

マイクロユビキタスノード用ディペンダブルOS の実現へ向けて

徳田英幸 高汐一紀
慶應義塾大学 環境情報学部
独立行政法人科学技術振興機構, CREST
252-8520 神奈川県藤沢市遠藤 5322

中澤 仁 岩井将行 由良淳一
慶應義塾大学 大学院 政策・メディア研究科
独立行政法人科学技術振興機構, CREST
252-8520 神奈川県藤沢市遠藤 5322

無線センサノードのようなマイクロレンジ組込み機器は、実時間性や高度な電力管理機能を持たない、機器固有なオペレーティングシステムなどにより構成されている。このため、マイクロレンジ組込み機器がハイエンド、ミッドレンジ組込み機器と連携して動作する必要のある次世代の社会基盤システムにおいて、システム全体のディペンダビリティが実現できない。我々は、無線センサノードや小型携帯端末のようなマイクロレンジ組込み機器で共通に動作可能な、予測可能性、高信頼性、高安全性、高可用性を持つオペレーティングシステムの基盤を、オープンソース OS である Linux を拡張して実現する。同基盤を提供することにより、それらの機器を相互接続したアプリケーション開発の容易化と、それらのアプリケーションにおけるディペンダビリティを提供する。Linux をベースとすることにより、既存アプリケーションの流用や新規アプリケーション開発の容易化が可能となる。

A Research Project on Dependable Operating System for Micro Ubiquitous Nodes

Hideyuki Tokuda Kazunori Takashio
Faculty of Environmental Information, Keio University
JST-CREST
252-8520 5322 Endo Fujisawa Kanagawa, JAPAN

Jin Nakazawa Masayuki Iwai Jun'ichi Yura
Graduate School of Media and Governance, Keio University
JST-CREST
252-8520 5322 Endo Fujisawa Kanagawa, JAPAN

Micro range embedded nodes, such as wireless sensor nodes and tiny mobile nodes, are required to coordinate with high-end or mid-range embedded nodes to create sophisticated applications in the next generation ubiquitous environments. However, due to the lack of real-time and power management functionalities in the latest micro range embedded nodes, the applications would not be able to achieve dependability. We consider high availability, security, reliability and predictability are essential needs in the operating systems layer to achieve adequate dependability in practical applications. We started a project to build an operating system for micro ubiquitous nodes to enable next generation ubiquitous applications to provide users with high dependability. We provide the operating system by extending Linux OS, which ensure reuse of existing applications and ease of application development on it.

1 はじめに

ネットワーク接続可能な情報家電機器や無線センサノード、携帯電話や PDA 等の携帯型計算機等の研究開発により、組込み機器の小型化と高度化が進んでいる。その一方で、無線センサノードのようなマイクロレンジ組込み機器は、実時間性や高度な電力管理機能を持たない、機器固有なオペレーティングシステムなどにより構成されている。このため、マイクロレンジ組込み機器がハイエンド、ミッドレンジ組込み機器と連携して動作する必要のある次世代の社会基盤システムにおいて、システム全体のディペンダビリティ[5]が実現できない。この問題に対して、我々は、次世代社会におけるユビキタスシステムやユビキタスアプリケーションのディペンダビリティ向上を目的として、マイクロレンジ組込み機器で共通に動作可能な、実時間性、高信頼性、高安全性、高可用性を持つオペレーティングシステムを、オープンソース OS である Linux を拡張して実現する。同 OS をセンサノードや情報家電機器などの組み込み機器に搭載することにより、それらの機器を相互接続したアプリケーションにおけるディペンダビリティの向上が可能となる。また、Linux をベースとすることにより、既存アプリケーションの流用や新規アプリケーション開発の容易化が可能となる。

本稿では、まず、本研究の課題と目標、アプローチを明らかにし、具体的な 3 つの研究課題について述べる。次に、本研究が想定する応用範囲と関連研究を示す。なお、本研究は、独立行政法人科学技術振興機構 CREST の支援により行われる。

2 マイクロユビキタスノードとそのディペンダビリティ

2.1 マイクロユビキタスノード

我々はこれまで、多様なセンサノードを用いたシステムソフトウェアやアプリケーションに関する研究を行っている。その中では、Mica MOTE を用いた並列分散コンテキスト推論のためのシステムソフトウェアや、uParts を用いた現実空間オブジェクトのための新しいサービス構築機構を開発している。また、乾電池 d-uLinux モバイルノードのごく初期的なプロトタイプとして、

板ガムサイズの 1 ボード Linux コンピュータを使用して、ユビキタスコンピューティングのための核となるノード (uCore) や、携帯利用を前提とした組込みセンサノード@reader (図 1) の試作開発を行ってきている。これらの機器は、PDA や携帯電話のような小型携帯端末よりもさらに小さく、また CPU やメモリ等の計算資源に関する制約も強い。さらに、これらの機器は小型携帯端末が搭載するよりも低容量の電池で駆動されるという特徴がある。一方でこれらの機器は、現実空間の情報や利用者の情報を取得し、コンテキストを抽出するために用いられる一次的な機器であるため、ユビキタスコンピューティングには不可欠のものである。従って我々は、このような特徴を持ったマイクロレンジ組込み機器を、マイクロユビキタスノードと呼ぶ。

2.2 ディペンダビリティ

マイクロユビキタスノードに関するこれまでの研究では、主に無線センサノードをターゲットとして行われている。その中では特に、センサノードの低消費電力化や現在の電力残量に基づく適応的処理などが行われている。これに対して本研究の特徴は、マイクロユビキタスノードにおける解析・予測可能性を高め、結果としてシステムのディペンダビリティを高めることにある。たとえば、既存の無線センサノードでは、センサ情報を周期的に無線ネットワークに送信するタスクを与えたときに、そのタスクが存続する時間を予測する仕組みは存在しない。このため既存のユビキタスアプリケーションは、センサノードの電力枯渇により予期せず停止する可能性が高い。さらに、そうした周期的なタスクに対する時間制約の設定や、そのタスクの周期的実行をより確実にするための資源予約などの機構は、既存のマイクロユビキタスノードでは提供されていない。このため、複数のセンサノード間での同期が困難となり、シンクノード上では取得時間の異なる複数のセンサ情報を組み合わせ、信頼性の低いコンテキストを抽出することとなる。結果として、ユビキタスアプリケーション全体の信頼性が低下する。

2.3 ディペンダブルマイクロ Linux

本研究では Linux に対して、(1) 実時間制御機構、(2) 電力管理・予測機構、および (3) 耐フラ



図 1: 携帯型組み込みセンサノード@reader

ジャイル通信支援機構を提供するための拡張を行い、より予測・解析可能な LinuxOS を実現する。特に、乾電池数本の大きさで実装された組み込みノード(乾電池ノード)を主要ターゲットとし、その上で動作するタスクの時間的予測、そのノードが消費する電力の予測、および不安定なネットワーク上でのディスコネクテッド・オペレーションを可能とする。これにより、マイクロユビキタスノードを、乾電池数本で、時間と場所を問わず多用途にかつディペンダブルに実用できるようにする。このような観点で、本研究で実現する拡張 Linux オペレーティングシステムをディペンダブルマイクロ Linux (d-uLinux) と呼ぶ。また、d-uLinux を搭載し、乾電池で実行可能なハードウェアプラットフォームを「乾電池 d-uLinux ノード」と呼ぶ。家庭やオフィスでのコンテクストアウェアなアプリケーション、ホームセキュリティシステム、白物家電機器の情報家電化などの活用だけでなく、屋外での環境モニタリングや安全見守りシステムなどの構築と、他チームの Linux システムとのインタオペラビリティを保証しながら、ディペンダブルな応用システムを構築することが可能となる。

3 研究課題

本研究の主要な課題は、図 2 左側に示す、乾電池ノード上で動作する d-uLinux のための実時間機能、電力管理・予測機能、および耐フラジャイル通信支援機能の開発である。以下に、各研究課題について詳述する。

3.1 実時間機能

センサノードを用いた周期的な空間コンテクストの抽出や、特定空間のコンテクストを移動中の利用者がモバイル機器からアクセスするような場合、それらの処理には時間的制約が伴う。

たとえば、複数のセンサノードから得られるデータを、ベイズ推論や一階述語論理等により解釈する場合、それらのセンサデータの生成時間の差がある閾値を超えると、異なる時点のセンサデータを互いに比較することになるため、抽出するコンテクストの信頼性が低下する。また、空間のコンテクストに基づいて、利用者のモバイルノードにアクチュエーションする場合、利用者の移動速度がコンテクスト情報の伝播速度を上回ると、アクチュエーションが失敗する。センサノードでは、メモリ容量やネットワーク帯域、あるいは CPU 処理能力や電力をはじめとする計算資源が限られているため、負荷により時間制約を満たせなくなる可能性が、通常の Linux ノードよりも高くなると考えられる。

本研究では、乾電池数本の大きさで実現された Linux ノード(乾電池ノード)を対象として、その上で動作するアプリケーションに対して、資源割り当てとその確実性を保証するために、Linux を拡張する。この拡張により、計算資源を抽象化したリソースセットを用いた資源予約、実時間周期スレッド、実時間通信、および変更を伴わずに既存アプリケーションからこれらの機能を利用するためのラッパを提供する。

具体的には、Linux カーネル 2.6 を当初の対象とし、カーネルのソースプログラムを改変せずに拡張部分をカーネルモジュールとして実装する。拡張方式として、米国カーネギーメロン大学の Linux/RK が用いた方式をベースとして、それを乾電池ノードの特性に応じて拡張する。拡張機能は、C 言語による API もしくは Java 言語によるラッパ API を用いて、ユーザ空間のアプリケーションから呼び出せる。これらの拡張機能の評価には、本節冒頭に記述した(もしくはそれ

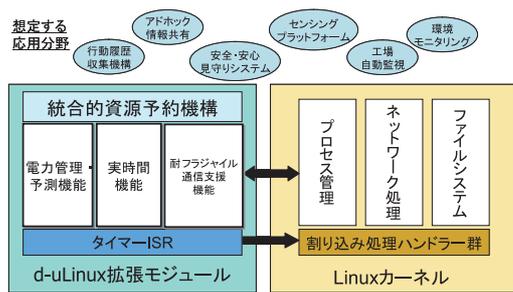


図 2: アーキテクチャ

に類する) シナリオを想定する。具体的には、各種環境情報センサや、カメラ・マイク等のマルチメディアセンサを搭載した乾電池 d-uLinux センサノードと、利用者が携帯する乾電池 d-uLinux モバイルノードを用いる。以上により本研究課題では、実時間処理技術が欠如している現在のセンサノードやモバイルノードに対して、同技術を有する d-uLinux を適用し、それらの信頼性を向上させる。

3.2 電力管理・予測機能

センサノードを日常空間内に配置して空間コンテキストを抽出する場合、それらのノードに対する恒久的な電力提供は困難である。たとえば旅行等で留守中の自宅の状態監視(たとえば侵入者検知など)を行う場合、玄関扉や門柱に配置したセンサノードに対して電力線を設置することは現実的ではない。また、冬季の山岳で雪崩の検知を行う場合、山岳部に配置したセンサノードに対して電力線を設置することは不可能に近い。従って、これらのノードは電池で駆動することが望ましく、また、電池の継続時間について一定期間(上記の例では1週間あるいは数ヶ月間)の動作継続が機能要件となる。また、利用者が携帯するモバイルノードにおいても、朝出勤して夜帰宅するまでの間は同様の要件が存在する。これに対して、現在のセンサノードやモバイルノードには、そうした要件を記述したり、それらを予測する仕組みが存在しない。

本研究では、乾電池数本の大きさで実現された Linux ノード(乾電池 d-uLinux ノード)を対象として、その上で動作するアプリケーションに対して、電力資源に関する要件を記述する仕組みと、記述された要件を保証する機構、および変更を伴わずに既存アプリケーションからこ

れらの機能を利用するためのフレームワークを提供する。具体的には、上述の資源割り当て機構に電力管理・予測機能を追加し、プロセスごとの消費電力量のプロファイリング、消費電力量のエンフォースメント、電力の予約、および電力持続時間の予測を可能とする。以上により本研究課題では、電力管理技術や予測技術が欠如している現在のセンサノードやモバイルノードに対して、同技術を有する乾電池 d-uLinux を適用し、それらの信頼性を向上させる。

3.3 耐フラジャイル通信支援機能

乾電池 Linux ノードは小型であるために、ユーザが屋外等に持ち運んで利用することが想定される。そういった環境にある小型ノード間は、24時間のうち、極端に短時間しか下流のノード(データ集約サーバ等)と通信を実現できない。また通信中であっても任意のタイミングで切断されてしまう可能性がある。こういった環境下では、通信は極端にフラジャイル(不安定)であり、遅延を犠牲にしても、安定性、信頼性のある機能が必要である。上記の課題を解決するために耐フラジャイル通信支援機能として優先度付データ配送機能、リンク切断/再開に伴う通信量制御機能、データチャンク一定量保持機能の3つの機能を持たせる。図3に、本機能の概念図を示す。図4に本機能の構成を示す。

優先度付データ配送機能

乾電池ノードのセンサデータ等のデータの集まりをデータチャンクとよぶ。データチャンクは重要度に応じて、Priority 通信と non Priority 通信に分けられる。Priority 通信は、データチャンクの配送で優先され、またリンク切断時にも Message Storage に一定時間保存し、リンク再接続時の再配送を保証する。Non Priority 通信の場合はリンク切断時にはデータが破棄される可能性が高い。

リンク切断/再開に伴う通信量制御機能

リンク切断や再開を検知すると、各ノードは上流のノードに対して通信量(data flow)の制限や開放を行うことができる。本機構を Back-Pressure メカニズムと呼ぶ。BackPressure メカニズムでは、さらに上流のデータ転送ソースを特定し、ソースのデータチャンクの転送頻度をコントロールすることを可能とする。

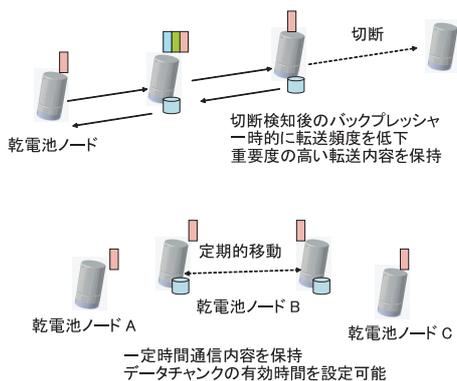


図 3: 耐フラジャイル通信支援機能

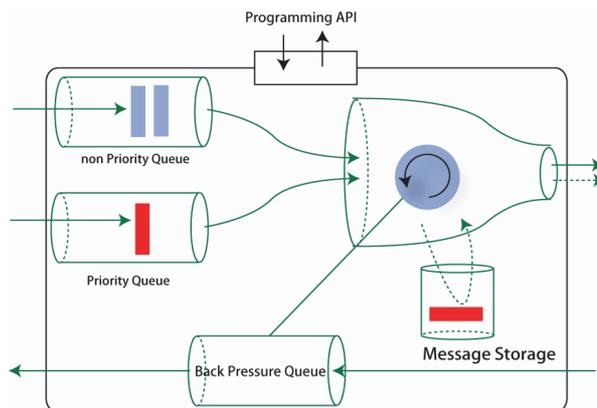


図 4: 耐フラジャイル通信支援機能の構成

データチャンク一定量保持機能

下流のノードとのリンクが切断してしまった場合、下流ノードに対してデータ転送を行わない場合は、一定時間優先度の高いデータチャンクを保持できる機能である。通信開始時にあらかじめデータチャンクの有効期限 ExpireTime を設定する。この ExpireTime に基づいて通信内容を再接続時まで保持し、フラジャイルな通信環境になっても信頼性を確保する。

4 対象とする応用分野

図 5 に、本研究で対象とする応用分野の俯瞰図を示す。主要な分野として、無線センサノードへの応用、情報家電機器への応用、および携帯端末への応用を考える。

4.1 ディペンダブルセンサネットワーク

Mote や Smart-Its, MITES をはじめとする無線センサノードの開発が相次いでいる。しかし、これらのノードは特殊なオペレーティングシステム(あるいはそれに類する基本ソフトウェア)を搭載している上に、アプリケーション開発に際しては特殊な言語や特殊な開発環境が必要となる。結果として現在、それらは限定的なシナリオでのみ利用されている。

本研究では、d-uLinux を無線センサノードに応用した「乾電池 d-uLinux センサノード」を想定し、研究期間中にそれを開発する。同ノードは、各種環境情報センサや、位置情報センサ、あるいはカメラやマイクのようなマルチメディアセンサが接続された乾電池 d-uLinux ノードである。無線センサノードを d-uLinux で駆動することにより、socket インタフェースに基づくセン

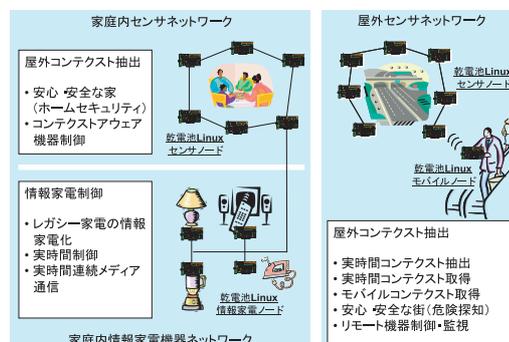


図 5: 応用分野の俯瞰図

サデータの送受信等が可能となり、アプリケーション開発が容易になる。また、本研究が提供する実時間機能により、複数センサ間での同期や、実時間性を伴った通信が可能となる。d-uLinux の電力管理・予測機能は、センサノードに与えられたタスクに適応的に省電力化と電力消費の予測を可能とする。

4.2 ディペンダブルホームネットワーク

近年になっていくつかなの家電機器がネットワーク接続可能になっているものの、全家電製品中でそうした製品の占める割合はほとんど上昇していない上に、そうした製品に対する需要は依然として低い。すなわち、ネットワークに接続できない家電機器が、今後しばらくの間は多数存在すると考えられる。こうしたレガシーな家電機器は、ネットワーク接続機能を持ったアダプタを何らかの形で付与することにより、「情報家電化」できる。ECHONET 規格においても同様の試みがなされたが、同規格の普及は進んで

いない。

本研究では、d-uLinux を情報家電アダプタに応用した「乾電池 d-uLinux 情報家電ノード」を想定し、研究期間中にそれを開発する。乾電池 d-uLinux 情報家電ノードは、レガシー家電機器の状態変化をネットワーク上の他の機器に通知したり、レガシー家電機器の基本的な制御をネットワーク経由で可能としたりするためのアダプタである。たとえば洗濯機を例にとると、振動センサを接続した乾電池 d-uLinux ノードを貼り付けることによって、洗濯の開始や終了を検知して、ネットワーク越しに通知可能となる。また同ノードを介して電力線を接続することによって、洗濯機の電源制御が可能となる。また、上述した乾電池 d-uLinux センサノードを家庭内に埋め込めば、家電機器と室内センサの連携が可能となる。乾電池 d-uLinux センサノードと同情報家電ノードは双方とも Linux オペレーティングシステムを搭載したノードであるため、上記の連携を創出するアプリケーションは容易に開発できる。

4.3 ディペンダブル移動コンピューティング

私的空間や公共空間を問わず、上述したセンサノードから得られるコンテキスト情報や、情報家電ノードを介した機器制御が、利用者の携帯するノード上で活用できることが望ましい。本研究では、d-uLinux を携帯機器に応用した「乾電池 d-uLinux モバイルノード」を想定し、研究期間中にそれを開発する。図 2 に、同ノードのイメージを示す。同ノードは、RFID リーダや環境情報センサ、加速度センサ、ロータリーエンコーダ等を搭載し、単一乾電池程度の大きさである。同ノードを携帯して乾電池 d-uLinux センサノードが敷設された場所を通過する際には、同センサノードからその場所のコンテキスト情報が得られる。このとき、本研究が提供する d-uLinux の実時間機能を用いて、受信するコンテキスト情報を利用者の移動速度に応じて実時間処理する。また、d-uLinux の電力管理・予測機能は、ボタン電池数個で乾電池 d-uLinux モバイルノードを長時間動作させるとともに、限られた電力で動作可能な時間を予測する。同ノードは、ロータリーエンコーダの回転やクリックによって、乾電池 d-uLinux 情報家電ノードが付与

された家電機器を制御できる。

5 関連研究

実時間機能に関しては、これまで、既存のセンサノードに関する研究開発 (Mica MOTE[9] や Smart-Its, uParts[10] など) において、実時間性や信頼性あるいはアプリケーションのポータビリティが考慮されてこなかった。たとえば uParts では、センサデータの読み込みや加工、ネットワークへの送信を順番に行うループが 30 ミリ秒周期で動作している。センサデータの加工部分はプログラマが変更可能である。しかし、周期は固定であるため、加工ロジックが大きすぎるとネットワークへの送信が行えなくなる。Mica MOTE では、Tiny OS と呼ばれる基本ソフトウェアが動作しているが、実時間制約を持つアプリケーションは記述できない。Smart-Its も同様である。また、センサノードに対応したオペレーティングシステムに関する研究でも、上述の Mica MOTE 上の TinyOS が一般的であるものの、優先度スケジューリングや実時間通信などの機能を提供するものではない。たとえば FreeRTOS[2] や XMK[1], picoOS[3], PicOS[4] をはじめとするマイクロレンジ組込みプラットフォーム向けオペレーティングシステムにおいても、限定的な実時間機能の提供はあるものの、電力管理機能や高度な資源管理機能は提供されていない。これに対して本研究では、マイクロレンジ組み込みプラットフォームに実時間機能、資源予約機能、電力管理・予測機能を実現して、その予測・解析可能性を高める点が特徴である。さらに、これらの機能はコモディティ OS (Linux) の拡張として実現するため、アプリケーションのポータビリティを容易に実現できる。

電力管理・予測機能に関しては、これまで、デスクトップ計算機やラップトップ計算機を対象とした多くの研究がなされてきた。ACPI[12] は、このような電力利用特性を持つ X86 互換プラットフォームを主要ターゲットとした電力管理規格であり、多くのコモディティ OS にて実装されている。また、計算機を構成する各コンポーネントにおける消費電力量を削減するための研究も多く存在する [7, 8, 15]。これに対してセンサノードに代表される乾電池 d-uLinux ノードでは、ディスプレイやハードディスクドライブを持たな

いため、通常の計算機の電力利用特性 [17, 9] と異なり、ネットワークインタフェースやメモリ・CPU に要する電力量が相対的に増加する。従って本研究が対象とする乾電池ノード上では、新しい電力管理機構の研究開発が必要である。本研究で実現する電力管理・予測機能の特徴は、アプリケーションの明示的な指示により、必要のないハードウェア機能の電源を切るといった、アプリケーションウェアネスを提供する点である。既存研究に見られる省電力に最適化したスケジューリングのような高度な機構に加えて、アプリケーションの明示的な指示に基づくシンプルな機構を提供し、各ノードの電力消費をより最適化する。また、アプリケーションウェアな電力管理・予測機構では、特定の小型電池駆動ノードと特定のアプリケーションが指定された際に、そのノードが与えられた電力で動作できる時間の予測や保証が可能となる。

耐フラジャイル通信支援機構に関しては、デスクトップやラップトップ計算機を対象としたディスクコネクテッド・オペレーション [13] に関する研究が行われてきている。また、小型携帯ノードによるアドホックネットワークにおける不安定な通信路のための通信機構に関する研究がある [6, 18]。これらの研究では、ネットワークの切断と再接続に対処できるメカニズムを主に提案している。本研究課題では、より小型なマイクロレンジ組込みプラットフォームにおいて、短期から長期の切断に柔軟に対応できるメカニズムを実現する。すなわち、d-uLinux では、マイクロレンジ組込みプラットフォームにおいて、通信路が安定している間は実時間機能を用い、不安定・もしくは故障した際には、本研究課題中の通信量制御機能やデータチャンク一定量保持機能を用いる。これにより、中継ノードの故障や移動などで寸断されたマルチホップセンサネットワークにおいても、システムの再起動を伴わずに、再接続後の再送が可能となる。また、センサネットワークの研究において、シンク（通知先）に向かって転送パスを決定しデータ伝播していく手法 Directed Diffusion [11] が考案されている。しかし中継ノードの不安定な通信状況やデータのフラグディングには適応しにくいと言われている。われわれの手法は、優先度

を付けてデータ通信のフラグディングを抑制し、通信量をバウンドして時間をかけても中継ノードの不安定要因に依存せず、優先度をつけた通信を実現できる。センサネットワークのデータベース TinyDB [14] などデータ収集頻度を設定することでセンサノードの負荷を下げるのが可能である。しかしセンサノードの欠損や接続されていない時間のデータ転送考慮されていない。耐フラジャイル通信機構は内部にデータを一定時間保持する機能を設けている。実機での実装はないが、シミュレーションでアドホックネットワーク上でデータを効率的に複製していく研究 [16] もある。しかし、複製をしていくだけでは通信量の増大に対して、ノード内部の記憶領域に限界があるため、効率的な破棄を含めたデータ管理と通信が必要である。耐フラジャイル通信機構は優先度と有効時間をつけデータの破棄を行うため限られた記憶資源を有効活用できる。

6 おわりに

本稿では、マイクロピキタスノード用ディペンダブル OS の実現へ向けた研究プロジェクトの目的と概要、実現手法について述べた。本研究プロジェクトは今年度より 6 年間の予定で実施され、d-uLinux オペレーティングシステムをはじめとする本研究の成果は、組込み機器における実用化を目指すと共に、広範囲での普及を目的としてオープンソース化する。独立行政法人科学技術振興機構 CREST で本研究プロジェクトが属する領域では、我々のほかに複数の機関が研究に参加している。本研究プロジェクトの成果は、他の機関の成果と統合され、領域全体の成果としてまとめられる予定である。今後、同領域のスタートアップとして平成 18 年 12 月 21 日には公開シンポジウムも予定されており、また領域全体のウェブページも構築される予定である。本研究の成果は、それら等を通じて逐次報告していく予定である。

参考文献

- [1] extreme minimal kernel. <http://www.shift-right.com/xmk>.
- [2] A free rtos for small embedded real time systems. <http://www.freertos.org>.
- [3] pico|os. <http://picoos.sourceforge.net>.
- [4] E. Akhmetshina, P. Gburzynski, and F. Vizeacoumar. Picos: A tiny operating system for extremely small embedded platforms. In *Proc. of ESA '03*, pages 116–122, June 2003.
- [5] A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell, and C. Landwehr. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Trans. on Dependable and Secure Computing*, 1(1):11–33, Jan. 2004.
- [6] K. Fall. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. In *Proc. of ACM SIGCOMM 2003*, Aug. 2003.
- [7] M. Gowan, L. Biro, and D. Jackson. Power considerations in the design of the alpha 21 264 microprocessor. In *Proc. of Design Automation Conf.*, pages 726–731, June 1998.
- [8] E. Harris. Technology directions for portable computers. In *Proc. IEEE*, vol. 83, pages 636–657, Apr. 1996.
- [9] J. Hill and D. Culler. A wireless embedded sensor architecture for system-level optimization, 2001.
- [10] L. Holmquist, F. Mattern, B. S. ad P. Alahuhta, M. Beigl, and H. Gellersen. Smart-its friends: A technique for users to easily establish connections between smart artefacts. In *Proc. of UBIComp 2001*, Sept. 2001.
- [11] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva. Directed diffusion for wireless sensor networking. In *IEEE/ACM Transactions on Networking, Volume 11, Issue 1*, pages 2–16, Feb. 2003.
- [12] Intel, Microsoft, and Toshiba. Advanced conguration and power interface specification. Dec. 1996.
- [13] J. J. Kistler and M. Satyanarayanan. Disconnected operation in the coda file system. In *Proc. of Thirteenth ACM Symposium on Operating Systems Principles*, Feb. 1992.
- [14] S. Madden, M. F. abd J. Hellerstein, and W. Hong. Tinydb: An acquisitional query processing system for sensor networks. In *ACM The Transactions on Database Systems (TODS) Volume 30 , Issue 1*, pages 122–173, Mar. 2005.
- [15] M. Stemm and R. Katz. Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices. In *IEICE Trans. Commun.*, vol. E80-B, pages 1125–1131, Aug. 1997.
- [16] T.Hara, N.Murakami, and S.Nishio. Replica allocation for correlated data items in ad-hoc sensor networks. In *ACM SIGMOD Record, Vol.33, No.1*, pages 38–43, Mar. 2004.
- [17] S. Udani and J. Smith. The power broker: Intelligent power management for mo-bile computing. In *Technical report MS-CIS-96-12, Dept. of Computer Information Science, University of Pennsylvania*, Dec. 1996.
- [18] W. Zhao, M. Ammar, and E. Aegura. A message ferry approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks. In *Proc. of ACM MobiCom '04*, pages 187–198, Sept. 2004.