

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820149

研究課題名(和文) 超低消費電力指向オンデマンド・オンサプライ型無線通信システムに関する研究

研究課題名(英文) Research on ultra low-power on-demand and on-supply wireless communications system

研究代表者

四方 博之(Yomo, Hiroyuki)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：00510124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超低消費電力な無線通信システムの実現を目指し、通信が必要な時のみ電力を利用するオンデマンド通信および自然環境(光、振動)等から発電するエネルギー量に応じて通信制御を行うオンサプライ通信に関する研究を行った。オンデマンド通信およびオンサプライ通信をIoT社会の基盤技術であるWiFiや無線センサネットワークで利用するための通信方式やプロトコルを考案し、理論解析、シミュレーションおよび実機実験により、その有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, aiming at the realization of ultra low-power wireless communications system, we studied on-demand communications, which utilize supplied energy only when communications are needed, and on-supply communications, which adapt communications control to the amount of energy supplied by energy-harvesting technologies. We developed communications schemes and protocols that are required for on-demand and on-supply communications to be integrated into WiFi and wireless sensor networks, which are fundamental technologies in IoT paradigm. We validated effectiveness of the developed schemes and protocols with theoretical analysis, computer simulations, and experimental evaluations.

研究分野：無線通信工学

キーワード：無線通信 省電力化 ウェイクアップ受信機 エネルギーハーベスト WiFi 無線センサネットワーク

1. 研究開始当初の背景

高速化・大容量化を第一の目標として設計されてきた携帯電話や無線 LAN 等、多くの無線通信システムは、省電力化の観点からは最適化が実現されておらず、無線通信機器のバッテリー持続時間の限界、CO₂ 排出に繋がる無駄なエネルギー消費等の問題が指摘されており、これらの問題を解決するため、無線通信機器及びシステムの省電力化に関する研究が国内外で活発化していた。

省電力化を実現する最も標準的な方法は、各機器が通信を行う際に用いる方式・プロトコルの改良である。しかし、携帯電話や無線 LAN 等の通信システムでは、各機器が実際に無線通信を行う時間的割合は少なく、他の多くの時間は通信待ち受け状態にある。このため、実際の通信に係る消費電力削減による省電力効果には限界があり、その限界を超えるためには、根本的に無線機器の動作スタイルを見直す必要があった。このような新たな動作スタイルを伴う無線通信技術として、ウェイクアップ無線技術が注目されていた。ウェイクアップ無線を用いた通信では、通信要求が存在しない時間帯は、電力消費の大きいデータ通信用モジュールをスリープ状態（電源オフ）にする。そして、通信要求端末は、ウェイクアップ信号を送信し、宛先をオンデマンドで起動することで通信を行う。しかし、既存の無線 LAN システムは、省電力化を念頭においた設計が行われていないため、ウェイクアップ無線を活用したオンデマンド動作を想定したシステム設計が行われていなかった。一方、通信に必要となるエネルギーを周囲の環境（光、振動、温度等）から獲得するエネルギーハーベストに関する研究も活発に行われていた。このエネルギーハーベスト技術を導入することで、通信機器のバッテリーへの依存度を減らし、将来的にはバッテリーレス化に繋げることができる。しかし、エネルギーハーベストによるエネルギー供給状況は、各通信機器の周辺環境に大きく依存する。このため、エネルギー供給量は、機器毎にランダムに変動する。これに伴い、各機器におけるエネルギーの重要度がランダムに変動するため、その重要度に応じたオンサプライ通信制御が必要とされていた。

2. 研究の目的

前述の背景のもと、本研究課題では、無線通信資源のオンデマンド利用及び供給エネルギーのオンサプライ利用技術により、超低消費電力な無線通信システムを実現するために、以下の点を明らかにすることを目的とした。

(1) オンデマンド通信技術を無線 LAN に取り入れる際の問題点とその解決法
無線 LAN アクセスポイントを含む無線 LAN 機器が未使用時に自動的にスリープ状態となる場合に、負荷分散や干渉制御等、これまで無線 LAN のシステムレベルの通信品質を

改善するために考案されている通信制御が受ける影響を明らかにする。そして、その悪影響を最小化する方法を提案し、効果を明らかにする。

(2) エネルギーハーベストと通信制御の連携技術の確立

エネルギーハーベストに伴う利用可能エネルギーのランダム変動のモデル化を行う。そして、そのランダム変動が通信制御に与える影響の明確化、さらには、エネルギーの供給状況に応じて、無線通信の優先度や伝送レートを動的に制御する方法を提案し、その効果を明らかにする。

(3) エネルギーのオンデマンド利用技術とハーベスト技術の統合

ハーベスト技術により獲得したエネルギーをオンデマンド利用することによるバッテリー依存度抑制効果を明らかにする。

3. 研究の方法

本課題では、前述の目的を達成するために、以下の3つの課題に取り組んだ。

(1) ウェイクアップ受信機を適用するオンデマンド型無線 LAN システムにおけるスリープ状態機器の存在を考慮した負荷分散、干渉制御、通信パラメーター制御技術の開発

(2) エネルギーハーベストを適用する無線通信におけるエネルギー供給状況に応じた無線通信制御技術の開発

(3) エネルギーハーベスト技術とオンデマンド利用技術の統合

提案方式の評価は、理論、計算機シミュレーション及び実機を用いた実装実験により行った。

4. 研究成果

(1) 無線 LAN 信号を活用したオンデマンド AP ウェイクアップに対する隠れ端末の影響評価

無線 LAN のアクセスポイント (AP) の未使用時における無駄な消費電力を削減するために、無線 LAN の AP に超低消費電力で動作するウェイクアップ受信機を適用した Radio-On-Demand Networks (ROD) が提案されている [1]。ROD 無線 LAN AP では、STA と一定時間データ通信が行われない場合、AP をスリープ状態に移行し、ウェイクアップ受信機を除く全てのモジュールの電源をオフにする。データ通信要求を行う STA は、まずウェイクアップ信号を送信することで AP をウェイクアップさせ、データ通信を可能にする。ウェイクアップ受信機は、超低消費電力で動作させるために、処理負荷の少ない包絡線検波と On-Off-Keying (OOK) によるビット判定を行う。一方、ROD 無線 LAN の STA は、無線 LAN 信号をウェイクアップ信号として用いる。このウェイクアップ方式では、STA がウェイクアップ対象 AP の ID に対応付けられた長さの無線 LAN フレームを送信する。ウェイクアップ受信機は、受信したフレームの長さを検

出し、所望の長さであれば AP をウェイクアップさせる。これにより、無線 LAN 信号を用いた特定 AP のオンデマンドウェイクアップが可能となる。しかし、ウェイクアップ信号に無線 LAN 信号を使用するため、CSMA/CA 方式特有の問題である隠れ端末の影響を受け、STA が AP のウェイクアップに失敗する確率が高くなる可能性がある。そこで、本研究では、隠れ端末のウェイクアップ失敗率に対する影響を理論解析および実機実験により評価した。また、ウェイクアップ後のデータ通信を行う際にも、隠れ端末によりスループットが低下すると考えられる。そこで、ウェイクアップ後のデータ通信に対する隠れ端末の影響についても併せて評価した。

一般的に実機実験において、STA のキャリアセンス範囲を正確に判断することは難しく、隠れ端末の関係になる距離に端末を設置することは困難である。本研究では、端末のチャンネル設定とウェイクアップ受信機の構成に工夫を加えることで隠れ端末環境を実現した。まず、隠れ端末関係となる端末配置を容易に実現するために、ウェイクアップ信号を送信する STA と干渉端末の送信チャンネルを別チャンネルに設定した。実験では、STA1 台、隠れ端末 2 台とし、2 台の隠れ端末同士も互いに隠れ端末の関係にあるモデルを想定した。また、本実験では BPF (Band Pass Filter) 未搭載のウェイクアップ受信機を使用する。このように、送信側では、別チャンネルにより送信を行うことで、各端末が互いの状況に関わらず送信し、受信側では、BPF を取り除くことにより、隠れ端末環境を擬似的に実現することが可能となる。実験における STA、隠れ端末 (HN)、ウェイクアップ受信機の配置を図 1 に示す。ウェイクアップ信号で用いるフレーム長を $800\mu\text{s}$ 、 $1000\mu\text{s}$ 、 $1200\mu\text{s}$ とした。隠れ端末は、ポアソン分布に従いフレームを送信させ、送信フレーム長は $700\mu\text{s}$ とし、実験を行った。実験で得られた隠れ端末のフレーム発生率に対するウェイクアップ失敗率に関する結果を図 2 に示す。また、理論解析により求めたウェイクアップ失敗率も同図に併せて示す。この図から、隠れ端末のフレーム発生率の増加に伴いウェイクアップ失敗率が高くなることが分かる。また、実験値と理論値の結果を比較すると、結果が一致し

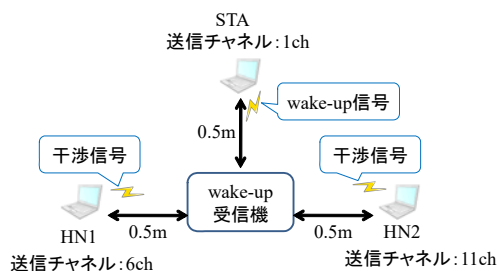


図 1 STA および受信機配置

ており、理論解析で得られた特性の妥当性を実環境でも確認できた。

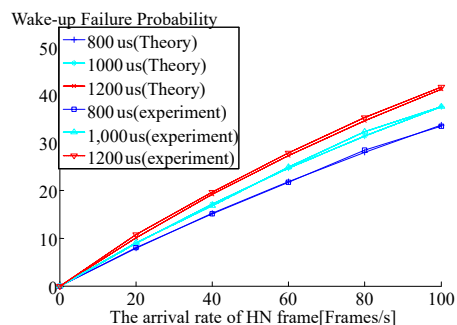


図 2 隠れ端末のフレーム発生率に対するウェイクアップ失敗率特性

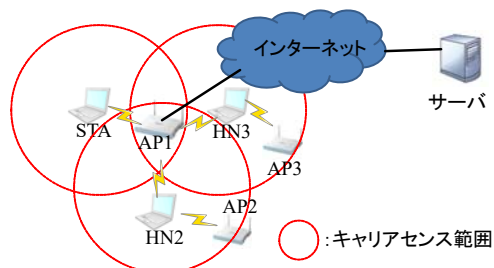


図 3 データ通信特性評価シナリオ

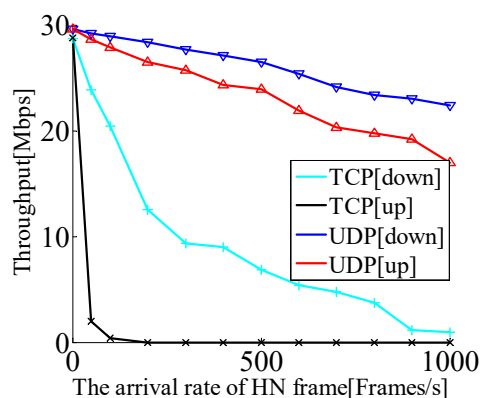


図 4 データ通信特性

次に、ウェイクアップ成功後のデータ通信特性を計算機シミュレーションにより評価した。図 3 に示すシミュレーションモデルにおいて、STA-サーバ間で TCP 及び UDP によるデータ通信を行い、スループットを測定した。データ通信特性結果を図 4 に示す (down: 下り回線, up: 上り回線)。図 4 を見ると、隠れ端末フレームの到着率が比較的高い値でも、TCP の上り回線以外は、ある程度のスループットを維持できている。一方このフレーム到着率の範囲では、ウェイクアップ失敗率は急激に高くなることを確認した。つまり、隠れ端末の影響によりウェイクアップ失敗率が高い状況でも、もしウェイクアップに成功し、データ通信を行う場合には、良好なスループットを維持できる事が分かる。従って、この

ような環境では、ユーザは、AP をウェイクアップさせる必要性があり、隠れ端末がユーザの利便性を損なう原因となっていると結論付けることが出来る。この悪影響を緩和するためには、ウェイクアップ失敗率を低減する必要がある。本研究では、連送によるウェイクアップ失敗率の低減について検証を行い、他の無線 LAN 端末への干渉も少なく、ウェイクアップ失敗率を低減できることを確認した。

(2) オンデマンド WiFi ウェイクアップのための受信信号強度を活用したウェイクアップ制御法

ROD で送信されるウェイクアップ信号は CSMA/CA で動作するため、ウェイクアップフレームの間に複数のフレームの割り込みが発生する場合がある。このような割り込みフレームが発生する場合にも正しく機器の起動を行う為に、図5に示す状態遷移を用いたウェイクアップ判定が提案されている [1]。ここで、ウェイクアップ信号は3つのフレーム長 (L_1 、 L_2 、 L_3) で構成されているとする。受信機は始め、 L_1 のフレーム長待ち状態であり、所望長を受信する度に次の所望長待ち状態へと遷移する。そして、全所望フレーム長を受信すると機器を起動させる。各待ち状態では許容割り込みフレーム数 m が設定されており、割り込みフレームの数が m 以下であれば同じ状態に留まり、 m に達した場合には、状態遷移を初期化する。この状態遷移を用いたウェイクアップ判定には、False Negative (FN) と False Positive (FP) と呼ばれる問題がある。FNは、ウェイクアップ信号を送信したが、多数の割り込みフレームにより機器が起動しない問題である。一方 FP は、ウェイクアップ信号の送信は無いが、非ウェイクアップフレームが所望長と一致し、意図せず機器が起動する問題である。この FN を増加させる事無く、FP を低減する為に、本研究では、受信レベル相関を用いたウェイクアップフレーム検出法を提案した。受信レベル相関を用いた方式では、フレーム長に加え、フレーム受信電圧を検出する。ウェイクアップを試みる STA が存在する場合は、1台の STA から複数の所望長のフレームが送信される。そのため、受信機で3つの所望フレーム間の受信電圧は大きな相関を持つ。一方、FP が発生する場合には、3つのフレームはそれぞれ異なった STA から送信されている可能性が高い。そのため、3つの所望長フレームの受信電圧は高確率で異なる。そこで、受信レベ

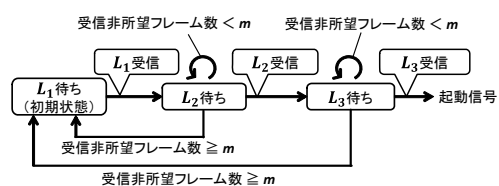


図5 状態遷移によるウェイクアップ制御

ル相関を用いた方式では、所望長、かつ、受信レベルに相関がある場合にのみ、機器の起動を行う。

本研究では、シミュレーション評価により、受信レベル相関を用いた方式を適用する事で、FN を増加させる事無く、FP を低減可能である事を示した。しかし、送信機の移動や送受信機間の人の通過により、受信機での受信電圧が変動し、FN が発生する可能性がある。そこで本研究では、FN が増加する可能性について実験とシミュレーションにより検証を行った。FN 増加の可能性検証の為に、まずフレーム送信実験を行った。送受信機間を通過する人数は1人、3人とし、より多くの人通過する場合として、人が多く通る食堂で実験を行った。また、送信機の移動速度は1[m/s]、2[m/s]とする。そして、これらの結果を適用したシミュレーションを行った。シミュレーションでは、スリープ状態の無線 LAN 機器と、そこから5-25mの地点にウェイクアップ信号を送信する STA を1台ランダムに配置する。また、1-25mの距離に非ウェイクアップフレームを送信する STA を9台ランダムに配置し、26mの距離に AP を配置する。9台の STA は AP とデータ通信を行うとする。得られたシミュレーション結果から、送信機が移動する場合には、送信機が移動しない場合と比較して、0.01程度 FN 発生率が上昇する事を確認した。しかし、送信機の移動や、送受信機間の人の通過の影響は殆ど無い事も併せて確認した。

次に、提案法を実機に実装、実験を行う事により、実環境における FP 低減効果の検証を行った。実験では、受信レベル相関を用いた方式を適用したウェイクアップ受信機と、従来方式を適用したウェイクアップ受信機を用いて、実環境での FP 発生数を比較し、FP 低減率を評価した。実験場所は日中と夜間の研究室、日中の学生ラウンジとした。

実験結果を表1に示す。表1より、周囲に多数の STA が存在する学生ラウンジでは FP 低減率が高く、STA が少ない夜間の研究室では FP 低減率が低い事が分かる。なお、これらの結果が別途行ったシミュレーションの結果と良く一致する事も確認した。これらの結果より、実環境においても受信レベル相関を用いた方式により FP を低減可能であることを確認した。

表1 実環境における提案方式の効果

実験環境	FP 発生数 (従来方式)	FP 発生数 (受信レベル相関を用いた方式)	FP 低減率
	[Wake-up/h]	[Wake-up/h]	
研究室 (昼)	38.50	13.75	0.6429
研究室 (夜)	6.067	3.417	0.4460
学生ラウンジ	12.25	2.750	0.7755

(3) エネルギーハーベスト型無線センサネットワークのためのハーベストレート適応ポーリング方式の提案と評価

光、熱、振動などの周辺環境に存在する微小エネルギーで発電するエネルギーハーベスト技術を用いたエネルギーハーベスト型無線センサネットワーク (EH-WSN : Energy Harvesting Wireless Sensor Networks) のノードは、発電したエネルギーを蓄積素子に蓄積し、そのエネルギーを用いて計測、信号処理、データ送受信などの動作を行う。この時データの送受信に必要なエネルギー量に蓄積エネルギー量が達する充電時間は、周辺環境に依存し絶えず変動する。このため、各EH-WSN ノードがデータ送受信可能となるタイミングは、ランダムに変動し、予測不可能となる。動作状態がランダムに変動するノードにより構成される EH-WSN のためのアクセス制御方式として、確率的ポーリング方式が検討されている [2]。確率的ポーリング方式ではシンクが全ノード宛にポーリング packets をブロードキャストする。この時、ポーリング packets に、各ノードが送信を行う確率であるコンテンツン確率を含めて送信する。ポーリング packets は、充電完了状態のノードのみに受信され、これらのノードはコンテンツン確率に基づき送信を行う。確率的ポーリング方式では、コンテンツン確率を適切に制御することで packets 衝突回避を行う。ID を指定して順にポーリングを行う ID ポーリングでは、充電未完了なノードを指定することによるポーリング失敗が発生するのに対し、確率的ポーリング方式では動作状態のノードを確実にポーリングすることが可能となる。しかし、既存の確率的ポーリング方式では、頻繁に充電完了状態になる高速充電ノードと、稀にしか充電完了状態にならない低速充電ノードが同確率で送信を行う。低速充電ノードは、元々送信機会が少ないが、他ノードとのアクセス競合に敗れることにより、更なる送信機会減少が引き起こされる可能性がある。そこで、本研究では充電の速さであるハーベストレートに応じて、各ノードの送信確率を変化させることで

低速充電ノードの送信機会増加を実現するアクセス制御方式を提案した。提案方式の動作は以下の通りである (図6)。

Step1 : ノードは自身のハーベストレートを取得する。取得したハーベストレートをセンシングデータ送信時に送信 packets に付加してシンクに送信する。

Step2 : シンクは全ノードのハーベストレートを受信し、平均ハーベストレート λ_{ave} を計算する。

Step3 : シンクは、動作中のノードのハーベストレートが λ_{ave} で同一と仮定した時のコンテンツン確率である基準コンテンツン確率 p_c と平均ハーベストレート λ_{ave} をポーリング packets に含めてブロードキャストで送信する。

Step4 : ポーリング packets を受信したノード i は自身のハーベストレート λ_i 、平均ハーベストレート λ_{ave} 、基準コンテンツン確率 p_c から $p_i = (\lambda_{ave} / \lambda_i) p_c$ としてコンテンツン確率 p_i を計算する。但し、 $p_i > 1$ の時は $p_i = 1$ とする。

Step5 : 各ノードはコンテンツン確率 p_i に基づきデータ packets を送信する。

上記提案法について、計算機シミュレーションおよび理論解析による有効性評価を行った。評価では、[2]で考案されているハーベスト量変化モデルに基づいて評価を行った。その結果、提案方式がネットワーク全体のスループット劣化を抑制しつつ低速充電ノードのスループットを改善し、公平性向上を実現できることを示した。

(4) その他関連成果

ウェイクアップ受信機を用いたオンデマンド通信技術は、無線 LAN システムのみでなく、省電力性および高応答性の両立が必要となる、無線センサアクチュエータネットワーク (WSAN) でも有効である。本研究では、ウェイクアップ受信機を WSAN に適用した ROD-SAN を提案し、ROD-SAN の詳細シミュレーション評価を行うとともに、実機実験による評価を行う事で ROD-SAN の有効性を示した。また、ROD-SAN におけるウェイクアップ制御オーバーヘッド削減方法の提案も併せて行った。さらに、エネルギーハーベストの方法として、電力伝送に基づいた方式の検討も行った。電力伝送を行う際に生じる獲得エネルギーの不公平性問題を解決するために、中継通信を活用した方式を提案するとともに、詳細評価を行うことで、その有効性を示した。

以上の研究成果から、本研究により、オンデマンド通信技術およびオンサプライ通信技術に関する多くの知見を得ることができた。特に、これらの技術を実システムに組み込む際のプロトコル設計は、世界的に見ても新しい試みであり、当該分野の研究に大きな貢献をしたと言える。今後は、これらのオンデマンド通信とオンサプライ通信が融合した研

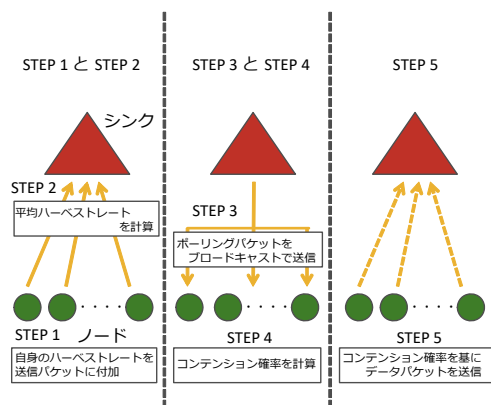


図6 提案ポーリング方式の動作

究が盛んになると考えられる。

<引用文献>

[1] Y. Kondo, H. Yomo, S. Tang, M. Iwai, T. Tanaka, H. Tsusui, and S. Obana, "Energy-efficient WLAN with on-demand AP wake-up using IEEE 802.11 frame length modulation," Elsevier Computer Communications, Vol. 35, No. 14, pp. 1725-1736, August 2012.

[2] Z. A. Eu, H.-P. Tan, and W. K. G. Seah, "Design and performance analysis of MAC Schemes for Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting," Ad Hoc Networks, Vol. 9, No. 3, pp. 300-323, May 2011.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

① Masashi Kunikawa and Hiroyuki Yomo, Improving Fairness with Harvesting-Rate Adapted Polling for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, IEICE Transactions on Communications, 査読有, Vol. E99-B, No. 9, pp. 2036-2046, Sept. 2016.

DOI: 10.1587/transcom.2015EBP3479

② Hiroyuki Yomo, Takahiro Kawamoto, Kenichi Abe, Yuichiro Ezure, Tetsuya Ito, Akio Hasegawa, and Takashi Ikenaga, ROD-SAN: Energy-efficient and High-response Wireless Sensor and Actuator Networks employing Wake-up Receiver, IEICE Transactions on Communications, 査読有, Vol. E99-B, No. 9, pp. 1998-2008, Sept. 2016.

DOI: 10.1587/transcom.2016SNP0013

③ Tomoyuki Tani and Hiroyuki Yomo, Using Received Signal Strength to Detect a Real Wake-up Call for On-Demand WiFi Wake-up, IEICE Transactions on Communications, 査読有, Vol. E99-B, No. 7, pp. 1609-1618, July 2016.

DOI: 10.1587/transcom.2015EBP3437

④ Yuma Asada and Hiroyuki Yomo, Impact of Hidden Nodes on On-Demand AP Wake-Up Exploiting WLAN Signals, IEICE Transactions on Communications, 査読有, Vol. E99-B, No. 4, pp. 939-950, April 2016.

DOI: 10.1587/transcom.2015EBP3311

⑤ Suhua Tang, Hiroyuki Yomo, and Sadao Obana, Dynamic threshold selection for frame length-based wake-up control, IEEE Wireless Communications Letters, 査読有, Vol. 4, No. 6, pp. 609-612, Dec. 2015.

DOI: 10.1109/LWC.2015.2475268

[学会発表] (計18件)

① Masanori Monobe and Hiroyuki Yomo, Reducing Wake-up Overhead for Energy-Efficient On-Demand Wireless Sensor Networks, International Workshop on Low-Layer Implementation and Protocol Design for IoT Applications (IoT-LINK) in conjunction with Globecom 2016, 2016年12月4日, ワシントンDC(アメリカ)

② Hiroyuki Yomo, Energy-Efficient On-Demand Wireless Sensor Networks exploiting Wakeup Receiver, International Workshop on Green Networks (GreenNet) in conjunction with WiOpt 2016, 2016年5月9日, テンピ(アメリカ)

③ Hiroyuki Yomo, Kenichi Abe, Yuichiro Ezure, Tetsuya Ito, Akio Hasegawa, and Takeshi Ikenaga, Radio-On-Demand Sensor and Actuator Networks (ROD-SAN): System Design and Field Trial, IEEE Globecom 2015, 2015年12月6日~10日, サンディエゴ(アメリカ)

④ Masashi Kunikawa, Hiroyuki Yomo, Kenichi Abe, and Tetsuya Ito, A Fair Polling Scheme for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, IEEE VTC2015-Spring, 2015年5月11日~14日, グラスゴー(スコットランド)

⑤ Takeru Yoshiwaka, Hiroyuki Yomo, and Tetsuya Ito, Wake-up Channel Selection for On-Demand WiFi Wake-up using WLAN Signals, IEEE VTC2014-Spring, 2014年5月18日~21日, ソウル(韓国)

他国内発表13件

[その他]

<http://wnet.ee.kansai-u.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

四方 博之 (YOMO, Hiroyuki)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号: 00510124

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし