



大規模センサネットワークの高効率化および低消費電力化に関する研究

和泉, 慎太郎

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2011-03-25

(Date of Publication)

2011-10-03

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5262

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005262>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



| | |
|------------|------------------|
| 氏 名 | 和泉 慎太郎 |
| 博士の専攻分野の名称 | 博士（工学） |
| 学 位 記 番 号 | 博い第 5262 号 |
| 学位授与の 要 件 | 学位規則第 5 条第 1 項該当 |
| 学位授与の 日 付 | 平成 23 年 3 月 25 日 |

【 学位論文題目 】

大規模センサネットワークの高効率化および低消費電力化に関する研究

審 査 委 員

| | | |
|-----|-----|-------|
| 主 査 | 教 授 | 吉本 雅彦 |
| | 教 授 | 沼 昌宏 |
| | 教 授 | 永田 真 |
| | 准教授 | 川口 博 |

| | | | |
|---|------------------------------------|-----|-------|
| 氏名 | 和泉 慎太郎 | | |
| 論文 題目 | 「大規模センサネットワークの高効率化および低消費電力化に関する研究」 | | |
| 審査委員 | 区分 | 職名 | 氏名 |
| | 主査 | 教授 | 吉本 雅彦 |
| | 副査 | 教授 | 沼 昌宏 |
| | 副査 | 教授 | 永田 真 |
| | 副査 | 准教授 | 川口 博 |
| 要 旨 | | | |
| <p>近年の情報通信技術 (ICT: Information and Communication Technology) の発展により、ユビキタス社会の実現が進んでいる。ユビキタスとは、「いつでも、どこでも、だれでも」がその存在を意識することなく恩恵を受けることのできる環境、技術をあらわす言葉であり、その本来の意味は「遍在」である。あらゆるものに組み込まれたコンピュータがひとの生活を支える「ユビキタスコンピューティング」や、あらゆる場所であらゆるものがネットワークにつながる「ユビキタスネットワーク」は、科学の知見を用いて公共の安全・健康・福祉に有益な技術や環境を実現する「工学」のひとつの理想型と言える。このユビキタス社会の基盤となる技術としてセンサネットワークが注目されている。</p> <p>センサネットワークとは、センサノード (センシング機能、通信機能、CPU を備えた小型ノード) を対象とするセンシング空間に多数配置し、ネットワークを構築することで高密度な空間センシングをおこなう基盤システムである。これによってあらゆる場所でセンシング情報を取り込み、その情報をどこからでも自由に利用できる環境が得られる。医療、防災、防犯、農林水産業など、さまざまな分野においてセンサネットワークの応用が検討されており、その実現が期待されている。</p> <p>センサネットワークの実用化における課題は、主にハードウェアリソースを中心とした制約の多さである。従来の伝送速度や通信品質が最優先されるようなネットワーク技術 (インターネットなど) とは異なり、消費電力や演算量の削減が大きな目的となる。このため、従来提案されている通信プロトコルやハードウェア構成をそのままセンサネットワークに適用することは困難である。また、センサネットワークの大規模化のためにはネットワーク分散処理への適応、ネットワークトラフィックの削減、センサノードおよびシステム全体の低消費電力化・低コスト化といった大きな課題がある。特にノード数が数百個に達するような大規模なセンサネットワークを実現するためには、アプリケーションレベルから通信プロトコル、回路・アーキテクチャまで含めた包括的な研究開発が必要不可欠となる。</p> <p>本論文は6章で構成されており、第1章は序論である。第2章ではセンサネットワークの特徴を述べ、センサネットワークの大規模化にともなう課題についてまとめられている。</p> <p>第3章では従来の大規模マイクアレイにおける演算量や消費電力の問題を解決する技術として、センサネットワーク技術を用いたネットワーク型マイクアレイシステムを提案している。提案システムでは、小規模なマイクアレイ・センサノード (サブアレイ) を多数配置し、それらの間で無線ネットワークを構築して協調動作をおこなうことで、大規模なマイクアレイ音声処理システムを実現する。また本研究では、ネットワークを介した分散処理に適した音源分離のアルゴリズムを新たに提案している。FPGA ボード SUZAKU を用いて 16ch サブアレイの試作をおこない、3つのサブアレイを用いた実証実験によって提案システムの動作を確認した。従来のデータ収集のみを目的としたアプリケーションとは異なり、ネットワーク型マイクアレイシステムには「リアルタイム処理」、「センサノード間の時刻同期」、「ネットワーク分散処理」という3つの機能が必要であった。これらの機能は、他のより実用的なアプリケーションでも必須となるものであり、本研究はセンサネットワークの応用分野を拡大するためのテストベッドとしての役割も果たすものである。</p> <p>第4章ではセンサネットワークにおいて経路構築などに必要不可欠なブロードキャストに着目し、待ち時間制御によるカウンタベース方式の改良アルゴリズム (RAD-Extension と HCA-RAD Extension) を提案した。また、ブロードキャストはネットワーク層だけでなくアプリケーション層でも必要とされるプロトコルである。提案方式では、コストの高いアルゴリズムやハードウェアを必要とせず、ノード密度にあわせて再送信確率を制御できるという従来方式の利点を生かしつつ、さらに再送信ノード数を削減することを目的とした。提案方式では、メッセージ受信ごとに待ち時間を増加させることで、各ノードの面積カバー率を改善する。これによってパケット到着率を維持したまま全体の再送信ノード数を削減できること</p> | | | |

| | | | |
|---|--------|--|--|
| 氏名 | 和泉 慎太郎 | | |
| <p>ことを述べた。さらに、待ち時間のスロット化によって、経路長も考慮して再送信の優先順位を設定するアルゴリズムを提案している。また、シミュレーションによる比較をおこない、従来方式と比較して提案方式では約10%の再送信ノード数削減効果が得られることを示した。本研究の提案アルゴリズムは大規模なセンサネットワークのトラフィックを削減することでスケラビリティを高め、また同時にネットワークシステム全体の長寿命化に貢献するものである。</p> <p>第5章では低消費電力化センサノード LSI の垂直統合設計技術について詳述している。ワイヤレスセンサネットワークを実現するためには、センサノードの消費電力を削減し、システムの可用時間を延ばさなければならない。そのためには、ネットワークの各階層に対して個別に最適化するだけでなく、協調して設計すること (垂直統合設計) が必要不可欠である。しかし、通信プロトコルからセンサノードの回路・アーキテクチャレベルまでの一貫した低消費電力化をおこなうような研究は、ほとんど成されていなかった。</p> <p>そこで本研究では、ネットワークの階層構造における中間層である MAC (Media Access Control) 層を中核とし、上下方向展開による垂直統合設計をおこなった。まず、センサノード向け低消費電力 MAC プロトコルとして LPL (Low Power Listening) を元にした I-MAC (Isochronous-MAC) を用いることで、アルゴリズム階層で消費電力を削減した。次に、MAC 層の通信処理を専用ハードウェア化した MAC プロセッサと汎用マイクロプロセッサの組み合わせによって低消費電力なセンサノード用マイクロコントローラを実現し、MAC プロトコルと LSI アーキテクチャ間の相互最適化をおこなった。さらに、無線通信回路まで含めて 1-chip システム LSI としてセンサノードを設計し、MAC プロセッサを中核とした電源管理機構によってセンサノード全体の消費電力を削減した。提案したセンサノードアーキテクチャに基づいてセンサノードの試作し、データ収集時の平均消費電力 58 μW を達成した。</p> <p>以上、第3章～第5章において、ネットワーク分散処理に対応するアプリケーション層、通信トラフィックを削減するネットワーク層、センサノードの消費電力を削減する MAC 層と物理層の研究結果について記述し、最後に第6章で本論文を総括して結論を述べている。これらの研究成果は、3編の査読付き論文と2編の国際学会プロシーディングにて掲載されており、今後のユビキタス社会の発展に貢献するセンサネットワーク技術分野において、その大規模化、低消費電力化、高効率化に寄与する有効な手段となり得るものである。</p> <p>以上のように本研究は、ワイヤレスセンサーネットワークに用いられるセンサノード LSI の低消費電力化のための設計技術について研究したものであり、特に今後のユビキタス社会構築の鍵となる重要で価値ある知見を得たものと認める。よって、学位申請者の和泉慎太郎氏は、博士 (工学) の学位を得る資格があると認める。</p> <p>以上。</p> | | | |

本論文はセンサネットワークの大規模化に関する研究成果をまとめたものである。

近年の情報通信技術 (ICT: Information and Communication Technology) の発展により、ユビキタス社会の実現が進んでいる。ユビキタスとは、「いつでも、どこでも、だれでも」がその存在を意識することなく恩恵を受けることのできる環境、技術をあらわす言葉であり、その本来の意味は「遍在」である。あらゆるものに組み込まれたコンピュータがひとの生活を支える「ユビキタスコンピューティング」や、あらゆる場所であらゆるものがネットワークにつながる「ユビキタスネットワーク」は、科学の知見を用いて公共の安全・健康・福祉に有益な技術や環境を実現する「工学」のひとつの理想型と言える。このユビキタス社会の基盤となる技術としてセンサネットワークが注目されている。

センサネットワークとは、センサノード (センシング機能、通信機能、CPU を備えた小型ノード) を対象とするセンシング空間に多数配置し、ネットワークを構築することで高密度な空間センシングをおこなう基盤システムである。これによってあらゆる場所でセンシング情報を取り込み、その情報をどこからでも自由に利用できる環境が得られる。医療、防災、防犯、農林水産業など、さまざまな分野においてセンサネットワークの応用が検討されており、その実現が期待されている。

センサネットワークの実用化における課題は、主にハードウェアリソースを中心とした制約の多さである。従来の伝送速度や通信品質が最優先されるようなネットワーク技術 (インターネットなど) とは異なり、消費電力や演算量の削減が大きな目的となる。このため、従来提案されている通信プロトコルやハードウェア構成をそのままセンサネットワークに適用することは困難である。また、センサネットワークの大規模化のためにはネットワーク分散処理への適応、ネットワークトラフィックの削減、センサノードおよびシステム全体の低消費電力化・低コスト化といった大きな課題がある、特にノード数が数百個に達するような大規模なセンサネットワークを実現するためには、アプリケーションレベルから通信プロトコル、回路・アーキテクチャまで含めた包括的な研究開発が必要不可欠となる。

本論文は6章で構成されており、第1章は序論である。第2章ではセンサネットワークの特徴を述べ、センサネットワークの大規模化にともなう課題についてまとめる。

第3章では従来の大規模マイクアレイにおける演算量や消費電力の問題を解決する技術として、センサネットワーク技術を用いたネットワーク型マイクアレイシステムを提案する。

提案システムでは、小規模なマイクアレイ・センサノード (サブアレイ) を多数配置し、それらの中で有線ネットワークを構築して協調動作をおこなうことで、大規模なマイクアレイ音声処理システムを実現する。また本研究では、ネットワークを介した分散処理に適した音源分離のアルゴリズムを新たに提案した。FPGAボードSUZAKUを用いて16chサブアレイの試作をおこない、3つのサブアレイを用いた実証実験によって提案システムの動作を確認した。

従来のデータ収集のみを目的としたアプリケーションとは異なり、ネットワーク型マイクアレイシステムには「リアルタイム処理」、「センサノード間の時刻同期」、「ネットワーク分散処理」という3つの機能が必要であった。これらの機能は、他のより実用的なアプリケーションでも必須となるものであり、本研究はセンサネットワークの応用分野を拡大するためのテストベッドとしての役割も果たすものである。

第4章ではセンサネットワークにおいて経路構築などに必要不可欠なブロードキャストに着目し、待ち時間制御によるカウンタベース方式の改良アルゴリズム (RAD-ExtensionとHCA-RAD Extension) を提案する。また、ブロードキャストはネットワーク層だけでなくアプリケーション層でも必要とされるプロトコルである。提案方式では、コストの高いアルゴリズムやハードウェアを必要とせず、ノード密度にあわせて再送信確率を制御できるという従来方式の利点を生かしつつ、さらに再送信ノード数を削減することを目的とした。提案方式では、メッセージ受信ごとに待ち時間を増加させることで、各ノードの面積カバー率を改善する。これによってパケット到着率を維持したまま全体で再送信ノード数を削減できることを述べた。さらに、待ち時間のスロット化によって、経路長も考慮して再送信の優先順位を設定するアルゴリズムを提案した。また、シミュレーションによる比較をおこない、従来方式と比較して提案方式では約10%の再送信ノード数削減効果が得られることを示した。

本研究の提案アルゴリズムは大規模なセンサネットワークのトラフィックを削減することでスケールビリティを高め、また同時にネットワークシステム全体の長寿命化に貢献するものである。

第5章では低消費電力化センサノードLSIの垂直統合設計技術について詳述する。ワイヤレスセンサネットワークを実現するためには、センサノードの消費電力を削減し、システムの可用時間を延ばさなければならない。そのためには、ネットワークの各階層に対して個別に最適化するだけでなく、協調して設計すること (垂直統合設計) が必要不可欠である。しかし、通信プロトコルからセンサノードの回路・アーキテクチャレベルまでの一貫した低消費電力化をおこなうような研究は、ほとんど成されていなかった。

そこで本研究では、ネットワークの階層構造における中間層であるMAC (Media Access Control) 層を中核とし、上下方向展開による垂直統合設計をおこなった。まず、センサノード向け低消費電力MACプロトコルとしてLPL (Low Power Listening) を元にしたI-MAC (Isochronous-MAC) を用いることで、アルゴリズム階層で消費電力を削減した。次に、MAC層の通信処理を専用ハードウェア化したMACシーケンサと汎用マイクロプロセッサの組み合わせによって低消費電力なセンサノード用マイクロコントローラを実現し、MACプロトコルとLSIアーキテクチャ間の相互最適化をおこなった。さらに、無線通信回路まで含めてI-chipシステムLSIとしてセンサノードを設計し、MACシーケンサを中核とした電源管理機構によってセンサノード全体の消費電力を削減した。提案したセンサノードアーキテクチャに基づいてセンサノードの試作し、データ収集時の平均消費電力58 μ Wを達成した。

最後に第6章で本論文の結論を述べる。

本論文ではセンサネットワークにおいて、ネットワーク分散処理に対応するアプリケーション層、通信トラフィックを削減するネットワーク層、センサノードの消費電力を削減するMAC層と物理層の研究成果について記述した。提案技術はすべて、アプリケーション、ネットワークプロトコル、回路・アーキテクチャという従来は独立して研究がおこなわれていた各階層を統合的に研究することで実現したものである。これらの提案技術によって大規模センサネットワークが実現され、センサネットワークの普及につながる新たなキラーアプリケーションの創出が期待できる。