

ユビキタス環境DBにおける 無線センサノード低消費電力化手法の実験的検証

山田 佑樹[†] 富井 尚志^{††}

[†] 横浜国立大学大学院環境情報学府情報メディア環境学専攻 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

^{††} 横浜国立大学大学院環境情報学研究院 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

E-mail: †{d09hc044,tommy}@ynu.ac.jp

あらまし ユビキタス環境では利用者への負荷の軽減から、必然的に無線センサが使われると考えられる。しかし、無線センサはバッテリーを用いており、持続時間に制限がある。このとき、センサの読み取り間隔を長く取ると、持続時間を延ばすことができるが、検知できないデータが出てくる可能性がある。このように、バッテリーの持続時間とデータの検知にはトレードオフの関係が存在する。本論文では、無線センサの読み取りを必要な状況でのみ行い、データを落とさずに持続時間を延ばす手法を提案する。提案手法として、空間の「こうであるべき」や「こうであるつもり」の情報があらかじめ定義されているDBを用いる。このDBに問い合わせを行うことにより無線センサを有効に使用できると考えられる。また、加速度センサを用いて、利用者が動いたときのみ無線センサで読み取る手法、DBと加速度センサを組み合わせた手法を提案する。これらの手法を実装し、実験によりデータの取りこぼしとバッテリーの持続時間の観点からこれらの提案手法の有効性を示した。

キーワード ユビキタス環境 DB, 無線センサ, 消費電力

An Experimental Evaluation of Power Saving Method for Wireless Sensor Nodes in Ubiquitous Environment Managed by DB

Yuki YAMADA[†] and Takashi TOMII^{††}

[†] Department of Information Media and Environment Sciences, Research Institute of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

^{††} Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University
79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501 Japan

E-mail: †{d09hc044,tommy}@ynu.ac.jp

Abstract In ubiquitous environments, wireless-sensors will be essential devices. However, life time of a wireless-sensor is limited by capacity of an equipped battery. For extending the life time of the wireless-sensors, extending the polling interval is effective. However, if the polling interval is longer, the number of failure of sensing is higher. There is such a trade-off problem between the life time of the wireless-sensors and the number of failure of sensing. In this paper, we propose three methods make life time longer without failure of sensing by which the sensors work only when sensing data is needed. First method makes the polling interval short when a user's acceleration sensor moves. Second method uses DB which has location where user can get important data. Last method combines the first concept and the second. We implemented these three methods and evaluated the effectiveness of them by experiments.

Key words Ubiquitous Environment Database, Wireless-sensor, Consumption

1. はじめに

ユビキタス環境の実現手法の1つとしてあらゆる物体にICタグが貼り付けられた電子タグ付き空間が考えられる[1]。電子タグ付き空間をセンサ(ICタグリーダ)を所持した利用者が移動することによりICタグを読み取り、そのICタグに関連付けられている物体が「何(what)」であり「どこ(where)」で検知

されたか等の環境情報をデータベース化して管理する。これにより、医療事故予防や高齢者支援、工場の生産管理、物体の位置、利用者の行動履歴の検索等のアプリケーションへの適用が可能となる。電子タグ付き空間の実現手法の1つとして我々は概念共有環境 CONSENT を提案してきた[2]。電子タグ付き空間のアプリケーションには、どうしても取得したい環境情報が存在する。すなわち、取得される環境情報に重要性の差がある。

医療事故予防であれば薬の投与や診察の記録，高齢者支援であれば薬の使用履歴や生活サイクルがそれに該当する．これらのことを手間をかけずに記録したい．概念共有環境 CONSENT では環境内の「こうであるべき」や「こうであるつもり」の情報があらかじめ明にデータベースに定義されている．この情報を本稿では概念的な操作状態と呼ぶ．この概念的な操作状態は環境内のメンバーで共有し，その概念的な操作状態に基づいて行われた行動のログを行動認識を用いて収集する [3]．これにより，コミュニティの改善や作業の効率的な分担，行動の履歴の検索が可能となる．

一方で，センサを身に付ける場合，利用者に負担をかけない，場所に縛られないといった理由から必然的に無線センサが使われると考えられる．無線センサはバッテリーを使用しているため，バッテリーの持続時間に限りがある．このとき，センサを休ませることによって消費電力は抑えられ，バッテリーの持続時間を延ばすことができる．しかし，センサを休ませると，IC タグが貼り付けられた物体の存在の検知（「何が (what)」，「どこで (where)」を示す．以下，ログデータと呼ぶ．）の取りこぼしが多くなる．このように，バッテリーの持続時間とログデータの取りこぼしの間にはトレードオフの関係がある．本研究の目的はこのトレードオフに対して，バッテリーの持続時間を延ばしながらログデータの取りこぼしを抑えることとする．

本研究では RFID リーダを対象として，センサのポーリング間隔を動的に制御することによってバッテリーの持続時間を延長させる手法を提案する．このとき，バッテリーの持続時間とセンサのポーリング間隔には密接な関係がある．ポーリング間隔を長く取ると，センサの読み取り回数を減らすことができるため消費電力が抑えられ，持続時間を延ばすことができる．しかし，消費電力が抑えられた分に対して取得できないログデータが出てくる可能性がある．一方，取得できるログデータの重要性は全て均一ではなく，状況によって異なる．このため，中には取りこぼしを最小限に抑えたいログデータが存在する．本研究の提案手法として概念的な操作状態があらかじめ定義されたデータベース (DB) を用いることを考えた．この DB に問い合わせることにより動的にセンサのポーリング間隔を変化させる．そうすることで，センサを必要とすべきのみ動かしバッテリーの持続時間を延ばそうと考えた．

そこで，データの重要性の差をデータベースから求める．重要な行動が行われる場所ではポーリング間隔を短くし，行われない場所では長くすることによりバッテリーの持続時間を延ばす．本研究では，この手法を基に，先行研究の「概念共有環境 CONSENT」[2] 上に構築し，実験的検証を行った．

2. 関連研究

2.1 センサの低消費電力化

環境内に存在するセンサは利用者への負担の少なさや，設置の容易さから無線が多く使われている．Maurer らは加速度センサなどを搭載した eWatch [4] と呼ばれる手軽に着用できる腕時計型センサノードを開発し，利用者の行動や場所を認識する手法を提案している．Merrill らは，身体装着型の小型赤外線センサによって利用者の注視点を取得し，利用者の興味に応じて情報を提供するアプリケーションを実装し，検証した [5]．MobiTra [6] では，物品に取り付けられた RFID タグと，それを検知する携帯可能な RFID リーダ，RFID リーダの位置を検出する位置検出環境によって，階層的な位置追跡を行った．Klasnja らは被験者にウェアラブルセンサを付けさせ，1 日の出来事を思い出す支援を行った [7]．

無線センサの利用が一般的になり，その消費電力が注目されている．TinyDB [8] ではセンサ同士が互いに通信を行うセンサネットワークにおいて，センサの内蔵バッテリーを考慮したセンサの制御及び環境情報の取得を行っている．Stäger らはサン

プリング周波数やセンサ値の取得時間等をパラメータとし，音センサによる状況認識の実現性と消費電力のトレードオフの関係を示した [9]．これらの研究では，利用者の行動の取得漏れを最小限に抑えつつ消費電力の削減に努めている．このように，センサの低消費電力化が重要になってきている．

2.2 概念共有環境 CONSENT

実空間内の物体の位置や，利用者の行動といった情報をセンサ値によって取得することが容易になってきた．その実現手法の 1 つとして電子タグ付き空間が考えられる．電子タグ付き空間の研究例として Tagged World Project [1] がある．しかし，センサ値だけではそれが何を表しているのかという意味情報や，環境の「こうであるべき」や「こうであるつもり」の情報 (概念的な操作状態) を抽出することは難しい．そこで，我々はこれまでに，意味情報や空間に存在する固有の概念を DB に構築し，ユビキタス環境からのセンサ値と概念的な情報を統合したユビキタス環境 DB として「概念共有環境 CONSENT」のプロトタイプシステムを構築し，実験を行ってきた．

コミュニティ内では様々な行動が行われ，実空間の状況は刻々と変化している．そのため，実空間状況をユビキタス環境 DB で共有するためには実空間情報の取得方法が必要となる．そこで，物体の位置や物体に対する利用者の行動を取得する場合，物体と領域に RFID タグ，利用者に RFID リーダを装着して，その反応から取得することにした．

2.3 センサによって得られる行動の最小単位

2.2 節で述べた環境において，コミュニティ参加者の行動をセンサによって取得することを考える．このとき，RFID タグの検知によって取得できるアトミックなものは「誰が，いつ，何によって，どこで，何を行った」事柄かを表すタグとリーダ反応の組み合わせである．本研究ではこの組み合わせを「Action.EE」と呼ぶ．以下，単に Action.EE と記述した場合は，RFID リーダと加速度センサによってこの組み合わせが検出されたものとする．このとき，Action.EE の挿入には RFID タグ（「何が (what)」，「どこで (where)」）の検知が不可欠である．そのため，本論文では IC タグが貼り付けられた物体の存在の検知（「何が (what)」，「どこで (where)」）を取りこぼさないことを重要とする．

3. 概念的な操作状態

「こうであるべき」や「こうであるつもり」の情報をここでは概念的な操作状態と呼ぶ．概念的な操作状態はデータベースにより個々のインスタンスとして管理される．このとき，概念的な操作状態は空間の利用者がデータベースに定義する．

データベースのスキーマを図 1 に示す．物体の意味や物体に対して可能な行動などの意味情報を「意味層」，タグを検知した時刻や物体のポリゴンデータなどのマルチメディアデータを「マルチメディアデータ層」，それらを関連付けた実体を「EE 層 (存在エンティティ層)」に分けて管理する．意味層は RDF (Resource Description Framework) スキーマを基礎として構築した．RDF でのクラスがテーブル THING_ontology に，プロパティがテーブル RELATION_ontology に当たる．図 1 のスキーマを用いた概念的な操作状態のインスタンス集合を図 2 に示す．図 2 では「プラスドライバー #2-100mm177567632 を引き出し 130686 に置く」という概念的な操作状態が定義されていることを表している．

図 3 に概念的な操作状態を取得するクエリを示す．このクエリを用いることにより，空間の全概念的な操作状態を取得することができる．図 3 によって取得される概念的な操作状態の一部を図 4 に示す．このデータベースに対し，SQL 文による検索で，例えば図 4 のような検索結果を得ることができる．図 4 は「プラスドライバー #2-100mm177567632 を引き出し 177567632 に置くことが重要である」などの概念的な操作状態が

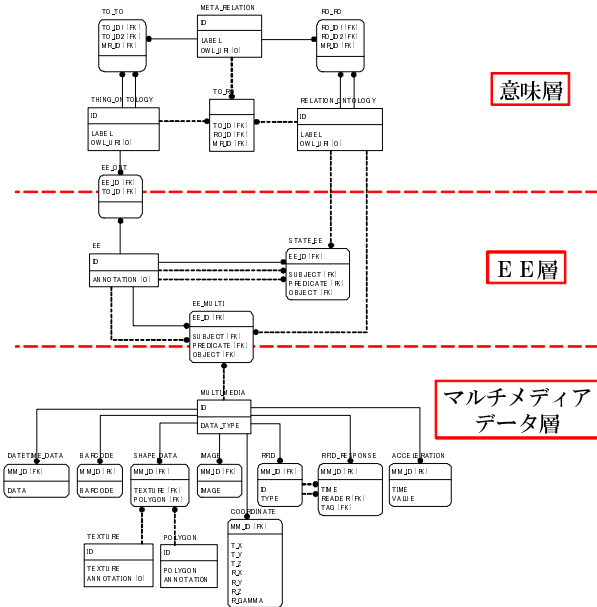


図 1 スキーマ
Fig. 1 Schema.

THING_ONTOLOGY		RO_RO			RELATION_ONTOLOGY	
ID	LABEL	RO_ID1	RO_ID2	MR_ID	ID	LABEL
3777	引き出し	3381	4	0	4	WHAT
3785	概念的 操作状態	3382	5	0	5	WHERE
5021	プラスドライバー #2				3381	C-WHAT
5217	置く				3382	C-WHERE

EE_ONT	
EE_ID	TO_ID
130686	3777
177567632	5021
213421601	5217
213421601	3785

META_RELATION	
ID	LABEL
0	IS_A

STATE_EE			
EE_ID	SUBJECT	PREDICATE	OBJECT
213421701	213421601	3382	130686
213421901	213421601	3381	177567632

ID	ANNOTATION
130686	引き出し
177567632	プラスドライバー #2-100mm
213421601	置く
213421701	置く-WHERE関係
213421901	置く-WHAT関係

図 2 概念的状態を表すインスタンス集合
Fig. 2 a Set of Instances of Conceptual Data.

あることを示している。ここで、WHATID と WHEREID は物体の ID を示し、RFID タグの ID と一意に関係していることから、この概念的状態に関する対象物や場所を RFID タグで特定することが可能である。これにより図 4 は、Action_EE の対象物を、DB に対する検索結果として、全てリストアップしたことになる。ACTION がログを集めたい行動を示し、WHAT、WHERE がそれに関連する物体を示す。ACTIONID、WHATID、WHEREID はそれぞれの ID を示す。

4. 問題設定

4.1 センサのポーリング間隔

一般に無線 RFID リーダはホスト側からリード命令を送信し、1 回のリード命令に対してリーダが 1 回のリードを行う。リード命令を出し続けることは常にリードを行っている状態を表し、これがデフォルトの設定となっている。このリード命令を送信する間隔をここではポーリング間隔と呼ぶ。ポーリング間隔が長いと、すなわち、リーダがリード動作をしていない時間が長いと、IC タグの近くをリーダが通過したにもかかわらず、この ID を検知できない現象、すなわち、「取りこぼし」が発生しやすくなる。

WITH WHAT

```

AS(
SELECT SE1.[SUBJECT] AS ID, EE1.ID AS WHATID
, EE1.ANNOTATION AS WHAT
FROM STATE_EE SE1
INNER JOIN EE_ONT EO1
ON SE1.[SUBJECT] = EO1.EE_ID AND EO1.TO_ID = 3785
INNER JOIN RO_RO RR1
ON RR1.RO_ID1 = SE1.PREDICATE AND RR1.RO_ID2 = 4
INNER JOIN EE EE1 ON EE1.ID = SE1.[OBJECT])
,[WHERE]
AS(
SELECT SE2.[SUBJECT] AS ID, EE2.ID AS WHEREID
, EE2.ANNOTATION AS [WHERE]
FROM STATE_EE SE2
INNER JOIN EE_ONT EO2
ON SE2.[SUBJECT] = EO2.EE_ID AND EO2.TO_ID = 3785
INNER JOIN RO_RO RR2
ON RR2.RO_ID1 = SE2.PREDICATE AND RR2.RO_ID2 = 5
INNER JOIN EE EE2 ON EE2.ID = SE2.[OBJECT])
)

```

```

SELECT EE.ID AS ACTIONID, EE.ANNOTATION [ACTION]
, WHAT.WHATID, WHAT.WHAT
, [WHERE].WHEREID ,[WHERE].[WHERE]
FROM WHAT
INNER JOIN EE ON EE.ID = WHAT.ID
LEFT OUTER JOIN [WHERE] ON WHAT.ID = [WHERE].ID

```

図 3 概念的状態を取得するクエリ
Fig. 3 Query to Get Conceptual Data

ACTIONID	ACTION	WHATID	WHAT	WHEREID	WHERE
213421601	置く	177567632	プラスドライバー#2-100mm	130686	引き出し
213603501	置く	19002920	DBSJVol7,no1,June_2008	118	本棚
214040901	読む	183452	ディベート入門	NULL	NULL
216186201	消す	177039432	白板消し	NULL	NULL
224072301	書く	177019732	マーキングペン(黒)	NULL	NULL

図 4 DB に登録済の概念的状態の検索結果抜粋
Fig. 4 Result of Query Retrieving Conceptual Data in DB.

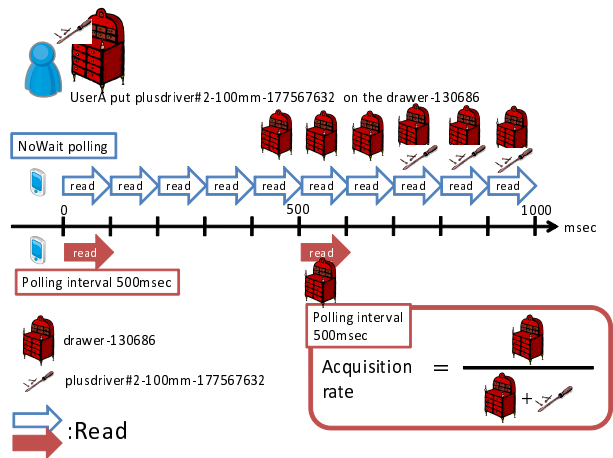


図 5 ポーリング間隔と取りこぼしの定義
Fig. 5 Definition of Polling Interval and Drop.

本研究ではポーリング間隔を制御することによってリード動作の回数を減らし、消費電力を削減しようと考えた。今回の実験ではその定義要件を満たす実機として Welcat 社の無線 RFID リーダライタ WIT-150-T(表 1) を用いた。このリーダでは 1 回のリードに最低約 100ms を要する。図 5 にポーリング間隔を最も短い値である約 100ms にしたとき (白抜き矢印) と 500ms (塗りつぶし矢印) にしたときの例を示す。ポーリング間隔が約 100ms のときは 1 秒間に 10 回程度のリードを行うことができる。これを NoWait ポーリングと呼ぶ。しかし、ポーリング間隔が 500ms のときには 2 回程度しかリードを行うことができない。

4.2 データの取りこぼし

本来得られる物体の存在の検知を落としてしまうことを取

表 1 RFID リーダ性能
Table 1 Performance of RFID Reader.

	リーダ
型名	WIT-150-T
周波数	13.56MHz
タグ検知可能距離	～6cm
インタフェース	Bluetooth
電源	リチウム電池 1100mAh
電池持続時間	9 時間半 (約 100ms 間隔でリード)

りこぼしと定義する．図 5 にポーリング間隔を NoWait ポーリングにしたときと 500ms にしたときの物体の検知列を示す．ポーリング間隔約 100ms のときは 1 秒間に 10 回程度のリードを行える．このとき，引き出し 130686 とプラスドライバ #2-100mm-177567632 はこの 1 秒の中で 1 回以上検知されている (白抜き矢印の上のアイコン)．したがって，NoWait ポーリングのときは 2 個の物体を検知している．一方，ポーリング間隔を 500ms として制御し，同じ環境でリードする (塗りつぶし矢印の下アイコン)．この場合には，同じ 1 秒の中でリードは 2 回しか行えず，引き出し 130686 しか検知できない．すなわち，ポーリング間隔を 500ms として制御した際に検知した物体は 1 個となる．取りこぼしを評価する際に取得率 (acquisition rate) を用いる．取得率を (1) 式に定義する．このとき実環境において，利用者が物体に触れたとしてもリーダの検知範囲内に RFID タグが入らないことによって起きるデータの取りこぼしが起こりうる．しかし，本研究においてはポーリング間隔制御によってデータの取りこぼしを抑えることを目的としているため，この取りこぼしについては評価の対象外とした．そのため，取得率はポーリング間隔が NoWait ポーリングのときに検知した物体を基準とした．

$$\text{取得率} = \frac{\text{ポーリング間隔を制御した際に検知した物体数}}{\text{NoWait ポーリングのときに検知した物体数}} \quad (1)$$

4.3 通常の Action.EE と重要な Action.EE

ログには重要性の差が存在する．そこで，このシステムによって取得するログを次に示す 2 つのレベルに分けて管理することにした．

(1) 通常の Action.EE

「A さんが 2010 年 11 月 12 日 10:59:12.033 に掃除機 1 で掃除する」のような RFID タグの反応の組み合わせから得られる利用者の単純な行動を「通常の Action.EE」(あるいは，単に Action.EE) と呼ぶ．これらのデータは 1 つ 1 つの意味はさほど重要ではないが，大量に収集することで，統計量として有意な情報を抽出できる可能性がある [10]．

(2) 重要な Action.EE

概念的な操作状態に対して取得した Action.EE を「重要な Action.EE」と呼ぶ．日常生活の中で，空間の「こうであるべき」や「こうであるつもり」など，コミュニティ参加者に価値のある業務等を，利用者が意識的あるいは，暗黙的に行う．そのとき，そのような業務上有意な行動の蓄積は業務履歴等として利用する価値があり，空間や他の利用者にとって有益である [2]．そのため，そのデータは 1 件でも大きな意味がある．重要な Action.EE の量は通常の Action.EE の 1/100 から 1/1000 であり [2]，このことから重要な Action.EE の取りこぼしを抑えることは有意であると考えられる．そこで，これらの重要な Action.EE を取りこぼさないような手法が必要となる．また，一般的に重要な Action.EE は利用者の身体的な動きを伴うデータである．

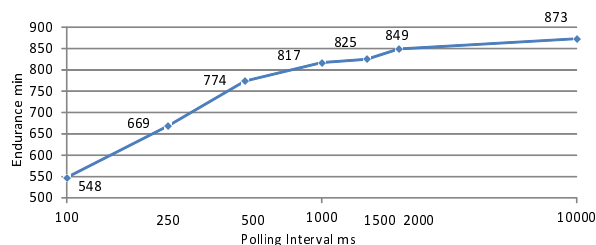


図 6 ポーリング間隔とバッテリーの持続時間の関係

Fig. 6 Relation Between Polling Interval and Battery Consumption.

5. 無線センサのポーリング間隔制御と消費電力の関係の予備実験

ポーリング間隔と消費電力には密接な関係があると考えられる．ポーリング間隔による消費電力への影響を調べるため，表 1 のリーダを用いて次のような実験を行った．充電済みのバッテリーを用いてポーリング間隔をパラメータとし，バッテリーの持続時間を計測した．その結果を図 6 に示す．

図 6 は縦軸が持続時間であり，横軸はポーリング間隔とした．図 6 を見るとポーリング間隔が長いほど，持続時間も延びている．このことから，ポーリング間隔はリーダの消費電力に大きな影響を与えることが確認できた．また，ポーリング間隔を 10000ms より長い時間に設定しても，持続時間は飽和し効果は小さいであろうことがわかる．

6. ポーリング間隔制御手法

本章では，2 種類の手法とその組み合わせによるポーリング間隔制御手法を提案する．アイデアとして，重要な Action.EE はユーザの身体的な動作を伴う，また，重要な Action.EE が得られる場所は限定されているという 2 つを利用しようと考えた．

6.1 加速度センサによるポーリング間隔制御 (Acc)

加速度センサによるポーリング間隔制御手法について説明する．4.3 節で述べたように重要な Action.EE は利用者の身体的な動きを伴う．動きの有無を加速度センサを用いて区別することにより効率的な RFID リーダの使用が可能になると考えた．加速度センサの反応をトリガとしてリーダのポーリング間隔を短くすることにより，重要な Action.EE の取りこぼしなく消費電力を削減できると考えられる [9]．利用者に装着させた加速度センサの値により動的にポーリング間隔を制御する．3 軸加速度センサ値のベクトルの変化の大きさが閾値を超えた場合，利用者が動いたと判断しポーリング間隔を短くする．また，閾値を下回った場合，利用者は動いていないと判断しポーリング間隔を長くする．つまり，表 2 のように 2 つの状態に分類し，それぞれの状態でポーリング間隔を設定する．利用者の動作がある状態を AccON，動作がない状態を AccOFF と呼ぶ．図 7 に加速度センサによるポーリング間隔制御の例を示す (見出し:Acc)．このとき，利用者が動いていると判断しているときはポーリング間隔を NoWait ポーリングとし，動いていないと判断しているときはポーリング間隔 10000ms とする．図 7 は横軸が時間軸となっており，時間軸の上のアイコンがある利用者の行動を示している．このとき，「移動している」，「プラスドライバ #2-100mm-177567632 を引き出し-130686 にしまう」，「本-60945100 を本棚-114 にしまう」のときに利用者の動作があるとする．利用者に取り付けた加速度センサにより利用者が動作していることが判断できる (AccON)．

6.2 DB によるポーリング間隔制御 (DB1,DB2)

DB によるポーリング間隔制御手法について説明する．重要な Action.EE が得られる場所は限定されているというアイデアをこの手法では利用する．概念的な操作状態が定義されてい

表 2 加速度センサによるポーリング間隔制御

Table 2 Polling Interval Control by Acceleration Sensor's Data.

状態	AccON	AccOFF
加速度センサ値の変化	閾値を超えた	閾値を下回った
利用者の動作	あり	なし
ポーリング間隔	短く	長く

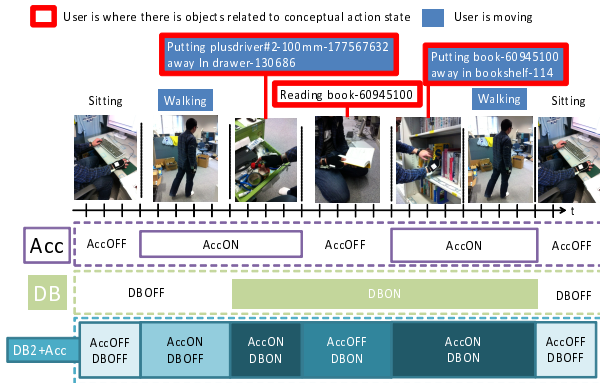


図 7 提案手法 (Acc,DB2,DB2+Acc)

Fig. 7 Proposed Method(Acc,DB2,DB2+Acc).

表 3 DB によるポーリング間隔制御

状態	DBON	DBOFF
重要な Action_EE	得られる	得られない
ポーリング間隔	短く	長く

る DB を利用することにより効率的に RFID リーダを稼働させ、バッテリーの持続時間を延ばせると考えられる。そこで、検知した物体に概念的的操作状態が関連付けられているかどうかを問い合わせるクエリ結果 (図 4) が有効であると考えた。すなわち、検知した物体に概念的的操作状態が関連付けられている場合、リーダのポーリング間隔を短くすることにより重要な Action_EE の取りこぼしを減らせると考えた。

概念的的操作状態が関連付けられている RFID タグが検知された時には、条件を満たすまでの間ポーリング間隔を短くする。それ以外の時間はポーリング間隔を長くし消費電力を抑える。表 3 のように 2 つの状態に分類し、それぞれの状態でポーリング間隔を設定する。重要な Action_EE が得られる状況を DBON、得られない状況を DBOFF と呼ぶ。

このとき、DB によるポーリング間隔制御の手法にはチューニングの余地が存在する。具体的には、いつ DBON にするかという DBOFF とするか 2 つが存在する。まず、いつ DBON とするかについて考える。DBON になるには概念的的操作状態 (重要な Action_EE の基) に関連付けられた物体の検知が必要である。そのため、DBOFF のときにもリードを行わなければならない。DBOFF のときのポーリング間隔は実験的に求めようと考えた。次に、いつ DBOFF とするかについて考える。概念的的操作状態に関連付けられている物体 (図 4 に現れる物体) を検知をしたときに、ポーリング間隔を短くする。しかし、ポーリング間隔を短くしたままではリーダは多くの電力を消費してしまう。そのため、ある条件を満たした場合、ポーリング間隔を元に戻し消費電力を抑える。ポーリング間隔を元に戻す条件として 2 種類提案する。

条件 1(DB1): 物重視の条件。概念的的操作状態に関連付けられていない物体を検知したときポーリング間隔を元に戻す。

条件 2(DB2): 場所重視の条件。概念的的操作状態に関連付けられていない場所を検知したときポーリング間隔を元に戻す。場所の例として机やテーブルなどがある。

以下、条件 1 を用いる DB によるポーリング間隔制御の手法を DB1 によるポーリング間隔制御、条件 2 を用いるものを DB2 によるポーリング間隔制御と呼ぶ。図 7 に DB による

表 4 DB と加速度センサによる制御の状態

Table 4 Condition Changed by DB and Acceleration Sensor's Data.

状態	AccON DBON	AccOFF DBON	AccON DBOFF	AccOFF DBOFF
重要な Action_EE	得られる	得られる	得られない	得られない
利用者の動作	あり	なし	あり	なし

るポーリング間隔制御の例を示す (DB)。図 7 ではポーリング間隔を元に戻す手法として DB2 によるポーリング間隔制御の手法を用いた例を示した (見出し:DB)。このとき、「プラスドライバー#2-100mm-177567632 を引き出し-130686 にしまう」、「本-60945100 を読む」、「本-60945100 を本棚-114 にしまう」が概念的的操作状態であるとする。DB に問い合わせることにより利用者が重要な Action_EE が得られる場所にいることが判断できる (DBON)。

6.3 DB と加速度センサを組み合わせたポーリング間隔制御 (DB1+Acc,DB2+Acc)

DB と加速度センサを組み合わせたポーリング間隔制御手法について説明する。単純に DB による手法と加速度センサによる手法を組み合わせた。具体的には、DB により重要な Action_EE が得られる場所を特定し、更に、その中から加速度センサにより利用者が動いているかどうかを判断する。これにより表 4 のように 4 種類に状態を分類することができる。具体的には (AccON, DBON), (AccOFF, DBON), (AccON, DBOFF), (AccOFF, DBOFF) である。

- (AccON, DBON):概念的的操作状態に関連付けられている物体を検知し、かつ、利用者が動作を行っている状態である。そのため、この状態のときに重要な Action_EE を取得できると考えられるため、ポーリング間隔を短くすることが効果的であると考えられる。

- (AccOFF, DBOFF):概念的的操作状態に関連付けられていない物体を検知しておらず、かつ、利用者が動作を行っていない状態である。そのため、この状態のときには重要な Action_EE を取得できないと考えられるため、ポーリング間隔を長くすることが効果的であると考えられる。

- (AccOFF, DBON):重要な Action_EE が得られる場所に利用者はいるが、動作は行っていないことを示す。利用者の動作がなければ物体の検知はないと考えられるため、ポーリング間隔を長くすることが効果的であると考えられる。

- (AccON, DBOFF):利用者の動作はあるが、重要な Action_EE が得られる場所に行かないことを示す。例えば、利用者が移動しているなどがこれに該当すると考えられる。このとき、重要な Action_EE が得られる場所に行くのか、得られない場所に行くのかは判断できない。取得率を高くするために、ポーリング間隔を短くすることが効果的であると考えられる。

また、DB によるポーリング間隔制御の手法には 3 種類あるため、DB と加速度センサを組み合わせたポーリング間隔制御の手法も 2 種類存在する。

手法 1(DB1+Acc): DB1 によるポーリング間隔制御と加速度センサによるポーリング間隔制御を組み合わせた手法

手法 2(DB2+Acc): DB2 によるポーリング間隔制御と加速度センサによるポーリング間隔制御を組み合わせた手法

図 7 に DB2 と加速度センサを組み合わせたポーリング間隔制御の例を示す (見出し:DB2+Acc)。図 7 ではポーリング間隔を元に戻す手法として DB2 によるポーリング間隔制御と加速度センサによるポーリング間隔制御を組み合わせた手法を用いた例を示した。このとき、単純に DB によるポーリング間隔制御による分類と加速度センサによるポーリング間隔制御の分類の組み合わせとなる。

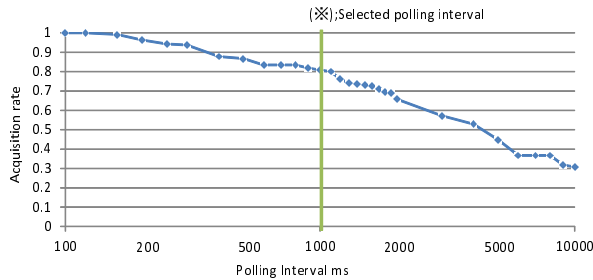


図 8 ポーリング間隔と取りこぼしの関係

Fig. 8 Relation Between Polling Interval and Drops of Data.

7. 無線センサのポーリング間隔制御の評価実験

7.1 実験環境

各利用者に付けられたリーダは Bluetooth により接続されたホストにセンサ値を送る。そして各ホストからデータベースサーバにデータを入出力する一般的なクライアント・サーバモデルで構築した。このとき、次のような環境で実験を行った。

- サーバ OS: Windows Server 2008 R2
 - DBMS: Microsoft SQL Server 2008
- クライアント OS: Windows 7 Professional
 - 開発環境: Microsoft Visual Studio .Net 2008
- 3 軸加速度センサ: ワイヤレステクノロジー社 小型無線加速度センサ WAA-001
 - RFID リーダ: Welcat 社 ウェアラブル RFID リーダライタ WIT-150-T(表 1)
 - RFID タグ: OMRON 社 RFID タグ V730S-D13P01

7.2 実験内容

概念共有環境 CONSENT [2] においてデータの取りこぼしとバッテリーの持続時間について評価を行った。

被験者数は 10 名であり、2010/12/1 から 2010/12/7 の休日を抜いた 5 日間で行った。被験者は 1 日に 2 人ずつ、利き手首に無線 RFID リーダと無線加速度センサを付けさせて 5 時間生活させた。被験者の装着した無線 RFID リーダは NoWait ポーリングで動作させた。そのため、5 時間の RFID タグの検知履歴と加速度センサ値が 10 人分蓄積できた。被験者にはしてほしい全概念的的操作状態を GUI で提示した。被験者は GUI で確認した概念的的操作状態を任意の時間に実行する [2]。このとき、被験者が蓄積した RFID タグの検知履歴と加速度センサ値を解析して取得率を計算した。

7.3 ログデータの取りこぼしの評価

(1) ポーリング間隔をパラメータとしたときの取得率

図 5 のように、ポーリング間隔をパラメータとして取得率 ((1) 式) を求めた。ここでは、7.2 節で得られた RFID タグの検知列 (NoWait ポーリング) を基に、あるポーリング間隔のときに検知できたであろう RFID タグを求めるシミュレーションを行った。すなわち、7.2 節で得られた物体数を 1) 式の分母に、シミュレーションで得られた物体数を 1) 式の分子とした。以下の手法でも同様の解析を行った。

その結果を図 8 に示す。図 8 は縦軸が取得率 ((1) 式) を示し、横軸はポーリング間隔を示している。

取りこぼしの観点からみた場合、ポーリング間隔 1000ms は取得率 80% を保つことができる。それに加え、バッテリーの持続時間を延ばすために、図 6 よりポーリング間隔を 1000ms とするのが適当であると素朴に導くことができる (図 8(※))。

(2) 加速度センサによるポーリング間隔制御を用いたときの取得率

7.2 節で得られた RFID タグの検知履歴と加速度センサ値の履歴を、加速度センサ値の変化の閾値をパラメータとして解析した。加速度センサ値の変化が閾値を越えたとき (AccON) の

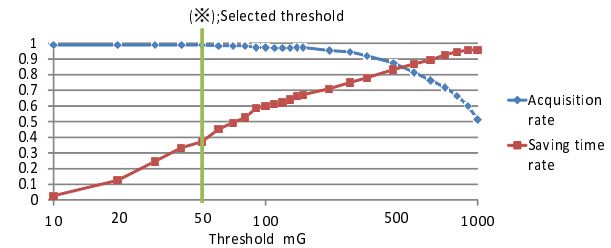


図 9 加速度センサによるポーリング間隔制御を用いたときの取得率と省電力時間比率

Fig. 9 Acquisition-rate and Saving time rate by Using Proposed Method(Acc).

ポーリング間隔は NoWait ポーリングとし、閾値を下回ったとき (AccOFF) のポーリング間隔は 10000ms とした。

評価対象を取得率と省電力時間比率とした。省電力時間比率の定義を (2) 式に示す。省電力時間比率が高くなると、ポーリング間隔が長い時間が増えるため図 6 よりバッテリーの持続時間は長くなると考えられる。

$$\text{省電力時間比率} \equiv \frac{\text{AccOFF の全時間}}{\text{全時間}} \quad (2)$$

図 9 に取得率と省電力時間比率を示す。縦軸は取得率と省電力時間比率を示し、横軸は閾値 ($G=9.8m/s^2$) とした。閾値を大きくしていくと取りこぼしの量が多くなることわかる。しかし、省電力時間比率は高くなる。高い取得率を保ち、それに加え、省電力時間比率を高くするために、図 9 より閾値 50mG が適当であると導くことができる (図 9(※))。

(3) DB によるポーリング間隔制御を用いたときの取得率

7.2 節で得られた RFID タグの検知履歴を解析し、DB によるポーリング間隔制御を適用したときの取得率と省電力時間比率を求めた。省電力時間比率の定義を (3) 式に示す。

$$\text{省電力時間比率} \equiv \frac{\text{DBOFF の全時間}}{\text{全時間}} \quad (3)$$

7.2 節で得られた RFID タグの検知履歴を解析し、2 種類の DB によるポーリング間隔制御を適用したときの取得率と省電力時間比率を求めた。DBON と判断したときのポーリング間隔を NoWait ポーリングとし、DBOFF と判断したときのポーリング間隔をパラメータとした。DB1 によるポーリング間隔制御、DB2 によるポーリング間隔制御の手法についての結果を図 10 に示した。

図 10 ではポーリング間隔を長くしても省電力時間比率に大きな変化はない。しかし、リーダを休ませるときのポーリング間隔が長くなった分バッテリーの持続時間は延びると考えられる。高い取得率を保ちながら省電力時間比率を高くするために、DBOFF のポーリング間隔は DB1 によるポーリング間隔制御では 200ms、DB2 によるポーリング間隔制御では 1000ms が最適であると考えられる。

(4) DB と加速度センサを組み合わせたポーリング間隔制御を用いたときの取得率

6.3 節で示したように DB と加速度センサを組み合わせたポーリング間隔制御には 4 つの分類が存在する。具体的には (AccON, DBON), (AccOFF, DBON), (AccON, DBOFF), (AccOFF, DBOFF) である。(AccON, DBON) のときは DB による制御手法と加速度センサによる制御手法のどちらも重要だと判断しているためデータの取りこぼしをしない NoWait ポーリングが最適だと判断した。(AccOFF, DBOFF) のときには DB による制御手法と加速度センサによる制御手法のどちらも重要でないと判断しているためセンサを休ませることができるポーリング間隔 10000ms が最適であると判断した。次に、

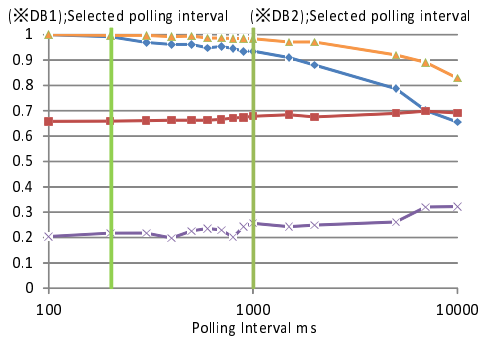


図 10 DB によるポーリング間隔制御を用いたときの取得率と省電力時間比率

Fig. 10 Aquisition-rate and Saving time rate by Using Proposed Method(DB).

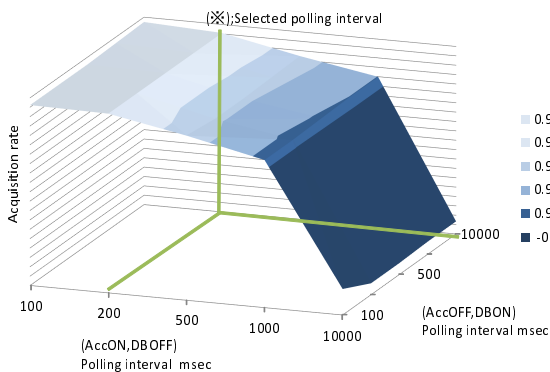


図 11 DB1+Acc によるポーリング間隔制御を用いたときの取得率

Fig. 11 Aquisition-rate by Using Proposed Method(DB+Acc).

(AccOFF, DBON), (AccON, DBOFF) の最適なポーリング間隔を求める。これらのとき、取得率とバッテリーの持続時間の観点から最適なポーリング間隔を導出する。

図 11 に DB1 と加速度センサを組み合わせたポーリング間隔制御の取得率の結果を示し、図 12 に DB2 と加速度センサによるポーリング間隔制御の取得率の結果を示した。縦軸は取得率を示し、横軸は (AccOFF, DBON) と (AccON, DBOFF) のポーリング間隔を示している。ポーリング間隔が長ければ、バッテリーの持続時間も長くなると考えられる。そのため、取得率が高く、かつ、(AccOFF, DBON) と (AccON, DBOFF) のポーリング間隔が長いものがよい。DB1+Acc によるポーリング間隔制御においては、高い取得率を維持しながらバッテリーの持続時間を延ばすために (AccOFF, DBON)=10000ms, (AccON, DBOFF)=200ms が最適であると判断した (図 11(※))。DB2+Acc によるポーリング間隔制御では DB1+Acc によるポーリング間隔制御と比較して、長いポーリング間隔を割り当てても高い取得率を維持できていることがわかる。DB2+Acc によるポーリング間隔制御においては、高い取得率を維持しながらバッテリーの持続時間を延ばすために (AccOFF, DBON)=10000ms, (AccON, DBOFF)=1000ms が最適であると判断した (図 12(※))。

7.4 バッテリーの持続時間計測結果

7.2 節で得られた RFID タグの検知履歴と加速度センサ値の履歴を解析し、提案手法を用いた場合のバッテリーの持続時間を計測する。7.2 節の実験により、5 時間分の RFID タグの検知履歴と加速度センサ値の履歴が 10 人分得られた。例えば、ある一人の 5 時間分の RFID タグの検知履歴と加速度センサ値の履歴を解析すると、どの時点でポーリング間隔を変更したかというポーリング間隔の制御履歴を求めることができる。この

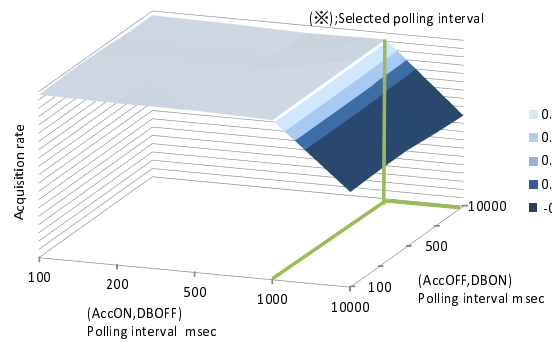


図 12 DB2+Acc によるポーリング間隔制御を用いたときの取得率

Fig. 12 Aquisition-rate by Using Proposed Method(DB+Acc).

ポーリング間隔の制御履歴通りに実際に無線 RFID リーダを動かし、バッテリーの持続時間を計測した。充電済みのバッテリーを使用して無線 RFID リーダのバッテリーが切れるまで実験を行い、リーダの使用時間をバッテリーの持続時間とした。しかし、図 6 より、バッテリーの持続時間は最長で 15 時間保つと考えられる。そのため、提案手法の評価を実機で行うためにはポーリング間隔の制御履歴は最長で 15 時間分必要であると考えられる。今回の実験においては NoWait ポーリングで取得した連続的な RFID タグの検知履歴と加速度センサ値の履歴は 5 時間分、被験者は 10 名分しかない。そのため、これらのセンサ値の履歴を組み合わせることにより、人工的にポーリング間隔の制御履歴を作成しようと考えた。15 時間分のポーリング間隔の制御履歴を作成するために、3 人分の RFID タグの検知履歴と加速度センサ値の履歴を組み合わせた。この組み合わせ方には $10P_3 = 720$ 通りあり、これらのうちからランダムに 4 つ選択し実験を行った。これらの 4 つはいずれも実際の検知データを基に生成されたものであり、実世界での利用者の実際の振る舞いを示すものである。

第 6 章で提案した 7 種類の方法が有効であることを実験的に示す。それぞれのポーリング間隔は表 5、表 6、表 7、表 8、表 9 のようにした。

ベースライン (NoWait): ポーリング間隔制御を行わない

1 回のリードの後、待ち時間なしで即、次のリードを行う (NoWait)。最も取りこぼしは少ないが、消費電力も大きい。これを評価のベースラインとする。実験に用いたリーダのリード時間は約 100ms であったため、ポーリング間隔は約 100ms (= リード時間) となる。

手法 1(Acc): 加速度センサによるポーリング間隔制御

6.1 節で提案した手法により、ポーリング間隔制御を行う。加速度センサの反応がある閾値を超えた場合に利用者の動作があったと判断し、ポーリング間隔を変更する。利用者動作の有無によるポーリング間隔の値を表 5 に示す。動作があった場合はベースラインと同様に、動作がない場合はセンサをオフにする。実際には、センサをオフにする代わりに、ポーリング間隔制御の効果が飽和する 10000ms をポーリング間隔とした。加速度センサ値の変化の閾値は 50mG とした。

手法 2(DB1): DB1 によるポーリング間隔制御

6.2 節で提案した手法により、ポーリング間隔制御を行う。利用者の状況が、重要な Action_EE を得られる状況か、得られない状況かをデータベースに問い合わせる。それぞれの状況でのポーリング間隔の値を表 6 に示す。物体重視の条件を用いる。

手法 3(DB2): DB2 によるポーリング間隔制御

6.2 節で提案した手法により、ポーリング間隔制御を行う。このとき利用者の状況が、重要な Action_EE を得られる状況か、得られない状況かをデータベースに問い合わせる。それぞれの状況でのポーリング間隔の値を表 7 に示す。場所重視の条件を用いる。

表 5 加速度センサによる制御のポーリング間隔
Table 5 Polling Interval Controlled by Acceleration Sensor's Data.

状態	AccON	AccOFF
ポーリング間隔 (ms)	NoWait ポーリング	10000

表 6 DB1 による制御のポーリング間隔
Table 6 Polling Interval Controlled by DB ver.1.

状態	DBON	DBOFF
ポーリング間隔 (ms)	NoWait ポーリング	200

表 7 DB2 による制御のポーリング間隔
Table 7 Polling Interval Controlled by DB ver.3.

状態	DBON	DBOFF
ポーリング間隔 (ms)	NoWait ポーリング	1000

表 8 DB1 と加速度センサによる制御のポーリング間隔
Table 8 Polling Interval Controlled by DB ver.1 and Acceleration Sensor's Data.

状態	AccON DBON	AccOFF DBON	AccON DBOFF	AccOFF DBOFF
ポーリング間隔 (ms)	NoWait ポーリング	10000	200	10000

表 9 DB2 と加速度センサによる制御のポーリング間隔
Table 9 Polling Interval Controlled by DB ver.3 and Acceleration Sensor's Data.

状態	AccON DBON	AccOFF DBON	AccON DBOFF	AccOFF DBOFF
ポーリング間隔 (ms)	NoWait ポーリング	10000	1000	10000

用いる。

手法 4(DB1+Acc): DB1 と加速度センサによる手法を組み合わせたポーリング間隔制御

6.3 節で提案した手法により、手法 1 と手法 2 の組み合わせによってポーリング間隔制御を行う。手法 5 によるポーリング間隔の値を表 8 に示す。

手法 5(DB2+Acc): DB2 と加速度センサによる手法を組み合わせたポーリング間隔制御

6.3 節で提案した手法により、手法 1 と手法 3 の組み合わせによってポーリング間隔制御を行う。手法 6 によるポーリング間隔の値を表 9 に示す。

図 13 にバッテリーの持続時間の実験結果を示す。縦軸はバッテリーの持続時間で単位は min とし 4 回の実験の平均値とした。横軸は左からベースライン、手法 1、手法 2、手法 3、手法 4、手法 5 とした。図 13 を見ると、ベースラインと比べてどの手法も持続時間を延ばせたことがわかる。手法 1 はベースラインと比べると 119.7%、手法 2 は 111.3%、手法 3 は 114.5%、手法 4 は 136.3%、手法 5 は 141.1%となった。一方、取得率を見るとどの手法も 98%を越えている。これは、提案手法を導入してもベースラインと比較して取りこぼしがないことを示している。提案手法の中でも手法 4、手法 5 は持続時間を大きく延ばすことができた。このことから、DB と加速度センサを組み合わせた制御手法の有効性が示されたと考えられる。その中でも、手法 5 が最も長い持続時間を得ることができた。そのため、手法 5 が最もよい手法であると考えられる。また、物体を重視するか、場所を重視するかによって、手法を選択することも有効であろうことが示せた。

8. まとめと今後の課題

本稿では、ユビキタス環境において欲しい情報を取りこぼさず、無線センサのバッテリーの持続時間を延ばす手法を提案し、検証した。その結果、DB を用いることにより重要な Action.EE が得られる場所を特定し、センサが必要な場所とそうでない場所を区別することでセンサを有効に利用する手法を提案し、それによる取りこぼしと消費電力の削減を示した。結論として、

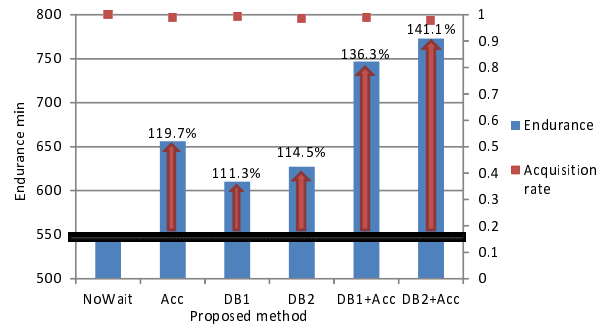


図 13 バッテリーの持続時間の結果
Fig. 13 Endurance of Battery Result.

DB を利用して重要な Action.EE が得られる場所を特定し、加速度センサによりユーザの身体的動作を考慮したポーリング間隔制御の手法が、取りこぼしが少なく、バッテリー持続時間が長い、というトレードオフの両方を解決する手法であることが示された。また、DB を利用した制御手法のチューニングの中でもポーリング間隔を元に戻す手法として、場所に限定した手法が最も効果があった。

今後の課題として、より多くの環境でのデータを収集すること、提案手法の信頼性を示す必要がある。

謝辞 本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（若手研究 (B)：課題番号 21700102, および特定領域研究（情報爆発 IT 基盤）：課題番号 21013023）の助成を受けて行った。

文 献

- [1] 楓仁志, 山原裕之, 野口豊司, 島田幸廣, 島川博光, “接触物体から個人の行動を認識するための確率的手法”, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.3, pp.1479-1490, 2007.3.
- [2] 清水隆司, 古賀浩史, 富井尚志, “大量の RFID データを扱う概念共有環境 CONSENT の運用による実用性の評価”, 日本データベース学会論文誌, Vol.8, No.1, pp.41-46, 2009.6.
- [3] 猿田芳郎, 富井尚志, “加速度センサと RFID を用いたユビキタス環境での利用者コンテキスト推定手法”, 日本データベース学会 Letters, Vol.6, No.3, pp.13-1, 2007.12.
- [4] U. Maurer, A. Rowe, A. Smailagic, D. P. Siewiorek, “eWatch: A Wearable Sensor and Notification Platform”, Intl. Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN '06), pp.142-145, 2006.
- [5] D. Merrill, P. Maes, “Augmenting Looking, Pointing and Reaching Gestures to Enhance the Searching and Browsing of Physical Objects”, Proc. Pervasive2007, pp.1-18, 2007.
- [6] H. Mineno, K. Hida, M. Mizutani, N. Miyauchi, K. Kusunoki, A. Fukuda and T. Mizuno, “Hierarchical Position Estimation for Tracking System using Mobile Detectors”, In GESTS International Transactions on Computer Science and Engineering, Vol.23, No.1, ISSN 1738-6438, pp.21-32, 2005.11.
- [7] P. Klasnja, B. L. Harrison, L. LeGrand, A. LaMarca, J. Froehlich, S. E. Hudson, “Using Wearable Sensors and Real Time Inference to Understand Human Recall of Routine Activities”, Proc. UbiComp2008, pp 154-163, 2008.
- [8] S. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein and W. Hong, “TinyDB: An Acquisitional Query Processing System for Sensor Networks”, ACM Transactions on Database Systems, Vol.30, No.1, pp.122-173, 2005.
- [9] M. Stäger, P. Lukowicz, G. Tröster, “Power and Accuracy Trade-offs in Sound-based Context Recognition Systems”, Science Direct Pervasive and Mobile Computing 3 (2007) 300-327.
- [10] 河村愛, 富井尚志, “ユビキタス環境における複合的なセンサデータの特徴量化による行動評価”, 第 2 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2010), D5-2, 2010.3.