

[9]

氏名	白石 順哉
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	理工博第 94 号
学位授与の日付	2023 年 3 月 31 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Energy-efficient Content-based Wake-up Control for Wireless Sensor Networks
論文審査委員	主査教授 四方 博之 副査教授 平田 孝志 副査教授 山本 幹

論文内容の要旨

無線センサネットワーク (Wireless Sensor Networks: WSNs) ではバッテリーで動作するセンサノードの省電力化を如何にして実現するかが重要課題として問われてきている。本論文ではセンサノードの省電力化を実現する方法として、無線電波を用いて通信必要時のみセンサノードのリモート起動を行うウェイクアップ無線技術に着目する。ウェイクアップ無線技術はセンサノードに超低消費電力で動作する受信待受専用のウェイクアップ受信機を搭載することで実現し、これによりセンサノードの非通信時の無駄なエネルギー消費を大幅に削減する。既存の ID 指向のウェイクアップ制御法では、起動対象ノードを ID により指定する。しかし、この方式ではセンサノードの観測値に応じた起動制御ができないためシンクノードにとって不必要な情報を有するセンサノードの無駄な起動を抑制できない。この問題を解決する方法として、本論文ではセンサノードの観測値に応じた起動制御を実現するコンテンツベースウェイクアップ制御 (Content-based Wake-up: CoWu) の提案を行う。CoWu ではシンクノードが所望するデータの情報 (閾値情報) をウェイクアップ信号に埋め込み送信する。本ウェイクアップ信号はウェイクアップ受信機にて検知され所望情報を有するノードは起動しデータ送信を行う一方、所望データ未保持ノードは起動を抑制し無駄なエネルギー浪費を抑制する。本論文では、(A) 特定の値を観測したノード情報のみが要求される環境でのデータ収集、(B) 観測データが時間相関を有する環境でのデータ収集、(C) 観測データが空間相関を有する環境でのデータ収集、(D) 収集データに高い情報鮮度が要求される環境でのデータ収集の 4 種類のシナリオに対し CoWu の適用を行っている。CoWu は、観測値に応じた起動制御を実現することから、センサの観測値分布、量子化ビット数、観測データの時空間相関などのアプリケーションレベルの情報との親和性が高い。そこで、本論文では、CoWu と上述したアプリケーションレベルの情報、観測データの性質

との相互作用を評価し、その特性を明らかにする。そして、CoWu の有効性を様々な想定環境下で評価を行うとともに、CoWu 適用により得られるゲインを理論解析により明確化する。本論文は7章から構成され、以下に各章の概要を示す。

第1章では、本論文の導入を行うとともに、本研究分野 (WSNs)内における CoWu の位置付けの明確化を行う。その後、関連研究についてまとめ、本研究の位置付けを明確化する。そして本論文の研究目的と課題を示す。最後に、本論文の構成・内容を示す。

第2章では、WSNs, データ指向通信制御, ウェイクアップ無線技術など本論文で想定する背景・技術内容の導入・説明を行う。

第3章では、CoWu を上位 k 番目までのノード・観測値情報の把握を目的とした top- k クエリのシナリオに導入し、top- k クエリのための Count Down CoWu (CDCoWu)を設計する。そして CDCoWu 適用データ収集の特性解析を行い、既存方式との比較からその優位性について遅延時間・消費エネルギーの観点で評価・確認する。

第4章では、第3章にて想定したシナリオをより一般化した繰り返し top- k クエリに着目する。本章では、省電力化と収集 top- k 集合の高いランキング精度の両立を目指し、観測データの時間相関の性質を活用したウェイクアップ制御法の提案を行い計算機シミュレーションを用いてその有効性を評価・確認する。さらに、ウェイクアップ受信機適用センサノードの試作機を用いた実機実験を通し提案方式の実用性を確認する。

第5章では、観測データが空間相関を有する環境にてシンクノードがセンサノードからのデータ収集を基に複数観測データ発生源の同定を行うシナリオに焦点を当てる。そして同定精度向上と省電力化を両立するウェイクアップ制御法を明らかにする。

第6章では、CoWu を収集データの高い情報鮮度が要求されるシナリオに適用し、データ収集の deadline の観点で CoWu 信号送信タイミングが deadline 時の所望集合情報精度に及ぼす影響を理論解析により明確化するとともに、CoWu の比較方式に対する有効性を物理プロセスの変動速度の観点から確認する。

第7章では、本論文で得られた成果を基に WSNs の省電力化の観点で CoWu 技術についての知見をまとめる。

論文審査結果の要旨

本論文は、無線センサネットワークの省電力化を実現するウェイクアップ無線のための起動制御方式として、センサの観測データに応じた制御を実現するコンテンツベースウェイクアップ制御を新たに提唱・導入している。これまでの既存起動制御方式では、観測データに応じた制御は取り入れられておらず、提案制御方式の新規性・独創性は非常に高い。また、提案方式の応用として、4つの異なるシナリオを想定し、それぞれのシナリオに対して省電力プロトコル・データ収集アルゴリズムの設計を行っている。このようなウェイクアッ

プ制御とアプリケーションレベルのパラメータの相互作用を考慮した設計アプローチも既存研究で行われている例は少なく、その新規性・独創性は高い。

第3章では、無線センサネットワークにおける $\text{top-}k$ クエリのためのウェイクアップ制御・データ収集方式を提案し、既存のウェイクアップ制御法と比較して、提案方式が高い応答性を保ちつつ、センサノードの消費電力を大幅に削減可能であることを示している。 $\text{top-}k$ クエリは、多くの無線センサネットワークの応用で必要とされるクエリであり、提案方式の有用性は非常に高い。また、提案方式の評価の中で、理論計算による定式化や近似解析に取り組み、計算機シミュレーション結果と比較することで、得られた結果の信頼性を高めている点も高く評価できる。

第4章では、周期的に繰り返される $\text{top-}k$ クエリにおいて収集される $\text{top-}k$ 集合の時間相関に注目し、異なる時間の集合差分のみをコンテンツベースウェイクアップ制御を用いて把握する方式の提案・評価を行っている。このような差分データのみを収集するアイデアは、これまで通信経路中間ノードでのフィルタリングに導入されていたが、ウェイクアップ制御と統合したアイデアは無く、その新規性は高い。本論文では、提案方式の有効性を消費電力削減効果の観点で示しているとともに、実機実験を通し提案方式が汎用的なマイクロコントローラで実装可能である事を示しており、その有用性・実用性が高いと言える。

第5章では、時空間相関を有する観測データを生成するデータ発生源の同定に対して、コンテンツベースウェイクアップ制御が有効であることを示している。同定では、ディープラーニングの一種である Convolutional Neural Network (CNN)を用いており、このような機械学習による推定の省電力化および高精度化にウェイクアップ制御が影響するという知見は既存研究では見出されておらず、その新規性は高い。

第6章では、本論文で提案しているコンテンツベースウェイクアップ制御の応用として、アクチュエータを含むシステムを対象とし、その適用による収集データ鮮度向上可能性を示している。このようなデータ鮮度の考え方は、ロボット等の制御系を含んだ IoT システムで今後重要になると予想され、その分野での提案方式の適用可能性を示していることから、その拡張性は非常に高いと言える。

以上、本論文で提案されているコンテンツベースウェイクアップ制御をベースとしたデータ収集プロトコル・アルゴリズムは、新規性、独自性が高く、また有用性および実用性も高いと認められる。また、アクチュエータを含む IoT システム等、今後普及が想定されるシステムへの応用・拡張性も有している。提案方式により、IoT 機器の省電力化が可能となれば、IoT 機器やその応用システムの普及が促進され、社会活動・生産活動の効率を飛躍的に向上する事が期待でき、非常に価値の高い方式である。また、コンテンツベースウェイクアップ制御というデータ指向プロトコルの有効性を示したことで、今後、無線通信の研究分野にデータ指向設計の考え方が波及していく事が期待され、学術的な価値も非常に高いと言える。

よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。