Vol.2010-UBI-27 No.20
2010/7/16

Participatory Sensingにおける低消費電力なセンサデータアップロードエンジン

山 本 享 弘[†1,†2] 猿 渡 俊 介[†1] 森 川 博 之[†1]

広範囲に渡る実空間情報を収集する方法として，携帯電話を利用した Participatory Sensing の手法が注目されている．携帯電話では，定期的なセンシング・データ転送が消費電力上の問題となる．本稿では，ユーザが携帯電話を操作している際に次の操作について考えをめぐらせている時間 (User Think Time) の存在に着目し，User Think Time 中にセンサデータを低消費電力にアップロードする PBTP(Piggyback Transport Protocol) について述べる．PBTP では，User Think Time 中の携帯電話が基地局に接続しているにも関わらず通信していない Inactivity Timer 期間にセンサデータをアップロードし，ユーザの通信が発生したりアプリケーションが終了したりした場合にはアップロードを停止する．本稿では，実機を用いて取得した消費電力を基にして行ったシミュレーションにより，PBTP の省電力効果を示す．

Energy Efficient Data Upload Engine for Participatory Sensing

Takahiro Yamamoto,[†1,†2] Shunsuke Saruwatari[†1] and Hiroyuki Morikawa[†1]

Participatory Sensing enables us to build a large platform for wide-area sensing by utilizing cellphones as sensor nodes. One of the main problems in the participatory sensing is power consumption on a cellphone because of its battery. In this paper, we propose a low power data transport protocol, which is called as Piggyback Transport Protocol (PBTP). The PBTP utilizes user think time to upload sensor data. In the user think time, a user watches the display and thinks about what should he/she do next. The PBTP uploads sensor data in the inactivity timer period on the user think time, and the inactivity timer period represents the cellphone has connection to a base station, but does not communicate to the base station. The paper evaluates the PBTP with simulation, and the result shows PBTP reduces power consumption compared to the previous work.

1. はじめに

センサネットワークは実空間情報の取得を可能とする技術で，これまで数多くの研究が行われてきた．センサネットワークを用いて都市や自然環境などを広範囲にモニタリングすることを考えた場合，設置コストや運用負荷が大きいことが問題となる[1)]．このような広範囲でのモニタリングにおける問題を解決する手法として，GPS やカメラ，マイク，加速度センサ，地磁気センサなど，各種センサの搭載が進む携帯電話を利用した，Participatory Sensing[2)] や People-Centric Sensing[3)] と呼ばれるユーザ参加型の手法が注目されている．Participatory Sensing では，ユーザの携帯電話を用いて定期的に周囲の状況をセンシングし，携帯電話網を介して情報を収集する．既に，大気モニタリング[4)5)] や騒音モニタリング[6)7)]，道路モニタリング[8)]，ユーザ行動履歴収集[9)]，ソーシャルネットワークでの利用[10)11)] 等の分野で研究が進められている．

Participatory Sensing は，バッテリ駆動である携帯電話を用いることを前提としているため，消費電力の削減が課題となる．これまでセンサネットワークや Participatory Sensing の分野では，単一のセンシングアプリケーションにおいてデバイスの駆動時間を最小化することで消費電力を削減してきた[12)]．しかしながら，Participatory Sensing では多様なアプリケーションが存在するため，さまざまなセンサに対応可能な通信プロトコルレベルでの低消費電力化を実現する必要がある．

また，携帯電話では，通信終了後にある一定の期間，接続を維持することで，連続通信時における送信遅延の削減を実現している．ある一定の期間，何も通信が行われなければ Inactivity Timer が発火し，接続を切る[13),14)]．本稿では，通信が終了してから Inactivity Timer が発火するまでの期間を Inactivity Timer 期間と呼ぶ．携帯電話では，複数の通信リクエストがそれぞれ個別に Inactivity Timer 期間を生じさせることにより，電力消費が増えてしまうという問題が発生する．このような問題に対し，複数の通信リクエストをバッファリングしてまとめて送信することで，Inactivity Timer 期間を短縮する TailEnder[15)] が提案されている．しかしながら，TailEnder を単純に Participatory Sensing に適用した

†1 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
†2 株式会社コア　総合研究所
CORE Research and Development Institute

場合，ユーザリクエストとセンサデータのアップロードが重複することでユーザリクエストのスループット低下で操作性が損なわれるという問題が発生する．

そこで本稿では，携帯電話におけるユーザが次の操作について考えをめぐらせている時間 (User Think Time) の存在に着目し，User Think Time 中の Inactivity Timer 期間を利用してセンサデータのアップロードを行う PBTP(Piggyback Transport Protocol) を提案する．PBTP によれば，無線通信モジュールの利用効率が向上し，結果として消費電力が削減できる．まず，PBTP では，定期的に発生するセンサデータをバッファリングする．ユーザが携帯電話の操作を行い，ウェブ閲覧などのユーザリクエストが発生した場合に無線通信モジュールの空き時間を利用してセンサデータをアップロードする．ユーザリクエストの発生・ユーザによる操作の終了を検出した場合には，センサデータのアップロードを停止する．

本稿の貢献は以下の 3 点である．1 つ目は携帯電話における User Think Time 中の Inactivity Timer 期間を利用してセンサデータをアップロードすることで，通信での消費電力を削減できることを示した点である．2 つ目は実際のスマートフォンを用いた測定結果と通信の状態遷移に基づき，接続状態・非接続状態からデータを転送をした場合の電力消費をモデル化した点である．3 つ目は PBTP が既存の TailEnder に比べて省電力性に優れることをシミュレーションにより示した点である．

本稿では，2. で Participatory Sensing に関連する低消費電力化技術の先行研究を調査し，本研究の位置づけを明確にする．次いで 3. で，Participatory Sensing において低消費電力にセンサデータをアップロードするデータ転送プロトコル PBTP について述べる．さらに，4. で携帯電話におけるデータ転送に伴う電力消費のモデル化を行い，シミュレーションにより PBTP の省電力効果を示す．最後に 5. でまとめとする．

2. Participatory Sensing

Participatory Sensing は，センサノードの機能を携帯電話上に構築し，端末が定期的にセンシング，アップロードすることによって，大規模なデータ収集を実現する[2),5)–11)]．例えば，Maisonneuve らの研究[6)] では，携帯電話のマイクを用いて，騒音情報などを収集している．このような Participatory Sensing を実現するためには，携帯電話がバッテリ駆動であるという制約があるため，センシング・アップロードのための新たな省電力技術が必要となる．Participatory Sensing を低消費電力に実現するためには，多様なセンサに対応できること，既存の携帯電話上で実現可能であること，ユーザの通信に影響を与えないことの 3 つの要件を満たしたデータ転送プロトコルが求められる．

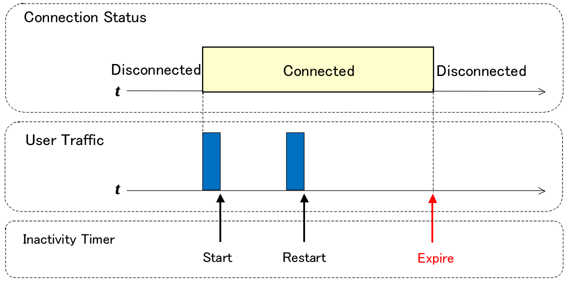

図 1 携帯電話の通信時の動作

Participatory Sensing における低消費電力化に向けた研究としては，Wang らの研究[16)] や Musolesi らの研究[17)] が挙げられる．これらの研究では，センサから得られた情報を用いてアプリケーションに応じてセンシングやアップロードの手法を最適化することで低消費電力化を実現している．例えば，Wang らの研究[16)] ではコンテキスト推定により必要なセンサのみ駆動することで，センシング時の消費電力を削減している．Musolesi らの研究[17)] では，アプリケーションに応じてコンテキスト推定処理を携帯電話とサーバで切り分けることで低消費電力化を実現している．しかしながら，これらの手法はアプリケーションに強く依存しているため，これらの研究で想定しているセンサの種類と異なるセンサを対象とした Participatory Sensing には適用することができない．センサの種類に非依存に低消費電力化を実現するためには，通信プロトコルレベルでの低消費電力化を考える必要がある．

無線通信の低消費電力化を実現する通信プロトコルとしては，センサネットワークや無線 LAN を対象として多くの研究がなされてきた[12),18)–20)]．これらの研究では，無線の MAC 層において無線通信モジュールの ON-OFF を操作することで低消費電力化を実現している．例えば Krashinsky らの研究[19)] では，ウェブのトラヒック特性に応じて，IEEE 802.11 の PSM(Power-Saving Mode) のポーリング間隔を段階的に増加させることによって低遅延性と低消費電力性を実現している．しかしながら，これらの手法は MAC 層が通信キャリアによって厳密に決められている携帯電話には応用することができない．

既存の携帯電話上で通信による消費電力を削減する研究としては，Balasubramanian らの研究[15)] や Nurminen らの研究[21)] が挙げられる．携帯電話では，実際の通信を行っている時間だけでなく，基地局と接続を維持している時間にも電力を消費する．図 1 に携帯電話における通信時の動作を示す．携帯電話では，通信終了後にある一定の期間，基地局との接

続を維持することで，連続通信時における送信遅延を削減する．ある一定の期間，何も通信が行われなければ Inactivity Timer が発火し，接続を切断する[13,14]．通信が終了してから Inactivity Timer が発火するまでの時間を，本稿では Inactivity Timer 期間と呼ぶ．散発的な通信が発生した場合，Inactivity Timer 期間が増加することによる消費電力増大という問題が発生する．

このような問題に対し，Balasubramanian らの TailEnder[15] では，複数の通信要求をバッファリングして 1 つにまとめることで，Inactivity Timer 期間[13,14] を短縮する．しかしながら，TailEnder を Participatory Sensing に適用した場合，センサデータのアップロードの存在によりユーザリクエストのスループットが低下するため，ウェブの閲覧時などの操作性が悪くなるという問題が発生する．一方で，Nurminen らの研究[21] では，ユーザの通話に相乗りする形でデータを送信することで，データ通信に伴う消費電力を削減している．しかしながら，通話回数は平成 20 年度で平均 1.4(回/日) で減少傾向にあるため[22]，ユーザの通話期間を利用した手法のみで削減できる消費電力量は限定的であると考える．

3. Piggyback Transport Protocol

2. で述べた Participatory Sensing の消費電力の問題に対し，本稿では，ユーザがウェブの閲覧などの携帯電話を操作した際に発生するデータ通信に相乗りすることで低消費電力化を図る．具体的には，ユーザの操作の合間に接続が維持されているにも関わらずデータ通信を行っていない Inactivity Timer 期間が存在することに着目し，センサデータを低消費電力にアップロードするデータ転送プロトコル PBTP(Piggyback Transport Protocol) を実現する．

3.1 携帯電話における通信時の消費電力

携帯電話では，通信時に Uplink チャネルの割り当てを行い，非通信時は着信確認のための間欠受信 (DRX: Discontinuous Reception) のみ行う．この間欠受信により無線通信モジュールの起動時間を短縮し，電力消費を抑制している．

通信状態に応じた無線通信モジュールの状態の切り替えは，基地局と端末間の RRC(Radio Resource Control) プロトコルに従って，図 2 の状態遷移を行う[13,23]．図の CELL_DCH(Dedicated Channel) は専用の Uplink チャネルが割り当てられている状態，CELL_FACH(Forward Access Channel) は共用の Uplink チャネルが割り当てられている状態，CELL_PCH(Paging Channel) は Uplink チャネルを持たず間欠受信のみ行う状態，Idle は RRC コネクションが確立されていない状態である．本稿では CELL_DCH

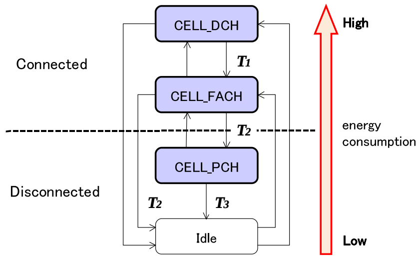

図 2 携帯電話における RRC(Radio Resource Ctontrol) 状態遷移

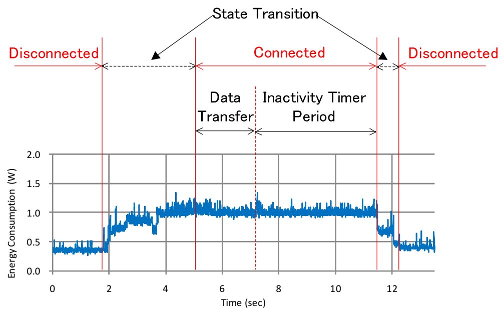

図 3 10KB 転送時の電力波形

と CELL_FACH の状態をまとめて接続状態 (connected) と，CELL_PCH と Idle を非接続状態 (disconnected) と表す．これらの RRC における状態は，端末からのデータ転送量と Inactivity Timer を基に制御される．RRC におけるサポートする状態数，Inactivity Timer が発火するまでの時間 T_1，T_2，T_3 は実装によって異なる．例えば，Haverinen らの研究[23] では Inactivity Timer が発火するまでの時間を，T_1 が 8〜32bps で 5 秒，64bps で 3 秒，128bps 以上で 2 秒，T_2 が 2 秒，T_3 が数分〜数十分としている．

本稿では Inactivity Timer が駆動している時間を Inactivity Timer 期間と呼ぶ．図 3 に実際の携帯電話を用いて計測した 10KB 送信時の電力波形を示す．計測では，ハードウェア構成が商用の T-Mobile G1 と同等の Android Dev Phone 1[24] を使用し，端末とバッテリ間に挿入したシャント抵抗の電圧を DL750[25] で測定した．RRC プロトコルにおいて発生する電力には，センサデータをアップロードする際のデータ送信に必要な電力以外に，Uplink チャネルの割り当てと Inactivity Timer 期間によって消費される電力が含まれている．非接続状態からデータ転送したときの消費電力の増分を測定したところ，全通信での消費電力量が 6.22(J) であるのに対し，オーバーヘッドによる消費電力は 4.40(J) であった．Participatory Sensing においてセンシングを行う度にアップロードを行う場合には，全通信に使用する消費電力に対してオーバヘッドが占める割合が大きいことが確認された．

Inactivity Timer 期間の検出は，ソケット API を書き換えることで実装できる．例えば，Android Dev Phone 1 では Linux のソケット API において，`connect()`，`accept()` の呼び出しや，送受信しているパケット数を監視することで回線の状態を把握することができる．

3.2 User Think Time の検出

Crovella らの研究[26] では，ユーザが PC を操作する際にユーザが画面を見るなどの考え

Vol.2010-UBI-27 No.20
2010/7/16

ごとをしている時間である User Think Time の存在が確認されている．図 4 にユーザが PC を操作している際の通信状態を示す．図 4 から分かるように，連続するユーザ操作中であっても通信が行われている期間と行われていない期間が存在する[26]．携帯電話でも，ウェブを閲覧しているときには PC と同様の User Think Time が存在することが予想される．

ウェブを閲覧している場合は，User Think Time では Inactivity Timer の存在により，接続が維持されているにも関わらず通信を行っていない期間が存在する．図 5 に 128byte の送信のみと，連続して 10KB の転送を行った場合の電力波形を示す．図 5 から分かるように，2 つの波形には大きな差が無く，デバイスの空き時間中も転送時と同等の電力を消費していることが分かる．すなわち，User Think Time 中の Inactivity Timer 期間を利用することで，わずかな消費電力の増加でセンサデータのアップロードが可能となる

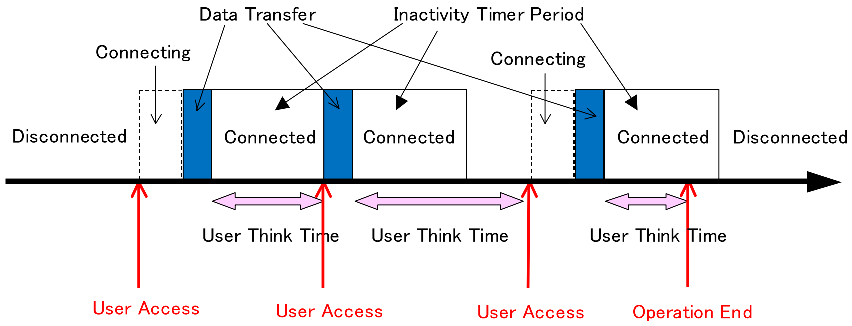

図 4 ユーザ操作アプリケーションにおけるトラヒック特性

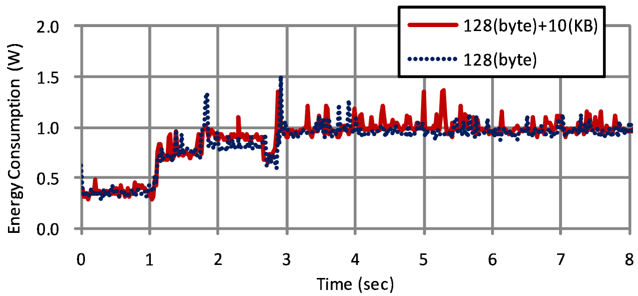

図 5 単一送信時と連続送信時の電力波形の違い

```
q: the number of sensor data to be transmitted
s: the state of user communication
D: the deadline of transmission
while (true)
  wait (q > 0)
  repeat
    switch (s)
      case "ON": stop upload
      case "OFF": upload data
      case "SLEEP":
        if (t < D) stop upload
        else upload data
  until q == 0
```

図 6 PBTP アルゴリズム

表 1 Android Dev Phone 1 における消費電力モデルパラメータ

parameter	value
e_{init}	1.295 (J)
c_0	0.025 (J)
c_1	0.134 (sec)
W_{send}	0.808 (W)
W_{on}	0.618 (W)
$T_{inactive}$	4.686 (sec)
R	5.123 (KB/sec)
e_{final}	0.302 (J)

User Think Time の検出には，ユーザが端末を操作しているかどうかの情報と，Inactivity Timer 期間の情報を組み合わせて抽出する．ユーザが端末を操作しているかどうかの情報は，実行中のアプリケーションの情報を監視したり，バックライトの情報を利用することで抽出できる．例えば，Android Dev Phone 1 では，アプリケーションフレームワークの機能である ActivityManager の `getRunningTasks()` を使って実行中アプリケーションの変更を監視したり，PowerManager の `isScreenOn()` を使ったスクリーンの ON-OFF を検出したりすることで実装できる．Inactivity Timer 期間の検出には 3.1 の手法を用いる．

3.3 PBTP の動作

Piggyback Transport Protocol(以下 PBTP) では，Inactivity Timer 期間と User Think Time の情報を利用することで低消費電力にセンサデータのアップロードを行う．

図 6 に PBTP のアルゴリズムを示す．PBTP では，ON，OFF，SLEEP の状態を変数 s として持つ．ON はユーザによる通信リクエストが処理されている状態，OFF はユーザによる通信リクエストは処理されていない Inactivity Timer 期間の状態，SLEEP はユーザの通信アプリケーション操作が終了した状態を意味する．状態 s に応じて転送動作を切り替えることで消費電力を削減する．変数 q は PBTP のキューに入って送信待ちになっているセンサデータの数を表す．

まず，センサデータが発生すると，ユーザによる通信リクエストの発生を待ち受ける．ユーザによる通信リクエストが発生すると，状態 s は ON に遷移する．ユーザの通信が完了すると，状態が OFF に遷移し，センサデータのアップロードを開始する．再びユーザによる

Vol.2010-UBI-27 No.20
2010/7/16

通信リクエストが発生すると状態 s は ON に遷移し，センサデータのアップロードを停止する．この動作を $q=0$ になるまで繰り返す．ユーザの操作終了のイベントを検出すると，状態 s は SLEEP に遷移し，センサデータのアップロードを停止する．

また，User Think Time を利用してセンサデータをアップロードした場合，User Think Time が長期間発生しなければセンサデータが届くまでの遅延が増加するという問題が発生する．このような問題に対し，PBTP では送信期限 D を持たせることで，アプリケーションに応じて遅延時間を調整する．ユーザによる通信操作が行われず，現在の時刻 t が $t>D$ となった場合は，回線接続を行って全てのデータをアップロードする．

4. 評　価

4.1 携帯電話における通信時の消費電力のモデル化

PBTP による省電力効果を評価するに当たって，本節では携帯電話における通信時の消費電力のモデル化を行う．消費電力のモデル化は線形式を用いる．

アップロード 1 回当たりの消費電力は，データ通信の初期化に必要な消費電力量 e_{init}，データ通信時の消費電力量 $e_{send}(x)$，Inactivity Timer 期間の消費電力量 $e_{inactive}$，終了処理の消費電力量 e_{final} によって

$$e(x) = e_{init} + e_{send}(x) + e_{inactive} + e_{final}$$

と表すことができる．x は通信を行うデータサイズである．Inactivity Timer 期間 $T_{inactive}$ は転送データサイズに依存せず，ほぼ一定とみなせる．つまり，$e_{inactive}$ は無線通信モジュールが ON の時の消費電力を W_{on} として

$$e_{inactive} = W_{on} T_{inactive} \tag{1}$$

となる．また $e_{send}(x)$ は，無線通信モジュールが送信状態であることによる電力 W_{send} と，サイズ x のデータ送信に要する電力から構成されると考えられ，

$$e_{send}(x) = W_{send}(\frac{x}{R} + c_1) + c_0$$

と表すことができる．ここで R はデータ伝送レート，c_0 は送信プロセスにかかるオーバヘッド，c_1 はプリアンブルなどのフレームレベルでのオーバヘッドである．以上より，非接続状態からデータを送信する時の消費電力 $e_{disconnect}(x)$ は，

$$e_{disconnect}(x) = e_{init} + W_{send}(\frac{x}{R} + c_1) + c_0 + W_{on} T_{inactive} + e_{final} \tag{2}$$

となる．

一方で，接続状態からのデータ送信時の電力 $e_{connect}(x)$ は，チャネル割り当てを行う起動処理，Inactivity Timer 期間，チャネル解放を行う終了処理によるオーバーヘッドが発生しないため，

$$e_{connect}(x) = (W_{send} - W_{on})(\frac{x}{R} + c_1) + c_0 + W_{on} t \tag{3}$$

となる．t は，User Think Time の長さ T_{think}，Inactivity Timer 期間 $T_{inactive}$，データを送信している時間 $\frac{x}{R} + c_1$ の関係によって次のように変化する．

$$t = \begin{cases} 0 & T_{think} < T_{inactive} \quad (4) \\ T_{think} - T_{inactive} & T_{inactive} \le T_{think} < T_{inactive} + \frac{x}{R} + c_1 \quad (5) \\ \frac{x}{R} + c_1 & T_{inactive} + \frac{x}{R} + c_1 \le T_{think} \quad (6) \end{cases}$$

TailEnder では蓄積されたユーザリクエストを回線接続時にすべて送信するため，アップロードによって生じる電力が式 (4)，式 (5)，式 (6) のように送信データサイズ x と送信タイミングによって大きく変化する．例えば，一度に送る送信データサイズ x が非常に大きい場合には，式 (5)，式 (6) のように，消費電力が送信データサイズに比例して増加する．それに対して，PBTP では，User Think Time 内で送信するように送信データサイズや送信タイミングを調整することで，式 (4) の時間を増やす工夫を実現している．

測定によって得られた Android Dev Phone 1 の各電力パラメータを表 1 に示す．回線接続時のオーバーヘッドとなる e_{init}，$e_{inactive}$，e_{final} は，それぞれ 1.295(J)，2.896(J)，0.302(J) であった．また，無線通信モジュールが ON である時間が増えることによる消費電力への影響を表現する c_0，c_1，W_{send}，W_{on}，R はそれぞれ 0.025(J)，0.134(sec)，0.808(W)，0.618(W)，5.123(KB/sec) であった．

4.2 シミュレーション評価

Participatory Sensing において転送するセンサデータサイズはテキスト・画像など収集するデータ種別によって異なり，発生頻度もアプリケーションによって変化する．またユーザの回線接続頻度，回線接続中のユーザのアクセス回数，User Think Time は，ユーザの通信パターンによっても異なる．本節では 4.1. で作成したモデル式を使用し，異なるセンサデータ環境，ユーザ通信パターンにおける PBTP の省電力効果を，シミュレーションによって評価する．

シミュレーションに当たっては，ユーザの通信パターン，センサデータの収集環境を以下のようにモデル化した．ユーザの通信パターンを表現するパラメータとして，回線接続の発生頻度 r_{access}(回/日)，1 回の接続中のユーザ通信回数 n_{access}(回)，User Think Time

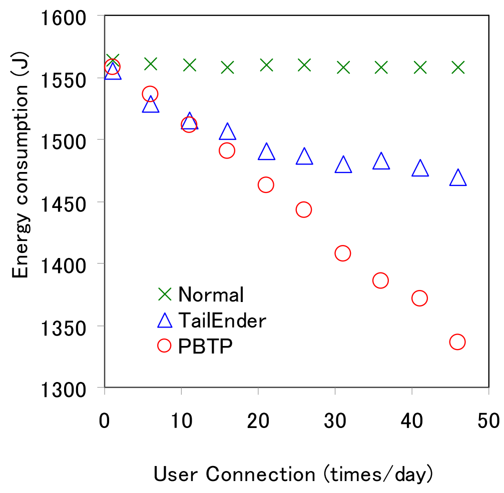

図 7 センサデータのサイズが 100KB の時のユーザの通信回数と消費電力の関係 ($x_{sensor} = 100$)

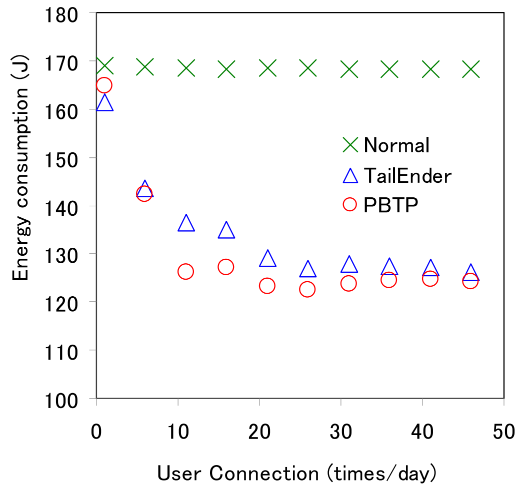

図 8 センサデータのサイズが 10KB の時のユーザ通信回数と消費電力の関係 ($x_{sensor} = 10$)

を t_{think}(sec) を定義した．回線接続の発生頻度 r_{access} はポアソン過程，User Think Time の t_{think}，回線接続中のユーザ通信回数 n_{access} はパレート分布[27] に従うとした．収集するセンサデータは，発生頻度が r_{sensor}(回/日) のポアソン過程に従い，センサデータのサイズ x_{sensor}(KB) は固定とした．PBTP におけるユーザ操作終了イベントの検出時間のオーバヘッドを t_{detect} (sec) とし，省電力効果に与える影響を評価した．既存方式との比較は，非接続状態から 1 日 1 回転送を行った場合，TailEnder の 2 つと消費電力の比較を行った．TailEnder では，データの発生した時刻が，最後に転送を行った時刻から $\rho T_{inactive}$ 以下であった場合に，バッファリングせずに即送信する．本シミュレーションでは ρ を最も消費電力の少ない 0 とした．PBTP，TailEnder における送信期限 D は 1(日)，消費電力モデルにおけるパラメータは Android Dev Phone 1 を前提として表 1 の値を使用した．

図 7 にセンサデータのサイズが 100KB の時 ($x_{sensor} = 100$) のユーザの回線接続の発生頻度と消費電力の関係を示す．図 7 から分かるように，ユーザの回線接続の発生頻度が大きくなるにしたがって，ユーザのデータ通信に相乗りできる確率が高まるため，センサデータのアップロードに要する電力消費が小さくなる．TailEnder でもユーザの回線接続の発生頻度に応じて消費電力が下がるものの，提案手法である PBTP よりは省電力効果は小さい．

図 8 にセンサデータのサイズが 10KB の時 ($x_{sensor} = 10$) のユーザの回線接続の発生頻度と消費電力の関係を示す．$x_{sensor} = 100$ の時に比べると改善の度合いは小さいものの，ユーザの回線接続の発生頻度に応じてデータ通信に要する消費電力が下がる．図 8 において，後半にユーザの回線接続の発生頻度が増加しても消費電力の改善が小さくなるのは，発生するデータサイズに対してユーザのアクセスが十分に多いことに起因する．また，ユーザの回線接続が極端に小さいとき ($r_{access} = 1$) に TailEnder の方が PBTP よりも低い消費電力でセンサデータがアップロードできる．これは PBTP では複数の回線接続に分けてセンサデータをアップロードしようと試みるため，極端にユーザの回線接続数が小さい場合にはユーザの回線接続とは個別に送信期限 D が切れることによる回線接続が余分に発生することに起因する．

センサデータのサイズがさらに小さくなると，PBTP と TailEnder の差はより小さくなる (図 9)．図 9 で，ユーザの回線接続数が多い領域において，消費電力が増加するのは式 (2) や式 (3) の送信処理に伴うオーバヘッド c_0 の消費電力がデータ転送に要する消費電力よりも支配的になることに起因する．

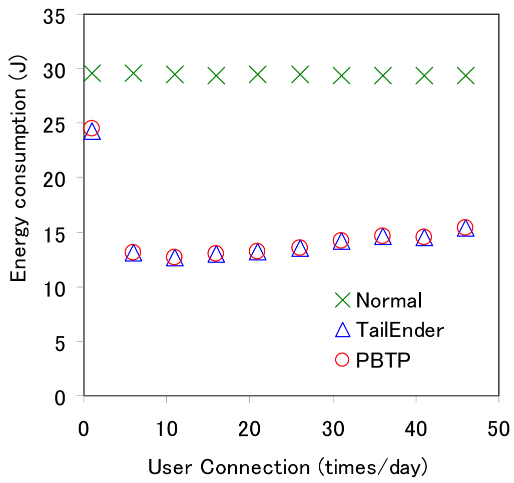

図 9 センサデータサイズが 1KB の時のユーザ通信回数と消費電力の関係 ($x_{sensor} = 1$)

以上の結果より，PBTP は特にデータ量が多く，ユーザの回線接続数が多い場合により低消費電力であることが分かる．Participatory Sensing では，データ量が多く，ユーザが多く端末を使用するときにこそ低消費電力性が重要になるため，PBTP は Participatory Sensing に有効であることが示された．

5. おわりに

本稿では，携帯電話を使ってセンサデータを収集する Participatory Sensing における，低消費電力化プロトコル Piggyback Transport Protocol(PBTP) について述べた．PBTP によれば，既存の TailEnder に比べて低消費電力にセンサデータをアップロードすることができる．現在，実機上での実装・評価を進めている．

参考文献

1) Campbell, A.T., Eisenman, S.B., Lane, N.D., Miluzzo, E. and Peterson, R.A.: People-Centric Urban Sensing, *WICON, ACM*, Vol.220, No.18 (2006).
2) Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., Parker, A., Ramanathan, N., Reddy, S. and Srivastava, M.B.: Participatory sensing, *SENSYS, ACM* (2006).
3) Campbell, A.T., Eisenman, S.B., Lane, N.D., Miluzzo, E., Peterson, R.A., Lu, H., Zheng, X., Musolesi, M., Fodor, K. and Ahn, G.: The Rise of People-Centric Sensing, *Internet Computing, IEEE*, Vol.12, No.4 (2008).
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, *MobiSys, ACM*, pp. 55–68 (2009).
5) Paulos, E., Honicky, R. and Goodman, E.: Sensing atmosphere, *SenSys, ACM* (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., Choudhury, T. and Campbell, A.: SoundSense: scalable sound sensing for people-centric applications on mobile phones, *MobiSys, ACM*, pp. 165–178 (2009).
8) Mohan, P., Padmanabhan, V.N. and Ramjee, R.: Nericell: Rich Monitoring of Road and Traffic Conditions using Mobile Smartphones, *SenSys, ACM*, pp.165–178 (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, *SenSys, ACM*, pp.87–101 (2007).
10) 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, *SenSys, ACM*, pp.337–350 (2008).
11) 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).
12) 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).
13) Yeh, J.H., Chen, J.C. and Lee, C.C.: Comparative analysis of energy-saving techniques in 3gpp and 3gp2 systems, *Vehicular Technology, IEEE*, Vol.58, No.1, pp. 432–448 (2009).
14) Yang, S.R. and Lin, Y.B.: Modeling UMTS discontinuous reception mechanism, *Wireless Communications, IEEE*, Vol.4, No.1, pp.312–319 (2005).
15) Balasubramanian, N., Balasubramanian, A. and Venkataramani, A.: Energy Con-

Vol.2010-UBI-27 No.20
2010/7/16

sumption in Mobile Phones: A Measurement Study and Implications for Network Applications, *SIGCOMM, ACM*, pp.280–293 (2009).
16) Wang, Y., Lin, J., Annavaram, M., Jacobson, Q.A., Hong, J., Krishnamachari, B. and Sadeh, N.: A Framework of Energy Efficient Mobile Sensing for Automatic User State Recognition, *MobiSys, ACM*, pp.179–192 (2009).
17) 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).
18) Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D.: An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks, *INFOCOM, IEEE* (2002).
19) Krashinsky, R. and Balakrishnan, H.: Minimizing Energy for Wireless Web Access with Bounded Slowdown, *Wireless Networks*, Vol.11, No.1-2, pp.135–148 (2005).
20) Anastasi, G., Conti, M., Gregori, E. and Passarella, A.: 802.11 Powersaving Mode for Mobile Computing in Wi-Fi Hotspots: Limitations, Enhancements and Open Issues, *Wireless Networks*, Vol.14, No.6, pp.745–768 (2008).
21) Nurminen, J.K. and Noyranen, J.: Parallel Data Transfer with Voice Calls for Energy-Efficient Mobile Services, *Mobilware* (2009).
22) 総務省：トラヒックからみた我が国の通信利用状況 (2008 年度).
23) Haverinen, H., Siren, J. and Eronen, P.: Energy Consumption of Always-On Applications in WCDMA Networks, *VTC, IEEE*, pp.964 – 968 (2007).
24) *http://developer.htc.com/adp.html*.
25) *http://tmi.yokogawa.com/products/oscilloscopes/scopecorders-oscillographic-recorders/dl750dl750p-scopecorder/*.
26) Crovella, M. and Bestavros, A.: Self-similarity in world wide web traffic: evidence and possible causes, *Networking, IEEE*, Vol.5, No.6, pp.835–846 (1997).
27) Barford, P. and Crovella, M.: Generating representative web workloads for network and server performance evaluation, *SIGMETRICS, ACM*, pp.151–160 (1998).