

災害時のインフラ喪失に対する耐性をもった公共防災情報端末の実現 Realizing Public Information Terminal for Disaster Mitigation Tolerant of Infrastructure Breakdown

矢代 武嗣[†] 小林 真輔[†] 越塚 登^{†‡} 坂村 健^{†‡}

Takeshi Yashiro Shinsuke Kobayashi Noboru Koshizuka Ken Sakamura

1. はじめに

効果的な防災や減災を実現するために、情報の共有が大きな役割を担っていることは古くから知られている。災害の発生時に、どこで何が起きているのか、どのような避難行動をとれば良いのかといった情報が防災無線や公共放送などを通して共有されることは、大きな防災・減災の効果をもたらしてきた。その重要性から、これらの技術はすでに社会的な公共インフラとして国や自治体に定着したものとなっている。

2011 年 3 月に発生した東日本大震災において特筆すべきことは、SNS 等の情報通信技術を用いた防災・減災に関する様々な取り組みが行われたことである。たとえば、「*twit for you*」[1] と呼ばれるサービスでは、支援物資を送る側と受け取る側とのマッチングを行い、被災地において必要とされているニーズにリアルタイムかつ的確に答えることを可能とした。他にも、「*Hack for Japan* プロジェクト」[2] などを通して様々な取り組みが行われ、一定の成果を実証したといえるだろう。防災無線や公共放送のような従来の仕組みが単純な一方通行の情報発信であったのと比べ、情報通信技術を用いた取り組みにおいては双方向の情報共有や様々なプレイヤーが発信を行うことができる点で、有用性が高いと考えられる。

その一方で、災害時の情報通信技術の利用においては、情報の信憑性などの新たな問題点が浮き彫りになった。その中でも最も重要なものの一つに、情報通信インフラの脆弱性が挙げられる。東日本大震災でも明らかになったように、災害の発生に対して情報通信インフラが正しく機能し続けることは必ずしも保証されていない。例えば、災害により停電の発生による電力供給のストップ、災害直後の通信路の輻輳による通信の遮断、といった事象が実際に数多く発生した。災害直後という最も情報が重大な意味を持つ期間において、これらのインフラが崩壊してしまうことは、防災および減災の観点からは重大な課題である。

そこで、本研究では災害時のインフラ喪失に対する耐性を持った公共施設向け情報システムの構築を行った。具体的には、「防災情報ステーション」とよばれる電力および通信インフラの喪失に対する耐性を持った公共施設向けキオスク端末の設計・実装を行った。

電力の遮断への対策として、防災情報ステーションの内部には大容量のバッテリーが搭載され、万が一停電が発生した場合にもシステムを稼働させ続けることができるよう作られている。屋外向けには、さらに太陽電池パネルを搭載することでより長期の稼働を可能にした。さら

に、バッテリーの残量には限りがあることから、電源供給が失われた状況下においても最低限の情報通信インフラを維持し続けるための様々な工夫を行った。まず、表示器には電子ペーパーディスプレイ (EPD) を採用した。これにより、LCD やプラズマディスプレイ等の表示器を使う場合と比較して大幅な電力削減を実現した。さらに、バッテリーの残量等に応じてきめ細かな電力制御を行うための仕組みとして、電力管理のためのドメイン固有言語「TK-PML (T-Kernel Power Management Language)」を設計し、これに基づく電源制御処理機能を実装した。電力管理のポリシーを TK-PML の簡潔な記述で記述できるようにすることで、災害時のサービス提供とインフラ維持との間のバランスをとり、防災情報システムとしての最適な動作を容易に実現できるようにした。

一方、通信路の遮断に対する対策としては、衛星等を用いた通信インフラの確保による仕組みを搭載可能とした。衛星による通信路の確保は、先行研究として構築された「街角情報ステーション」[3] の仕組みに基づくものであり、すでに同システムの実証実験を通じた実績が確認されている。

横須賀市の協力のもと、我々は防災情報ステーションを同市内の複数の公共施設等に設置を行い、2014 年 3 月より実運用を開始した。4 月現在も同システムが安定して動作を続けていることが確認されており、高い可用性を実現していることが証明された。また、消費電力の計測を行った結果、同システムが災害発生からインフラ復旧に至るまでの期間にわたって動作する省電力性能を実現していることが確認された。

2. 関連研究

本研究の先行研究として、YRP ユビキタス・ネットワークング研究所等によって開発された「街角情報ステーション」[3] が挙げられる。このシステムでは、災害発生時に地上の通信インフラが寸断された状況下でも、衛星通信を通して安否情報・避難場所・交通状況などの情報提供が行えることを特徴としたものである。この街角情報ステーションでは、災害時の通信路の確保という点に関する課題の解決に成功したが、停電状況に対する対策はバッテリーの内蔵のみであった。本研究で提案する防災情報ステーションにおいては、表示器を EPD に換えることで消費電力を大幅に抑えたほか、内蔵バッテリーや電源供給 (外部電源および太陽光パネル) の状況に応じたきめ細かな電力とサービスの制御を実現しており、電力インフラの喪失耐性について大幅な改善が行われている。

災害による停電などの発生時に、情報機器の動作等を保護するための仕組みの提供自体は古くから研究され、そのうち実用化されているものも多い。例としては、

[†] YRP ユビキタス・ネットワークング研究所, YRP Ubiquitous Networking Laboratory

[‡] 東京大学, the University of Tokyo



図1 防災情報ステーションの外観

RAID によるディスクアレイの冗長化や無停電電源装置 (UPS) などが挙げられる。我々の防災情報ステーションにおけるバッテリー自体も UPS そのものであると考えて良い。一方で、UPS を用いた電源管理では、バッテリー残量が少なくなってきたときにシステムを安全にシャットダウンさせるといった単純な処理を実現したものが多い。しかしながら、単純にシャットダウンを実行してしまうとどんなに緊急性の高い情報も通知できなくなってしまうので、災害時の情報通信インフラとしてこれは望ましい動作とは言えない。防災情報ステーションでは TK-PML により、情報の更新頻度や通信のバンド幅などを縮める代わりにシステムの動作がより長持ちさせるような処理を行うなど、その時の状況に合わせて最適な電源制御を行うことが容易となっている。

TK-PML 以前にも、現在の状況に応じた省電力制御を行うアイデアは多数提案されている [4,5,6]。しかしながらこれらはいずれも特定の機器構成に対してあらかじめ決められたポリシーに基づく省電力制御を行うものであった。しかしながら、防災情報ステーションのようにサービスの内容と省電力化のバランスをとるようなシステムにおいては、優先すべき事項は提供されるサービスとも密接に関わっており、単一のポリシーを決め打ちする方針ではうまくいかないと考えられる。これを解決する方



図2 ユーザインタフェース部分の外観

式として、筆者らにより省電力制御のルール化が提案された[7]。TK-PML はこの先行研究を踏まえた上で、先行研究よりも簡潔な記述により求められる省電力制御を効果的に実現するために設計されたものである。

3. 防災情報ステーション

本節では、機器の外観や利用者に提供される機能を含む、防災情報ステーション全体としての外部仕様の側面について、ハードウェア・ソフトウェアの両面から簡潔に述べる。

3.1 機器の概要

防災情報ステーションの外観を図1に示す。全体としては、円形のベンチの中央に EPD の画面をもったキオスク端末を搭載したものとなっている。なお、ベンチの内部(右側)には AED を格納できる。

機器上部には各種環境センサ(温度・湿度・放射線)、カメラ、スピーカーが含まれている。そのほか、公共サービスとして USB アダプタによる充電用の電源供給のためのポートや、無線 LAN のアクセスポイントによるインターネット回線の提供も備えている。これにより、防災ステーションにおいて電源的な余裕がある場合には、スマートフォン等の各個人が持つ機器を通して情報通信サービスを利用することができるようにした。



図3 災害発生時の防災情報ステーションの画面例

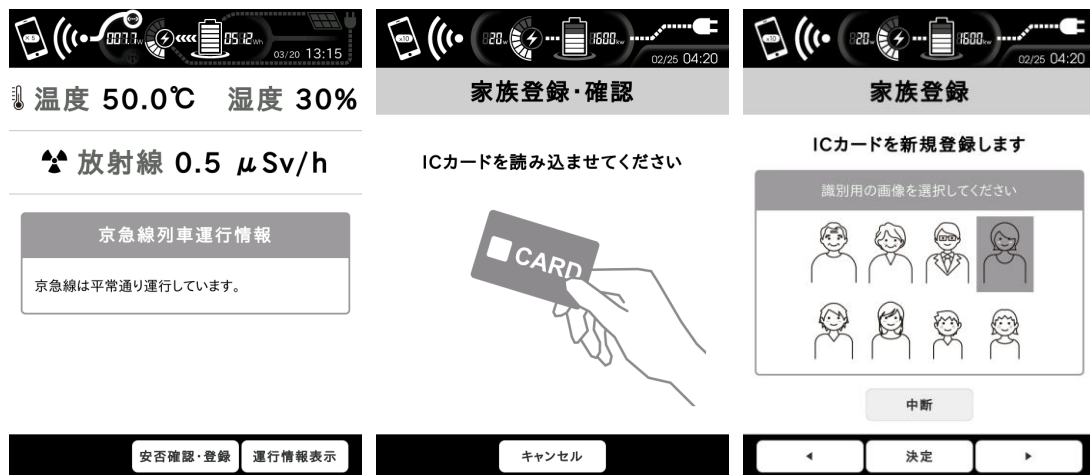


図4 平常時の防災情報ステーションの画面例

中央部分のユーザインタフェース部分には、EPD 表示器と三つの押しボタン、非接触カードリーダーが搭載されている(図2)。これらのインタフェースを通して、防災無線のような一方向の同報通知を行うのみでなく、条件の入力や情報発信など、より複雑な情報交換を行うことが可能となっている。

3.2 アプリケーションシステム

防災情報ステーション上で動作させるアプリケーションシステムとしては、災害時の情報通信サービスとして、環境情報・災害情報・列車運行情報交通などの通知を行う機能を実装した。加えて、家族の安否確認や簡単なメッセージを残す双方向の情報交換機能も実装した(図3)。

なお、災害の発生していない平常時には、付近の環境情報(温度・湿度や放射線量など)や鉄道の運行情報など、普段の生活に役立つ情報を表示することで、平常時にも省電力なサイネージシステムとして市民にとって有用となるように配慮されている。普段から運用されることで、いざ災害が発生した時にシステムが動作しないといった状況を避ける効果も期待できる。このほか、いざという

時に安否確認をスムーズに行うためのスマートカードの登録を行う画面を持っている(図4)。

3.3 省電力制御と電力情報の表示

防災情報ステーションでは、停電が発生し、バッテリー残量が低下した状況下では、完全な機能を提供する代わりに無線 LAN のアクセスポイントの接続機能や USB 給電機能をオフにするなど、一部のサービスの提供を抑えるなどして電力の消費を抑え、より長時間にわたって重要な防災情報の提供を続けるための省電力メカニズムを提供する。これは、災害によって電力のインフラが喪失した場合であっても、復旧までの数日間にわたり情報通信のインフラを提供し続けることを目的としたものである。

このとき、一部のサービスの提供を停止することで省電力化を行うとき、利用者に現在の防災情報ステーションの電力状況を伝えることは非常に大切であると考えられる。たとえば、バッテリーの残量が著しく減っている状況下で、より優先度の高い人に通信を譲ることや、あまり重要でない通信は控えるといった判断を利用者が納得

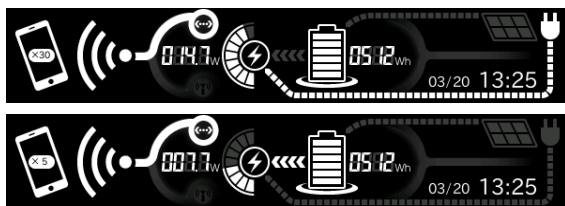


図5 ステータス表示エリアの画面例

の上で行えるよう、状況を理解させるためのユーザインタフェースが重要になる。

これを実現するため、図3の左端の画面を災害時のホーム画面として作成し、接続数や残りの推定稼働時間、充電許容数などを表示するほか、外部電源が失われるなど状況が変化したタイミングでスピーカーを通した通知が行われるようにした。さらに、電力やサービスの状況を利用者が常時把握できるように、画面上部にステータス表示エリアを設け視覚的に分かり易い形での表示を行うようにした。図5にステータス表示エリアの表示例を示す。図5のうち、上の表示例は外部電源が繋がれている状況、下の例は外部電源が失われて充電電池で駆動している状況を表している。ステータス表示エリアの左側は電力の利用状況を示しており、外部からの電力供給が失われたことで無線LANアクセスポイントへの接続端末数が制限されるなどサービスが一部停止され、省電力のモードで動作することを視覚的に分かり易く表現している。

4. システム実装

本研究では、前節で述べた防災情報ステーションのシステムを、組み込みリアルタイムOSのデファクトスタンダードの一つであるT-Kernel 2.0 [8] 上に実装した。ハードウェアには、Samsung S5PC110 (Cortex-A8; 1GHz) をメインのCPUとして搭載した基板を利用している。

システム全体のアーキテクチャは図6に示す通りとなっている。T-Kernel 2.0 上にその拡張である T-Kernel Extension を搭載し、さらにその上位レイヤに EPD 対応の拡張を加えた Qt [9] を配置した構成となっている。アプリケーションシステムは、防災情報ブラウザと呼ばれる特殊なプラグイン拡張を持つウェブブラウザとして実現されており、画面遷移は HTML5 および JavaScript により実現した。

本システムの実装に関して特筆すべき部分には二点あり、EPD での GUI 表示機能の実現部と、TK-PML に基づく省電力制御機能の実現部である。以下、これらの各要素についての具体的な説明を示す。

4.1 EPD 表示制御機能

電子ペーパーディスプレイ (EPD) は、液晶やプラズマ等のディスプレイなど、現在主流の表示器に比べて高い低消費電力や視認性などの優れた特徴を持つことから、電子書籍端末等への採用が進んでいる。これらの特徴は、防災情報ステーションの要件の一つである省電力性能はもちろん、屋外への端末の設置等にも適していることから、本端末では EPD を採用した。

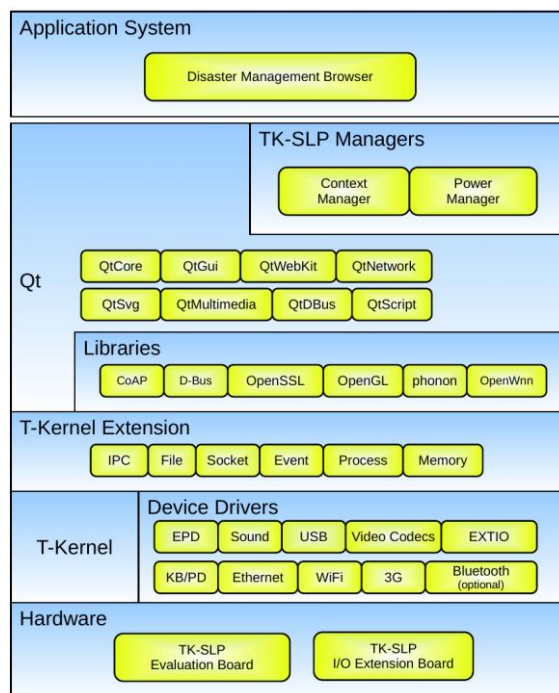


図6 システムアーキテクチャ

一方で、現在主流の電気泳動方式による EPD では、画面の書き換えに数百ミリ秒程度の時間を要するという欠点があり、画面更新速度の点では液晶やプラズマディスプレイ等に劣っている。さらに、残像を消すためには一度完全な白黒反転を行う必要がある一方、白黒反転は見た目が悪く、ユーザの利用感を損ねるという問題点がある。

このことから、EPD の利用にあたっては、ユーザの利用感をなるべく損ねず、なおかつ残像が残らないように、適切なタイミングで適切な画面更新処理を行う必要がある。これを実現するため、本研究では Qt に拡張を加え、EPD 独特の表示制御を行う仕組みを追加した。具体的には、本研究ではスクリーンの実装クラスを EPD 向けに拡張した `QTKernelEPDScreen` クラスを構築し、対応するスクリーンのインスタンスをこのクラスにダウンキャストすることで、同クラスのメソッドを通して細かな EPD 制御が行われるようにした。追加されたメソッドのうち、主なものは以下の通りである。

- `void setAutoRefreshMode(RefreshMode mode, int opt);`
画面の自動再描画の際のモード設定を行う
- `RefreshMode autoRefreshMode(int* opt);`
画面の自動再描画の際のモード取得を行う
- `void refresh(const QRect &r, RefreshMode mode);`
`void refresh(RefreshMode mode);`
画面の手動更新を行う

ここで、`RefreshMode` 型により指定される更新モードには、`Full`, `Partial`, `None` のいずれかが指定できる。`Full` は白黒反転を行う完全な画面更新であり、`Partial` は白黒反

転を間引いた部分更新となる。後者の更新については、引数 `opt` によりどの程度白黒反転を間引くかを指定可能とした。None を指定した場合にはシステムによる自動的な EPD 制御は行われなくなり、アプリケーション側が手動で更新タイミングを制御することとなる。

これらのメソッドを用いて、アプリケーション側では以下のような画面制御を実装した。

- ステータス表示エリアの描画更新は部分更新の設定とし、白黒反転は行わない、すなわちすべての更新を間引く設定とした。
その理由としては、ステータスエリアの表示更新は頻繁であること、状態が変化しても表示位置が決まっているため余計な部分に残像が残らないことが挙げられる。さらに、表示が変化するインジケータ部分は非アクティブ時には元々グレー表示されているため、多少色がずれてもほとんど目立たないことからそのような実装とした。
- 一方、それ以外のアプリケーション表示部分については、すべて完全更新を行う設定とした。ただし、画面更新中のちらつきを抑えるため、内部的に更新開始までに 200 ミリ秒のディレイを設け、一括して描画更新を行うようにしている。
さらに、HTML および JavaScript 側での画面制御の表示タイミングの調整を行うため、ブラウザの拡張機能として、EPD 制御用の JavaScript API を追加した。具体的には、アプリケーション側から、`window.setUpdatesEnabled(false);` を呼び出すことで、次にこの関数が `true` の引数で呼び出されるまで画面更新を遅延させることを可能とし、頻繁な白黒反転による画面のちらつきを避けることを可能にした。

4.2 省電力制御機能

電力インフラが失われた状況下で、内蔵バッテリーによる防災・減災のための情報を提供するとき、短時間の間動画再生等を含めたリッチな情報サービスを提供するよりは、インフラが復旧するまでの長時間にわたって最低限の情報を提供し続けることが目的上望ましい。

これを実現するためには、その時の様々な状況に応じてきめ細かな省電力制御を行う必要がある。これを行うために設計したのが、コンテキストに基づく省電力制御のためのドメイン定義言語「TK-PML (T-Kernel Power Management Language)」である。基本的な考え方は、筆者らによる先行研究 [7] に基づくが、本研究で新たに作成した TK-PML は XML ベースだった記述をより直感的な専用言語化するとともに、マクロとなるルールの記述を可能とすることでその記述力を大幅に高めたものとなっている。

TK-PML による電源制御ルールの記述例を図 7 に示す。図に示されるように、電源制御ルールは `cond` や `match` などの関数型言語に見られる構文を用いた式の列として定義されている。

ルール内に現れる識別子は、“@”で始まるものと“\$”で始まるもの、いずれもつかないものに分けることができ

```
define mode =
  cond {
    $extpower -> "usual"
    | $solar && $batt >= 70
      -> "level_1"
    | $batt >= 50 -> "level_2"
    | $batt >= 30 -> "level_3"
    | true -> "critical"
  }

define @wifi =
  match (mode) {
    "usual" -> {power: true, maxconn: 20}
    | "level_1" | "level_2"
      -> {power: true, maxconn: 5}
    | _ when $batt >= 10
      -> {power: true, maxconn: 1}
    | _ -> {power: false}
  }

define @tsensor =
  $lan && mode = "usual"

define @usbport_b =
  match (mode) {
    "usual" -> true
    | _ -> false
  }

define @webcam =
  $lan && mode = "usual"

define @speaker =
  true
```

図 7 TK-PML の記述例

る。うち前二者は特殊な意味を持っており、“@”で始まる識別子は電力制御対象に対して指定されたアクション、“\$”で始まるものは現在の状況を示す識別子となっている。具体的な例としては、“@wifi”、“@webcam”、“@speaker”はそれぞれ、無線 LAN アクセスポイントへの最大接続可能数、ウェブカメラの電源の ON/OFF、スピーカーの電源の ON/OFF を決定するための名称となっており、これらを式として評価した結果が電力制御ルールの評価結果としてそれを満たすような省電力制御が行われる。一方、“\$”で始まるものの例としては、“\$extpower”、“\$batt”などが挙げられるが、これらはそれぞれ外部電源の供給の有無、バッテリー残量の割合(パーセント)を示す識別子であり、これらの評価結果は現在の機器状態に応じて動的に変化する。

TK-PML の実装については、機器などの状態変化は頻繁であることから、可能な限り効率的にルールを評価することが求められる。例えば、TK-PML の評価を行う際に単純に全てのルールを再評価する方針では明らかに効率が良くない。このため、すべての識別子に対して、再計算が必要かどうかを内部的には識別子ごとに付加されたフラグを元に判断し、必要な場合に再計算を行うようにしている。これは記憶管理におけるダーティフラグに相当する。また、再計算処理を効率化するため、あらかじめルールの評価順序を決定しておき、その順番に基づき単純に再計算を行う方針とした。評価順序は一般的なトポロジカルソートの問題 [10] に帰着し、効率的に計算可能である。

5. 評価

本節では、首都直下地震を想定例として、災害発生による電力インフラの喪失の際にも防災情報ステーションが有効に機能することの検証を行う。

内閣府の被害想定に対する資料 [11] によると、都心西部直下地震(M6.9)の被害最大ケースにおいて、電力ライフラインに対しては地震発生直後に約 180 万軒の停電が発生し、約 3~4 日でその半数が復旧し 6 日後には 9 割以上が復旧すると推定されている。すなわち、概ね 3 日を目安としてサービスを継続できる必要性があると考えてよい。

防災情報ステーションに搭載されているバッテリーの容量は 480Wh である。一般的な 6 インチ液晶ディスプレイでは、通常使用時の消費電力が 5W~10W 程度であるので、ディスプレイによる電力消費のみを見積っても高々 2~4 日程度しか持たないことが分かる。一方、本研究で使用了 6 インチの EPD パネルの消費電力は定常状態で 0.11W、画面更新時に 0.29W の電力消費(いずれも平均値)であり、省電力性能的に優れた性能を発揮することが確認された。

本評価では、外部電力が接続されている場合には全てのサービスを有効とし、停電が発生したときには環境センサ・カメラ・USB 給電を無効にしたうえで、無線 LAN のアクセスポイントを高パフォーマンスなモードから省電力なモードに切り替えるような記述を行い、それぞれの状況下での消費電力を計測した。結果、外部電源を接続した状況下での消費電力が 15.2W、停電発生時の消費電力が 7.1W となることが確認された。これはちょうどほぼ三日間外部からの電源供給なしにシステムを稼働させるのに必要な電力性能である。また、TK-PML を通して状況に応じて無線 LAN のアクセスポイントやカードリーダーの読み取り機能等もオフとすることで、消費電力が 3.0W に削減されることが確認された。この消費電力では、停電の発生から 6 日間にわたってシステムを稼働させることができると試算される。

全体としては、どのような省電力制御ルールを設定するかに依存するが、本システムにより災害時の電力インフラの喪失に対し、状況に応じて最適なサービスを提供しながらも、インフラの復旧までの期間において情報通信サービスを継続して提供できることが確認された。

6. 結論

本研究では災害時のインフラ喪失に対する耐性を持った公共施設向け情報システム「防災情報ステーション」の設計および実装を行った。同システムは、災害発生時において電力および通信インフラが失われた場合にも安定的に情報を提供し続けるように作られており、情報通信技術による防災・減災の助けが得られなくなることがないことを目的とした。

防災情報ステーションの構築にあたっては、内蔵のバッテリーの容量には限りがあることから、電力をどのように効率的に利用するかが重要となる。本研究では、EPD 表示制御機能・TK-PML による省電力機能を新たに導入し、それにより現在の電力供給等の状況に合わせて最適

なサービス提供と省電力化のバランスをとることを可能にした。評価の結果、本システムが防災情報ステーションに求められる省電力性能を実現できることが確認され、本研究の目的の実現に有用であることが示された。

謝辞

本稿は、総務省 PREDICT「超低消費電力組込みソフトウェアプラットフォーム:TK-SLP (T-Kernel Super-Low Power)の研究開発」(平成 23~25 年度)および総務省 ICT 街づくり事業「オープンデータ、ユビキタス技術を活用した市民防災情報流通モデル事業(神奈川県横須賀市)」(平成 25 年度)の研究開発成果の一部を含んでいる。

参考文献

- [1] Twit for you, <http://twitforyou.org>.
- [2] Hack for Japan, <http://www.hack4.jp/>.
- [3] YRP ユビキタス・ネットワーキング研究所, “災害時に役立つ情報を提供する「街角情報ステーション」運用実験開始”, <http://www.ubin.jp/press/pdf/UNL121121-01.pdf> (2012).
- [4] A. B. Dalton and C. S. Ellis, “Sensing User Intention and Context for Energy Management”, in Proceedings of the 9th Conference on Hot Topics in Operating Systems, vol. 9 (2003).
- [5] A. Roy, S. Das Bhaumik, A. Bhattacharya, K. Basu, D. Cook, and S. Das, “Location Aware Resource Management in Smart Homes”, in Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2003), (2003).
- [6] C. Harris, and V. Cahill, “Exploiting User Behaviour for Context-Aware Power Management” in Proceedings of IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2005 (WiMob 2005), (2005).
- [7] Takeshi Yashiro, Tomoki Ban, Shinsuke Kobayashi, Noboru Koshizuka, and Ken Sakamura, “A Framework for Context-Aware Power Management on Embedded Devices”, the 1st IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2012), pp.588-592 (2012).
- [8] T-Engine フォーラム, “T-Kernel 2.0” (2011).
- [9] Qt Project, <http://qt-project.org/>.
- [10] A. B. Kahn, “Topological Sorting of Large Networks”, Commun. ACM 5, 11. <http://doi.acm.org/10.1145/368996.369025> (1962).
- [11] 内閣府, “首都直下地震対策: 被害想定詳細 - 被害想定結果について”, <http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/> (2005)