

平成 21 年 6 月 26 日現在

研究種目：若手研究(スタートアップ)  
 研究期間：2007-2008  
 課題番号：19800053  
 研究課題名(和文)センサネットワークシステムにおける QoS アウェアな低電力リソーススケジューリング  
 研究課題名(英文)QoS-aware low-power consumption resource scheduling for sensor network systems  
 研究代表者  
 原田史子(Harada Fumiko)  
 立命館大学・情報理工学部・助教  
 研究者番号：30454515

研究成果の概要：センサネットワークに類似した性質を持つリアルタイムシステムにおいて、タスクの実行結果の品質保証と消費電力削減のトレードオフを考慮したスケジューリング手法を提案した。さらに実際のセンサネットワークにおける本手法の適用性を調査するため、防災目的で使用されているセンサネットワークシステムにおける消費電力の変動を実験し、センサノードの電源寿命を予測するシミュレータを開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,360,000	0	1,360,000
2008 年度	1,350,000	405,000	1,755,000
総計	2,710,000	405,000	3,115,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：QoS アウェア、低電力リソーススケジューリング、センサネットワーク

## 1. 研究開始当初の背景

リアルタイムシステムとは、外界から到着するタスクの実行結果が、実行のタイミングに影響されるようなシステムである。各タスクはデッドラインなどの時間制約を持っており、デッドラインまでに実行完了しなければ、より品質の低いサービスしか提供できない。ワイヤレスセンサネットワーク上で、サービスを提供するために各センサノード上で行われるデータの収集や送受信がその一例である。センサノード上でタスクを実行するために CPU、メモリなどの計算リソースが必要であるが、コスト面から高性能の計算

リソースを利用できない場合も多い。その結果十分なリソースが得られず、時間制約を守れないという過負荷状態が生じる。過負荷状態を回避するために、タスクの通信レートなどのサービス品質(Quality of Service、QoS)を落とすことで実行に必要なリソース量を減らし、リソース制約と時間制約を保証する QoS アウェアなリソーススケジューリングが研究されている。

リアルタイムシステムの一つに、近年ますます重要度が増しているワイヤレスセンサネットワークのセンサノードがある。ワイヤ

レスセンサネットワークは、近年注目されているユビキタスコンピューティング技術を用いたホームセキュリティなどに役立てられる重要な技術である。ワイヤレスセンサネットワークの利点を生かせる分野のひとつが、地震や地盤沈下予測などの防災、災害時の人命救助である。多数のセンサが災害の起こりうる場所や現場に設置され、ユーザはセンサからの情報を収集することで例えば地震がどこで起こりうるか予測する。ワイヤレスセンサネットワークを用いた防災・人命救助に関わる技術の必要性は今後益々高まっていくと考えられ、そのためワイヤレスセンサネットワークで実現されるリアルタイムシステムのリソーススケジューリング手法開発は不可欠といえる。

## 2. 研究の目的

センサネットワークを用いたシステムのリソーススケジューリングでは、(a)消費エネルギーをなるべく少なくすること、(b)頻繁に変動する外部環境に応じて適切なリソーススケジューリングを行えることを考慮しなければならない。研究代表者らは過去、タスクの実行に CPU 時間のみが必要とされる場合に、適応的に QoS の公平性を達成する動的リソース配分制御をフィードバック制御理論に基づいて提案した[1]。また動作周波数を下げることによって消費電力を動的に調整する Dynamic Voltage and Frequency Scaling(DVFS)方式 CPU 上で動作するリアルタイムシステムを対象として、QoS を公平化すると同時にタスク集合全体で消費されるエネルギー量をなるべく少なくするような各タスクへの CPU 配分と実行時の CPU 周波数割当てを求めるリソース配分手法を提案した[2]。前者は外部環境に適応したリソーススケジューリングを行えるが、(a)について

は考慮していない。反対に後者は消費エネルギーを抑えることはできるが、(b)については考慮していない。そこでまず、両者のリソーススケジューリング手法を組み合わせで発展させ、両者の特徴を合わせもった図1のようなリソーススケジューリング手法を提案し、さらに実際のワイヤレスセンサネットワークに実装して検証する。

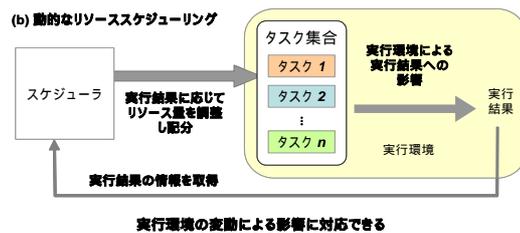


図1: スケジューリング手法の概念図

[1] Harada et al., IEEE Transactions on Computers, Vol.56 no.3, pp.344-357, 2007.

[2] 原田ほか, 電子情報通信学会和論文誌, Vol.J89-D, No.9, pp.1954-1962, 2006年

## 3. 研究の方法

研究は次の二段階の目標を定め遂行した。

(1) センサネットワークに適した QoS Aware な低消費エネルギーリソーススケジューリングの提案

(2) 実際のワイヤレスセンサネットワークシステムへの提案手法の実装と検証

平成 19 年度では(1)を目標として研究を行い、平成 20 年度には(1)の改善と(2)を目標とした。(1)(2)の詳細を述べる。

(1) QoS の公平性を保証する動的な低消費エネルギーリソーススケジューリング手法を提案する。参考文献 2 では、全てのタスクの時間制約を守りつつ QoS の公平性を保証するという制約のもとで、消費エネルギーの最大化と QoS レベルの最大化をトレードオフできるリソーススケジューリン

グ手法を提案した。しかしながらこの手法は静的なものであり、全てのタスクのリソース要求-QoS 特性やCPUの消費電力特性を得たうえで最適なスケジューリングを設計時に予め計算する手法である。図1(a)に示すように、実際にはタスクの実行結果は実行環境の変動に影響を受けうるが、静的なスケジューリングではこれを考慮しないため、環境が変動した場合に適切なスケジューリングを行いにくいという欠点がある。そこで図1のような動的スケジューリングを行うことを考える。動的スケジューリングにおいては、スケジューラはシステム動作時にタスクの実行結果に応じてタスクへのリソース配分を調整する。そのため環境の変動によって実行結果が変化する場合でも、適切なスケジューリングを行うことが出来る。またこれまでの研究においては全てのタスクが同程度の品質のサービスを提供することを前提としていたが、実際のシステムにおいては、状況によってタスクの優先度が異なる場合がある。この場合、あるタスクは優先的に実行されるべきだが他のタスクは低いサービス品質を提供してもよい、ただし同じ程度に重要なタスクに対しては同品質で実行するべきという要求、即ちタスクの重要性に応じた QoS の公平性を考える必要がある。これは、タスク  $i$  の相対的な重要度を  $w_i$  (重要なタスクほど大きい値をとる)、QoS を  $Q_i$  とすると、相対重要度に応じた QoS の公平性

$$\text{式(1): } Q_1/w_1 = Q_2/w_2 = \dots = Q_n/w_n$$

が保証されるようにリソーススケジューリングを行うことを意味する。センサネットワークにおいては、センシングされた状況に応じて動的に適切なデータ選択し送受信することが求められることから、以上の手法が有効と考えられる。

(2) (1)で提案したリソーススケジューリング手法を、ワイヤレスセンサネットワークを用いた実際のシステムに実装することで、提案手法の有効性の検証や改善に役立てる。対象となるシステムは、ワイヤレスセンサネットワークを用いた斜面の地滑り予測システムである。このシステムは山の地滑りを起こしそうな斜面にワイヤレスセンサを多数設置し、各センサノードが雨量や地表変動量などの情報を取得・送受信することで山の地滑りの発生や規模を予測する。本システムはセンサノードが外部環境の変動が激しい場所に設置されること、センサ寿命のため低消費エネルギー性が特に求められること、研究レベルではなく実用可能なシステムの構築を行っていることなどから、実際のシステムを通じた提案手法の検証・改善に適しているといえる。

研究遂行にあたっては、まず上記システムの運用形態やセンサノードに求められる性質について調査を行った。提案手法をセンサノードに実装する前段階として、センサノードの消費電力の変動について実験を行った。この結果から(1)のスケジューリング手法の適用可能性を検討し、実装を目標として諸実験をさらに進める。まずセンサノード単体で低消費電力要求を満たせるか検証する。検証作業により、(1)の段階ではわからなかった実際の問題を把握し、提案手法をより実際のシステムに適した形に改善するのに役立てる。

#### 4. 研究成果 (平成 19 年度)

センサネットワークシステムを含む、CPUの電圧を動的に変更する機構を持つリアルタイムシステムに対して、QoS アウェアな低消費エネルギーなリソーススケジューリングを提案した。実際のセンサノードについて

調査した結果、各センサデータの重要度が動的に変化するのに加えて、消費エネルギーと QoS のどちらを重視するかが変わりうるという知見が得られた。これは、例えば防災を目的とするセンサネットワークにおいて、センサデータが危険や異常の兆候を示している場合は、消費エネルギーの大きさよりもデータを速やかに送信し QoS の高さを保証することが求められるが、安全時・平常時は消費エネルギーの抑制の方がより重視されることなどに拠る。このことから、QoS の重要度に応じた公平性を保証するという制約のもとで、消費エネルギーの最大化と QoS の最良化をトレードオフできる動的なリソーススケジューリング手法を提案した。提案手法の概要は次の通りである。消費エネルギーと QoS の重要度をそれぞれ  $W_E$ 、 $W_Q$  と置いたとき、スケジューリング問題は次のように記述される。

**入力:** タスク、CPU の諸パラメータ

**出力:** タスクの最適 CPU 配分、CPU 速度

**目的関数:**  $W_E \times$  (タスク実行時の消費電力)  
 $+ W_Q \times$  (タスクの QoS 値) の最小化

**制約:** CPU 利用率制約、QoS の公平性制約

本手法では、(1)システムに何らかの変化があったとき、例えば消費エネルギーと QoS の重要度の変化や、各タスクの重要度の変化が起こったときに、最適な CPU 配分および CPU 速度 (以降最適リソース配分と表記する) を速やかに再計算すること、および(2)タスクのリソース要求-QoS 特性が詳しく分からないことを想定した上記スケジューリング問題の解法が求められる。そこでスケジューリング問題を(1)目的関数を最小化する最適な QoS 値と CPU 速度の計算、および、(2)最適な QoS を達成する各タスクの CPU 配分の求解に分け、図 1(b)のアーキテクチャに従って両計算を繰り返し行うことで、少ない

オーバーヘッドでシステムの変動に追従して最適リソース配分を達成できる解法を提案した。

提案手法では、3. 研究の方法で示した式(1)において全てのタスクの重要度  $W_i$  が同値であることを想定している。ただし、タスク間で重要度  $W_i$  が異なる場合にも一般化できる。本手法では提案手法の計算量はタスク数  $n$  に対して線形オーダー  $O(n)$  であり、動的な重要度の変化に追従してリソース配分を再計算するさいの計算量が小さいといえる。提案手法のシミュレーション実験を行ったところ図 2 のような結果が得られ、両者を適切にトレードオフできるという結果が得られた。本成果は 2008 年 11 月号の IEICE Fundamental of Electronics, Communications and Computer Sciences に掲載された。

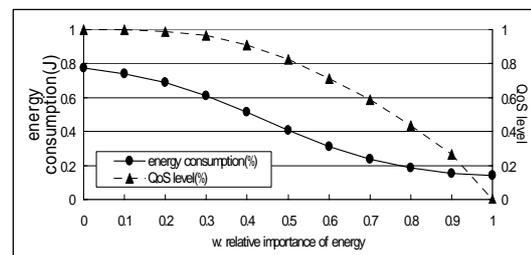


図 2: シミュレーション結果

### (平成 20 年度)

平成 19 年度で提案したスケジューリング手法の改善と、実際のセンサノードへの実装に向けた検証と実験を行った。斜面防災で実際に用いられるワイヤレスセンサネットワークシステムおよび関連するリアルタイムシステムについて調査を行った結果、

- (1) 通信デバイスによる消費電力が大きい、
- (2) 稼動時間要求が存在する、
- (3) 電池容量の有限性を考慮したスケジューリングが必要である、

という知見が得られた。まずこれらの知見を

元に平成 19 年度のスケジューリング手法を改善した。スケジューリングのアーキテクチャは図 3 に示すとおりである。Importance decider は、状況に応じて重要度のパラメータを決定・変更する要素である。Static Allocator は Importance Decider が決定した重要度に応じて、QoS の良化と消費電力の削減をトレードオフする最適なリソース配分を求める。本年度ではこの Static allocator においてスケジューリング問題をよりセンサノードのスケジューリング要求に沿った形で定式化し、最適リソース配分を求める手法を検討した。Static allocator におけるリソース配分問題は、平成 19 年度に定式化したスケジューリング問題において通信デバイスによる消費電力を考慮し、さらに次の制約を加えたものである。

**制約:** 要求寿命内の消費エネルギー制約  
 この成果は 2008 年 9 月の NOLTA'08 および 11 月の CST'08 で発表された。

さらに、本手法を実際のセンサノードに実装する方法を検討した。まずセンサノードにおける消費電力の変動を測定する実験を実施した。センサノードにおいては、リアルタイムタスクは各センサデバイスを取得、送信するタスクとみなせる。またリアルタイムタスクへの CPU 配分と消費エネルギーの調整は、各センサ値のセンシング間隔を調整することで実現できる。またセンサノードの通信による電力消費は、他のセンサノードからのデータを転送する転送量にも依存する。実測実験ではセンサノードのセンシング間隔と他ノードからの転送量を変更し、各センシング間隔および転送量に対する消費電力の大きさを測定し、センサノードの電力消費モデルを得た。電力消費モデルの概念図を図 4 に示す。この結果より、QoS と消費電力の重要度や各タスクの重要度に応じてセンシング

間隔を変更することが有効であると確認できた。しかしながら実際のセンサネットワークでは、要求される寿命が半年から 1 年と長く、提案手法の有効性を実装して確認するのは高コストであることがわかった。そこで仮想的な実験に基づき提案手法の有効性を確認できるように、実測実験で得られた電力消費モデルに基づいてセンサネットワークにおける各センサノードの寿命を算出するシミュレータを設計・開発した。シミュレータにおける入力・出力の概念図は図 4 に示すとおりである。この成果は 2008 年 9 月 FIT2009 で発表された。

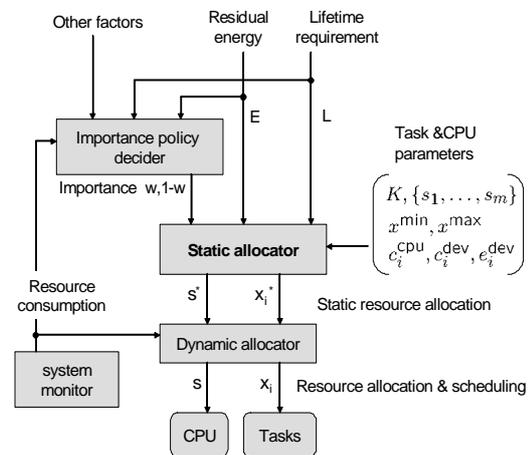


図 3: スケジューリングアーキテクチャ

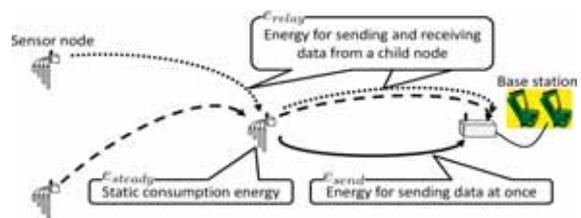


図 5: 電力消費モデルの概念図

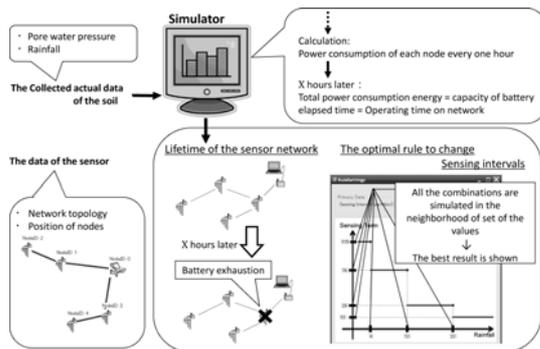


図 5: シミュレータの概念図

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

(1) Fumiko Harada、Toshimitsu Ushio、Yukikazu Nakamoto、  
 “Adaptive Fair Resource Allocation for Energy and QoS Trade-off Management、” IEICE Trans. on Fundamental of Electronics、Communications and Computer Sciences、Vol. E91-A、pp. 3245-3252、2008、査読有

〔学会発表〕(計 3 件)

(1) 中谷高明、森浩佳、原田史子、島川博光、無線センサネットワークの適用可能性検証用シミュレータの設計、情報処理学会/電子情報通信学会情報科学技術フォーラム、2008年9月

(2) Fumiko Harada、Toshimitsu Ushio、Yukikazu Nakamoto、  
 “Fair Resource Allocation for Energy and QoS Trade-Off Management in Battery-Driven Real-Time Systems、” 2008 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications、September 2009.

(3) 原田史子、潮俊光、中本幸一、電池駆動リアルタイムシステムにおける消費エネルギーとQoSのトレードオフ解消、コンカレント工学研究会、2008年11月

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

原田 史子 (Harada Fumiko)

立命館大学・情報理工学部・助教

研究者番号：30454515