



ワイヤレスセンサネットワークにおけるセンサノードLSIの低消費電力化に関する研究

竹内, 隆

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2010-03-25

(Date of Publication)

2014-04-09

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4936

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004936>

※ 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 竹内 隆
博士の専攻分野の名称 博士（工学）
学 位 記 番 号 博い第 4936 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 22 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

ワイヤレスセンサネットワークにおけるセンサノード LSI の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

本論文は、ワイヤレスセンサネットワークにおけるセンサノード LSI の低消費電力化、低コスト化に関する研究成果をまとめたものである。

近年 ICT (Information and Communication Technology) の普及によりコンピュータによる情報処理やインターネットなどの通信に関する技術が急速に発展している。特に携帯電話や無線 LAN などの無線通信を利用したシステムの発展はめざましく、ユビキタス (Ubiquitous) 社会実現のためには必要不可欠な技術となっている。ユビキタスとは、それが何であるかを意識させず、しかも「いつでも、どこでも、だれでも」が恩恵を受けることができる環境、技術のことである。このユビキタス社会実現の一環として、無線通信機能を有する超小型センサ同士を相互に連携するワイヤレスセンサネットワークが注目されている。ワイヤレスセンサネットワークは、センサ機能、データ保持機能、無線通信機能、ネットワーク情報処理機能を備えたセンサノードにより構成され、センサノードを空間に多数配置することでマルチホップ無線ネットワークの構築と高密度の空間センシングを同時におこなう。センシングされた情報はサーバへと集約、データベース化され、ユーザはその情報を活用することができる。

ワイヤレスセンサネットワークにおける重要な課題はセンサノードの低消費電力化である。センサネットワークによる定期的な情報収集を目的とするアプリケーションでは、バッテリーで動作するセンサノードの低消費電力化は必須であり、センサノードの自律的な電源管理が必要不可欠である。またワイヤレスセンサネットワークにおいて、無線通信回路によって消費される電力は非常に大きく、無線通信の時間を極力減らすための通信プロトコルが不可欠となる。この通信プロトコルはマイクロコントローラに実装されるため、通信中マイクロコントローラは常に起動していなければならない。このためプロトコル処理をおこなうマイクロコントローラの動作電力削減が必要となる。さらにセンサノードはデータのセンシング、中継、ネットワーク処理以外のほとんどの時間が待機状態であることから、ワイヤレスセンサネットワーク全体の平均消費電力を削減するためには待機時に浪費する電力を削減することが重要である。

またワイヤレスセンサネットワーク普及への課題として、センサノードを安価に大量生産可能とすることが重要である。半導体製造技術の向上により、従来集積できない規模の複数の回路も 1 チップに集積可能となっている。このためセンサノードを 1 つの LSI に

SoC (System on a Chip) として集積することが低コスト化のために有効である。複数の単機能 LSI を基板に実装する場合と比較して、SoC 化することで小型化、低消費電力化、高速化、低コスト化というメリットが得られる。しかし無線通信回路に用いられる高い Q 値のフィルタなど、一部の回路は LSI 化が困難である。このように集積化が難しい回路は通常 LSI の外部にモジュールとして接続する。その結果、部品点数の増加、歩留まりの劣化、大型化、コストの増加が問題となる。このため集積化が難しい回路はアーキテクチャを改善することで回路への要求を緩和し、集積化を可能とすることが求められる。

第 3 章 データリンク層における低消費電力化技術

ワイヤレスセンサネットワークにおいて、無線通信回路によって消費される電力は非常に大きく、無線通信の時間を極力減らすための通信プロトコルが不可欠となる。そこで無線通信回路の動作時間を削減するため、データリンク層において I-MAC (Isochronous-Media Access Control) プロトコルを提案する。I-MAC はノード間の同期を利用することでアイドルリスニングの時間を減少させ、通信電力を大幅に削減する。第 3 章では I-MAC プロトコルの有効性を検証するため、長波標準電波による同期を利用したプロトタイプを作成し、消費電力を評価した。またこの I-MAC をさらに低消費電力化するために、時刻補正アルゴリズムと低消費電力水晶発振回路を提案した。時刻補正アルゴリズムは温度変化によるノード間の時間のずれを補正することでプリアンブル送信時間を削減し、通信電力を約半分に抑えられる。また低消費電力な水晶発振回路を用いることで、常に動作しているタイマの電力を削減した。これら I-MAC、時刻補正アルゴリズム、低消費電力水晶発振回路の統合設計によって、従来の LPL を使ったノードと比較して 81% の消費電力削減を達成した。I-MAC による通信時間の削減はセンサノードの動作電力削減に大きな貢献をしている。また I-MAC は通信量の多いベースステーションに近いノードほど大きな電力削減効果を得ることができることから、センサネットワークの可用時間の向上が期待できる。

第4章 低消費電力キャリアセンス回路

ワイヤレスセンサネットワークにおいて、キャリアセンス機能は衝突を回避するために重要な技術である。特に第3章で提案した I-MAC は同期型 MAC プロトコルであり、すべてのセンサノードが同時刻に起動することから、キャリアセンスによる衝突の回避が必要不可欠である。また I-MAC は定期的に起動してキャリアセンスをおこなっているため、受信時間のほとんどがキャリアセンスの時間である。キャリアセンスにかかる電力を削減するため、双安定状態を利用した閾値特性を持つ低消費電力電圧増幅器 (BSAMP) を提案した。提案する BSAMP は、電圧増幅器を双安定状態とすることで定常状態でのバイアス電力を削減する。双安定状態が反転する閾値を制御することで、指定した振幅以上の電圧のみを増幅する機能を実現する。この増幅可能な最小入力電圧を持つ特性を利用し、他に回路を追加することなくキャリアセンス機能を実現できる。動作周波数 433MHz において BSAMP の平均動作電力は 449 μ W、最大電圧利得は 11dB であった。従来のインバータタイプの電圧増幅器と比較して、スタンバイ電力は 78% の削減、アクティブ電力は入力信号が “Low” のとき、46% の削減が可能である。ノードがアクティブである比率を 10^{-3} と想定した場合、平均消費電力は 376nW と見積もられた。

第5章 レイヤ間統合と SoC 化による低消費電力化

低コスト、低消費電力なセンサノードを実現するためにはデータリンク層と物理層の技術を統合することによるセンサノードの SoC 化が不可欠である。I-MAC を専用ハードウェアとして実装することで、消費電力の大きい汎用マイクロコントローラの稼働時間を大幅に削減することが可能である。また I-MAC プロセッサが自身の状態遷移に合わせてセンサノードの各ブロックの電源をシーケンシャルに制御することで低消費電力化する。ノード間の同期には FTSP を使い、MAC プロセッサの一部としてハードウェア化した。また集積化の難しい無線通信回路の SoC 化を実現するために、イメージ

除去をデジタル処理で実現する。これにより高い Q 値が必要なアナログフィルタ回路を除去することができる。またセンサネットワークによる定期的な情報収集を目的とするアプリケーションでは、センサノードの待機時間が長いことから、ネットワーク全体の平均消費電力を削減するためには待機時に浪費する電力を削減することが重要となる。待機時のリーク電力を削減するため、データメモリとして分割データバッファメモリ技術を提案した。センサノード LSI は CMOS0.18 μ m プロセスで設計され、電源電圧 1.8V で動作する。チップ面積は 3.0mm \times 1.7mm、トランジスタ数は 0.63M 個であった。また QualNet を用いたネットワークシミュレーションにより、1日の収集回数と平均消費電力を評価した。1日の収集回数が 24 回のとき、平均消費電力で 6.34 μ W を達成できる見積もりを得た。

本論文では、センサノードの低消費電力化、低コスト化のための階層間協調設計技術を詳述した。無線通信電力を削減するための MAC プロトコルの提案、センサノードの SoC 化による低消費電力、低コスト化、データバッファメモリの分割技術による待機電力の削減により、平均消費電力 6.34 μ W の超低消費電力センサノードを達成できることを示した。

氏名	竹内 隆		
論文 題目	ワイヤレスセンサネットワークにおけるセンサノードLSIの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		
			印

要 旨

近年 ICT (Information and Communication Technology) の普及によりコンピュータによる情報処理やインターネットなどの通信に関する技術が急速に発展している。特に携帯電話や無線 LAN などの無線通信を利用したシステムの発展はめざましく、ユビキタス(Ubiquitous)社会実現のためには必要不可欠な技術となっている。ユビキタスとは、それが何であるかを意識せず、しかも「いつでも、どこでも」が恩恵を受けることができる環境、技術のことである。このユビキタス社会実現の一環として、無線通信機能を有する超小型センサ同士を相互に連携するワイヤレスセンサネットワークが注目されている。ワイヤレスセンサネットワークは、センサ機能、データ保持機能、無線通信機能、ネットワーク情報処理機能を備えたセンサノードにより構成され、センサノードを空間に多数配置することでネットワークの構築と高密度の空間センシングを同時におこなう。

しかしセンサノードにおいて、無線通信回路は電力を送信しなければならないため、動作電力が非常に大きい。さらにセンサノードはデータのセンシング、中継、ネットワーク処理以外のほとんどの時間が待機状態であることから、ワイヤレスセンサネットワーク全体の平均消費電力を削減するためには、動作電力のみでなく、待機時に消費する消費電力の削減も同様に重要となる。

またワイヤレスセンサネットワーク普及への課題として、センサノードを安価に大量生産可能とすることが重要である。半導体製造技術の向上により、従来集積できない規模の複数の回路も1チップに集積可能となっていることから、センサノードを1つのLSIにSoC (System on a Chip) として集積することが有効となる。しかし無線通信回路では、イメージ除去のためのフィルタ等に高いQ値が必要となるため、通常これらの回路素子はLSIの外部にモジュールとして接続する。その結果、部品点数の増加、歩留まりの劣化、大型化、コストの増加が問題となる。

本論文は5章で構成されており、第1章は序論である。第2章では、低消費電力化および低コスト化に向けたセンサノードLSIの具体的課題について述べている。

第3章では、データリンク層における低消費電力化技術について論述している。無線通信回路の動作時間を削減するため、I-MAC プロトコルの提案をおこなった。I-MAC はノード間の同期を利用することでアイドルリスニングの時間を減少させ、通信電力を大幅に削減する。第3章ではI-MAC プロトコルの有効性を検証するため、長波標準電波による同期を利用したプロトタイプを作成し、消費電力を評価した。またこのI-MAC をさらに低消費電力化するために、時刻補正アルゴリズムと低消費電力水晶発振回路を提案した。時刻補正アルゴリズムは温度変化によるノード間の時間のずれを補正することでプリアンプ送信時間を削減し、通信電力を約半分に抑えられる。また低消費電力な水晶発振回路を用いることで、常に動作しているタイマの電力を削減した。これら I-MAC、時刻補正アルゴリズム、低消費電力水晶発振回路の統合設計によって、従来のLPLを使ったノードと比較して81%の消費電力削減を達成した。I-MAC による通信時間の削減はセンサノードの動作電力削減に大きな貢献をしている。またI-MAC は通信量の多いベースステーションに近いノードほど大きな電力削減効果を得ることができることから、センサネットワークの可用時間の向上が期待できる。

第4章では、低消費電力キャリアセンス回路を提案している。ワイヤレスセンサネットワークにおいてこのキャリアセンス機能は衝突を回避するために重要な技術である。特に第3章で提案したI-MAC は同型MAC プロトコルであり、キャリアセンスによる衝突の回避が必要不可欠である。またI-MAC は定期的に起動してキャリアセンスをおこなっているため、受信時間のほとんどがキャリアセンスの時間である。キャリアセンスにかかる電力を削減するため、双安定状態を利用した閾値特性を持つ低消費電力電圧増幅器 (BSAMP) を提案した。提案するBSAMPは、電圧増幅器を双安定状態とすることで定常状態でのバイアス電力を削減する。双安定状態が反転する閾値を制御することで、指定した振幅以上の電圧のみ増幅す

氏名	竹内 隆
<p>る機能を実現する。この増幅可能な最小入力電圧を持つ特性を利用し、他に回路を追加することなくキャリアセンス機能を実現できる。動作周波数 433MHz において BSAMP の最大電圧利得は 11dB であった。従来のインバータタイプの電圧増幅器と比較して、スタンバイ電力は 78% の削減、アクティブ電力は入力信号が“Lo”のとき、46% の削減が可能である。ノードがアクティブである比率を 10:3 と想定した場合、平均消費電力は 376nW と見積もられた。</p> <p>第5章では、レイヤ間統合と SoC 化による低消費電力化について詳述している。各レイヤの技術を統合することによって、低コスト、低消費電力なセンサノード LSI を提案した。I-MAC を専用ハードウェアとして実装することで、汎用マイクロコントローラの稼働時間を大幅に削減することが可能となった。また I-MAC プロセッサが自身の状態遷移に合わせて各ブロックの電源をシークンシャルに制御することでセンサノードを低消費電力化している。ノード間の同期には FTSP を使い、MAC プロセッサの一部としてハードウェア化した。また無線通信回路の SoC 化を実現するための低コストなアーキテクチャを提案した。さらに待機時のリーク電力を削減するため、データメモリとして分割 SRAM 技術を提案した。センサノード LSI は CMOS0.18μm プロセスで設計され、電源電圧 1.8V で動作する。チップ面積は 3.0mm×1.7mm、トランジスタ数は 0.63M 個であった。また QualNet を用いたネットワークシミュレーションにより、1日の収集回数と平均消費電力を評価した。1日の収集回数が 24 回のとき、平均消費電力で 6.34μW を達成できる見積もりを得た。</p> <p>以上、第3章～第5章で、センサノードの低消費電力化、低コスト化のための階層間協調設計技術について記述し、最後に、第6章で本論文を総括し、結論を述べている。これらの研究成果は、2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、ユビキタス社会実現のためのワイヤレスセンサネットワーク技術分野において、<u>センサノードLSIの低消費電力化、低コスト化に寄与する有効な手段となり得るものである。</u></p> <p>以上のように本研究は、ワイヤレスセンサ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、学位申請者の竹内隆氏は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p> <p>以上。</p>	