減量は待受時間を 12.0 分間延ばす電力に相当する。

以上の結果から、PBTP による省電力効果は、式 (6) の  $r$  の値に影響を及ぼす送信期限  $D$  とユーザによる通信セッションの発生頻度  $\lambda_{Dps}$  を用いて、次のようにまとめることができる。 $\lambda_{Dps} \geq 2/D$  の場合には、PBTP は送信期限  $D$  の間に複数回発生するユーザの通信セッションを効率的に利用することで、センサデータ転送時の通信電力を削減する。TailEnd による省電力効果との差分は、ユーザによる通信セッションの間に転送したセンサデータのサイズの違いによって変化する。 $\lambda_{Dps} < 2/D$  の場合には、PBTP はセンサデータを複数回の通信セッションに分けて送信することができなくなり、省電力効果は TailEnd と同等となる。 $\lambda_{Dps} < 1/D$  になると、送信期限  $D$  の間にユーザによる通信セッションが発生しない場合が生じるため、PBTP、TailEnd とともに省電力効果が低下して、*power saving mode* からアップロードしたときの消費電力に漸近する。

## 4. 実装評価

本章では、2.2 節で述べたアルゴリズムを Participatory Sensing 以外の既存のアプリケーションに変更を加えることなく携帯電話上で実現するための実装方式について述べる。また、実機を用いた測定により、PBTP の省電力効果の確認を行うとともに、センサデータのアップロード動作がユーザの通信の遅延に及ぼす影響を評価する。

### 4.1 PBTP エンジンの実現

PBTP を携帯電話上で実現するにあたっては、並行してセンサデータを転送することによるスループット低下を抑制するために、トラヒックの優先制御が必要となる。また、他の通信によって *power active mode* に遷移した期間を利用してセンサデータを転送するために、通信セッションの開始と終了を検出する機能が必要となる。これら 2 つの機能は、デバイスレベル、通信プロトコルレベル、アプリケーションレベルで実現する方法が考えられる。

携帯電話では通信用プロセッサとアプリケーション用プロセッサから構成されることが多く [30]、通信用プロセッサ上のデバイスレベルで実現すれば通信デバイスの駆動状態を直接検出することができる。しかしながら、ユーザによる通信とセンサデータの転送による通信との識別が難しく、また現時点では通信用プロセッサを制御できる開発環境が存在しない。アプリケーション用プロセッサ上のアプリケーションレベルで実現すれば、ユーザの通信とセンサデータの転送との識別が容易であるが、通信の発生を検出するためにはすべてのネットワークアプリケーションを変更する必要がある。そこで本論文では、アプリケーション用プロセッサ上の通信プロトコルレベルでトラヒックを制御することで、Participatory Sensing 以外の既存のアプリケーションに変更を加えることなく PBTP の動作を実現



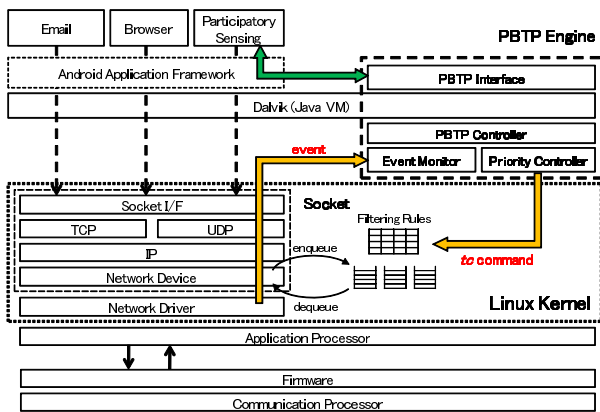


図 9 Android 端末上での PBTP エンジンの実現方式

Fig. 9 Implementation of PBTP engine on android phone.

する。

Android 端末上に実現した PBTP エンジンの全体像を図 9 に示す。PBTP エンジンは、PBTP Interface、PBTP Controller、Priority Controller、Event Monitor の 4 つのコンポーネントから構成される。PBTP Interface は Participatory Sensing のアプリケーションとのインタフェースを担い、PBTP Controller はユーザの通信状態に応じたセンサデータの転送開始/中止の制御を行う。Priority Controller は Linux カーネルに対してパケットの優先制御設定を行い、Event Monitor はネットワークドライバからの通信検出イベントを受信する。以下では処理の流れに沿って PBTP エンジンの実現方式について説明する。

まず、トラヒックの優先制御は、Android に含まれる Linux カーネルの機能を利用してパケットの優先制御を行うことで実現する。そのためにあらかじめ Linux カーネルのコンフィギュレーションを行って QoS 機能を有効化し、キューイング規則 (Queueing Discipline) の変更を可能にしておく。そのうえで Linux カーネルに対してキューイング規則の設定を行うために tc コマンドを Priority Controller 上に実装し、tc qdisc コマンドを使って優先度別の送信キューを作成する。

Participatory Sensing のアプリケーションが起動されると、PBTP Interface を介して送信先サーバの IP アドレスとポート番号の登録を行う。Priority Controller は IP アドレスとポート番号情報を取得すると、tc filter コマンドを使ってセンサデータのパケット優先度を下げないようにフィルタリングルールの設定を行う。設定されたフィルタリングルールに沿って Linux カーネルがパケットの送信を制御することで、ユーザの通信を優先して処理する動作を実現する。

次に、通信セッションの開始と終了の検出は、パケットの優先度情報を利用してネットワークドライバがユーザの通信を識別することによって実現する。ネットワークドライバは、通信状態が OFF の状態で高優先度パケットの発

生を検出すると、ユーザの通信状態を ON に遷移させて Event Monitor に通信セッションの開始を通知する。通信セッションの開始イベントを受信すると、PBTP Controller が PBTP Interface を介して Participatory Sensing のアプリケーションに対してセンサデータの転送開始を指示する。ユーザの通信状態が ON の状態で一定期間高優先度パケットの発生がないと、ネットワークドライバは通信状態を OFF に遷移させて Event Monitor に通信セッションの終了を通知する。通信セッションの終了イベントを受信すると、PBTP Controller が PBTP Interface を介して Participatory Sensing のアプリケーションに対してセンサデータの転送中止を指示する。

送信期限内にセンサデータを転送するための対策として、Participatory Sensing のアプリケーションはキュー内のセンサデータに更新があったときに PBTP エンジンに対して送信期限の通知を行う。送信期限内にユーザの通信セッションが発生しなかった場合は、PBTP Controller が Participatory Sensing のアプリケーションに対してセンサデータの転送開始を指示する。

#### 4.2 評価

PBTP エンジンを実装した端末を使用して、省電力効果の確認とユーザの通信時間に及ぼす影響の評価を行う。測定は WCDMA ネットワーク上で、開発用 Android 端末である GDD フォンを使用して行った。

まず、PBTP の省電力効果を評価した結果について述べる。発生する通信電力はユーザの通信パターンによって変化するため、3GPP TR 101.112 [27] のトラヒックモデルに従ってウェブサイトアクセスするアプリケーションを作成して評価を行った。ユーザの通信パターンが同一の環境下で、ユーザの通信とは関係なく *power saving mode* からセンサデータを転送した場合 (Normal)、TailEndor を使ってセンサデータを転送した場合、PBTP を使ってセンサデータを転送した場合のバッテリーの残量を比較した。スクリーンのバックライトは、ウェブサイトアクセスしている間は点灯し、端末の設定によって画面描画完了後 1 分後に消灯するようにした。バッテリーの残量は Android の API を使って取得し、アクセスするウェブサイトは Google のトップページを使用した。

図 10 に、Micro-Blog [13] の頻度で発生するセンサデータを転送した場合のバッテリー残量の時間的変化を示す。ユーザによる通信セッションの発生頻度は 15 回/日、送信期限は 1 日とし、バッテリーの残量は 10 回の測定による平均値を使用した。転送するセンサデータのサイズを同一にするために、センサデータを発生させる期間は 4 日間とした。図 10 に示されるように、バッテリーの残量はユーザのウェブアクセスによって時間の経過とともに減少する。1 日の送信期限に達するまでは、PBTP と TailEndor ではセンサ

データの転送を行わない場合 (Normal) に比べて通信電力が大きくなるが, PBTP は通信デバイスの駆動時間の増大を抑制するようにセンサデータの転送を制御するため, バッテリーの消耗が抑制される. *power saving mode* から転送を行う場合には, 1日ごとの送信期限に達したときに, データ通信チャンネルの割当てを受けて蓄積されたすべてのセンサデータを転送するため, バッテリーの残量が大幅に低下する. この結果, すべてのセンサデータの転送が完了した時点では, PBTP のバッテリー残量が最も多くなることが確認された. Normal, TailEnder と比べたときの PBTP のバッテリー残量の差は, 4日間でそれぞれ 7.7%, 2.0% で, 改善量は大きくないものの既存手法よりバッテリーの持続時間を延ばすことができる.

次に, ユーザの通信時間に及ぼす影響を評価した結果について述べる. Android 端末に標準で搭載される Browser と Email を使用し, センサデータを転送している状態でウェブサイトの閲覧, メールの問合せ, メールの送信を行ったときの通信時間を測定した. Browser と Email のプログラムには, 測定のために実行時間を取得する処理のみを追加し, 他の変更は加えない. アクセスするウェブサイトは東京大学, 東京大学森川研究室, Google のトップページを使用し, メールの問合せ時に蓄積されているメールはない状態, メール送信時のデータサイズは 1KB とした. この条件下で, 単独で通信を行った場合, 優先制御を行わない既定の携帯電話の状態ではセンサデータを並行して転送した

場合, PBTP を使ってセンサデータを転送した場合の通信時間を測定し, 10 回の平均値を比較した. TailEnder については, Browser と Email の内部実装の変更が必要となるため評価対象としなかったが, TailEnder では優先制御を行わないため, 既定の携帯電話の状態ではセンサデータを並行して転送した場合と同等の結果になると考えられる.

図 11 に, 利用したアプリケーションと通信時間の関係を示す. 既定の携帯電話の状態ではセンサデータを並行して転送した場合は, いずれのアプリケーションでもユーザが行う通信に大幅な遅延が生じる. 既定の状態では送信パケットを蓄積するキューが 1 つで FIFO 方式であり, 同時に通信を行うアプリケーションに対して公平に伝送容量が割り当てられるために, ユーザが行う通信のスループットが低下する. PBTP を使ってセンサデータを転送した場合は, ユーザの通信の遅延が抑制される. PBTP では, 優先度ごとにキューを作成してセンサデータ以外のパケットを優先して送出するために, ユーザが行う通信のスループット低下を抑制することができる. また, 通信プロトコルの IP 層で, 送信先サーバの情報を利用してユーザの通信を識別することにより, Participatory Sensing 以外の既存のアプリケーションに変更を加えることなく PBTP の動作を実現できることが確認された.

## 5. むすび

本論文では, 携帯電話を使ってセンサデータを収集する Participatory Sensing において, 低消費電力にセンサデータの転送を行う Piggyback Transport Protocol (PBTP) について述べた. PBTP では, 携帯電話の *inactivity timer* とトラヒックのバースト性によって生じる *power active mode* 中の空き時間を利用してセンサデータを転送することで, Participatory Sensing における通信電力を削減する. ユーザの通信パターンとセンサデータの発生パターンにトラヒックモデルを適用してシミュレーションを行った結果, TailEnder 以上の省電力効果が得られることを確認した. また, PBTP を携帯電話端末上に実装し, ユーザの通信を通信プロトコルレベルで検出することによって, Participatory Sensing 以外の既存のアプリケーションに変更を加えることなく実現できることを示した. 実装した端

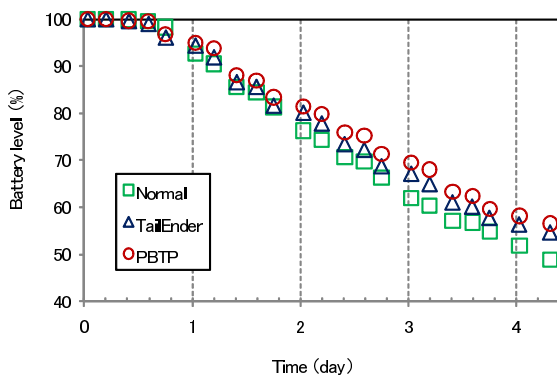


図 10 実機を使った省電力効果の評価

Fig. 10 Evaluation of energy efficiency with actual mobile phone.

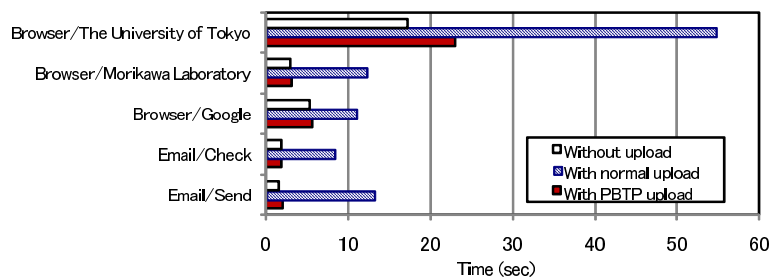


図 11 ユーザの通信時間に及ぼす影響の評価

Fig. 11 Evaluation of communication latency with actual mobile phone.

末を使用して測定を行った結果、期待した省電力効果が得られることを確認し、ユーザの通信における遅延を抑制できることが示された。今後はユーザの通信への影響をさらに軽減するために、携帯電話端末内でのパケットの優先度逆転を抑制するスケジューリング方式について検討を進める予定である。

参考文献

- [1] Lane, N.D., Miluzzo, E., Hong, L., Peebles, D., Choudhury, T. and Campbell, A.T.: A survey of mobile phone sensing, *IEEE Communications Magazine*, Vol.48, No.9, pp.140–150 (2010).
- [2] Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., Parker, A., Ramanathan, N., Reddy, S. and Srivastava, M.B.: Participatory sensing, *ACM Sensys World Sensor Web Workshop* (2006).
- [3] Campbell, A.: *The Rise of People-Centric Sensing*, ICDCN, p.9, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2009).
- [4] Mun, M., Reddy, S., Shilton, K., Yau, N., Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., Howard, E., West, R. and Boda, P.: PEIR, the personal environmental impact report, as a platform for participatory sensing systems research, *ACM MobiSys*, pp.55–68 (2009).
- [5] Paulos, E., Honicky, R. and Goodman, E.: Sensing atmosphere, *Proc. Workshop on Sensing on Everyday Mobile Phones in Support of Participatory Research in Conjunction with ACM SenSys* (2007).
- [6] Maisonneuve, N., Stevens, M., Niessen, M.E. and Steels, L.: Noisetube: Measuring and mapping noise pollution with mobile phones, *ITEE*, pp.215–228 (2009).
- [7] Lu, H., Pan, W., Lane, N.D., Choudhury, T. and Campbell, A.T.: SoundSense: Scalable sound sensing for people-centric applications on mobile phones, *ACM MobiSys*, pp.165–178 (2009).
- [8] Mohan, P., Padmanabhan, V.N. and Ramjee, R.: Nericell: rich monitoring of road and traffic conditions using mobile smartphones, *ACM SenSys*, pp.323–336 (2008).
- [9] Eisenman, S.B., Miluzzo, E., Lane, N.D., Peterson, R.A., Ahn, G.-S. and Campbell, A.T.: The BikeNet mobile sensing system for cyclist experience mapping, *ACM SenSys*, pp.87–101 (2007).
- [10] Consolvo, S., McDonald, D.W., Toscos, T., Chen, M.Y., Froehlich, J., Harrison, B., Klasnja, P., LaMarca, A., LeGrand, L., Libby, R., Smith, I. and Landay, J.A.: Activity Sensing in the Wild: A Field Trial of UbiFit Garden, *ACM SIGCHI*, pp.1797–1806 (2008).
- [11] Miluzzo, E., Lane, N.D., Fodor, K., Peterson, R., Lu, H., Musolesi, M., Eisenman, S.B., Zheng, X. and Campbell, A.T.: Sensing meets mobile social networks: The design, implementation and evaluation of the CenceMe application, *ACM SenSys*, pp.337–350 (2008).
- [12] Musolesi, M., Miluzzo, E., Lane, N.D., Eisenman, S.B., Choudhury, T. and Campbell, A.T.: The Second Life of a Sensor Integrating Real-World Experience in Virtual Worlds using Mobile Phones, *HotEmNets* (2008).
- [13] Gaonkar, S., Li, J., Choudhury, R.R., Cox, L. and Schmidt, A.: Micro-Blog: sharing and querying content through mobile phones and social participation, *ACM MobiSys* (2008).
- [14] Musolesi, M., Piraccini, M., Fodor, K., Corradi, A. and Campbell, A.T.: Supporting Energy-Efficient Uploading Strategies for Continuous Sensing Applications on Mobile Phones, *Pervasive* (2010).
- [15] Anastasi, G., Conti, M., Francesco, M. and Passarella, A.: Energy conservation in wireless sensor networks: A survey, *Ad Hoc Networks*, Vol.7, No.3, pp.537–568 (2009).
- [16] Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D.: An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks, *IEEE INFOCOM*, Vol.3, pp.1567–1576 (2002).
- [17] Krashinsky, R. and Balakrishnan, H.: Minimizing energy for wireless web access with bounded slowdown, *ACM MobiCom* (2002).
- [18] Anastasi, G., Conti, M., Gregori, E. and Passarella, A.: 802.11 power-saving mode for mobile computing in Wi-Fi hotspots: Limitations, enhancements and open issues, *Wireless Networks*, Vol.14, No.6, pp.745–768 (2008).
- [19] Yang, S.R., Lin, Y.B. and Hung, H.N.: Modeling UMTS Power Saving with Bursty Packet Data Traffic, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.6, pp.1398–1409 (2007).
- [20] Zhou, L., Xu, H., Tian, H., Gao, Y., Du, L. and Chen, L.: Performance Analysis of Power Saving Mechanism with Adjustable DRX Cycles in 3GPP LTE, *IEEE VTC*, pp.1–5 (2008).
- [21] Yeh, J.H., Chen, J.C. and Lee, C.C.: Comparative analysis of energy-saving techniques in 3GPP and 3G2 systems, *IEEE TVT*, Vol.58, No.1, pp.432–448 (2009).
- [22] 3GPP TS 36.321 ver.8.9.0: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Medium Access Control (MAC) protocol specification (2010).
- [23] Larsson, A., Lindström, M., Meyer, M., Pelletier, G., Torsner, J. and Wiemann, H.: The LTE link-layer design, *IEEE Communications Magazine*, Vol.47, No.4, pp.52–59 (2009).
- [24] Balasubramanian, N., Balasubramanian, A. and Venkataramani, A.: Energy consumption in mobile phones: A measurement study and implications for network applications, *ACM IMC*, pp.280–293 (2009).
- [25] Crovella, M.E. and Bestavros, A.: Self-similarity in World Wide Web traffic: Evidence and possible causes, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.5, No.6, pp.835–846 (1997).
- [26] 石原 亨：ソフトウェアに対する電力見積りと電力削減技術，電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol.2, No.3, pp.38–44 (2009).
- [27] 3GPP TR 101.112 ver.3.2.0: Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS (1998).
- [28] Krnic, J. and Krco, S.: Impact of WSN Applications' Generated Traffic on WCDMA Access Networks, *IEEE PIMRC*, pp.1–5 (2008).
- [29] 3GPP TR 25.848 ver.4.0.0: Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access (2001).
- [30] Want, R.: When Cell Phones become Computers, *Pervasive*, Vol.8, pp.2–5 (2009).





山本 享弘 (学生会員)

平成 10 年京都大学工学部電気工学第二学科卒業。平成 12 年同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 (株) エヌ・ティ・ティ・ドコモ入社。平成 17 年 (株) コア入社。組み込みソフトウェアの研究開発に従事。現在、東大先端科学技術研究センター博士課程に在籍。電子情報通信学会会員。



猿渡 俊介 (正会員)

平成 19 年東京大学大学院博士課程修了。平成 15~16 年 IPA 未踏ソフトウェア創造事業。平成 18~20 年日本学術振興会学振特別研究員。平成 19~20 年イリノイ大学客員研究員。現在、東京大学先端科学技術研究センター助教。専門はワイヤレスネットワーク、センサネットワーク、システムソフトウェア等。平成 21 年電子情報通信学会論文賞。平成 22 年情報処理学会山下記念研究賞。電子情報通信学会、IEEE、ACM 各会員。



南 正輝 (正会員)

平成 8 年芝浦工業大学工学部電子工学科卒業。平成 10 年同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。平成 13 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。工学博士。平成 18 年スイス・ローザンヌ連邦工科大学客員研究員。平成 15~19 年芝浦工業大学工学部講師。平成 20~22 年東京大学先端技術研究センター准教授。平成 23 年より芝浦工業大学工学部准教授。



森川 博之 (正会員)

昭和 62 年東京大学工学部電子工学科卒業。平成 4 年同大学大学院博士課程修了。現在、同大学先端科学技術研究センター教授。工学博士。平成 9~10 年コロンビア大学客員研究員。平成 14~18 年情報通信研究機構モバイルネットワークグループリーダー兼務。ユビキタスネットワーク、無線ネットワーク、モバイルコンピューティング、フォトニックインターネット等の研究に従事。本会論文賞、電子情報通信学会論文賞 (3 回)、ドコモモバイルサイエンス賞、志田林三郎賞、情報通信功績賞等受賞。電子情報通信学会フェロー、IEEE、ACM、ISOC、映像情報メディア学会各会員。