

複数人物の移動軌跡観測を目的とした ZigBee*センサノードの開発

高橋 悟史^{†1,†2} 黄 耀華^{†1} 宮前 雅一^{†1}
寺田 努^{†1,†3} 野間 春生^{†1} 鳥山 朋二^{†1}
小暮 潔^{†1} 西尾 章治郎^{†2}

我々は様々な現場で働く人々を支援するために、人の通過を検出するセンサネットワークを開発した。センサネットワークを構成する各センサノードを既存の建物など電源環境が整っていない場所に設置する場合、AC電源を供給することが難しいことがあり、電池で長時間駆動することが求められる。そこで無線通信に ZigBee を採用し電池駆動でも長時間稼動する低消費電力なセンサノードの開発を行った。このセンサノードでは、独自のスリープ制御プロトコルを実装することで頻繁にスリープを行い消費電力を低減しながらも高い時刻同期精度を実現した。実際の病院環境で取得した通過データと開発した試作機の消費電力による評価結果より、2400[mAh]の二次電池4本を用いることで、一般的な病室であればセンサノードは30日間以上連続稼動することがわかった。

A ZigBee-based Sensor Node for Tracking People's Locations

SATOSHI TAKAHASHI,^{†1,†2} JEFFREY WONG,^{†1} MASAKAZU MIYAMAE,^{†1}
TSUTOMU TERADA,^{†1,†3} HARUO NOMA,^{†1} TOMOJI TORIYAMA,^{†1}
KIYOSHI KOGURE^{†1} and SHOJIRO NISHIO^{†2}

We have developed a sensor network system for tracking people in order to support their daily activities. If a sensor node that makes up the sensor network should be located in an environment with poor electrical infrastructure, it becomes necessary for it to work under extended time periods using batteries. To solve this problem, we designed a new battery-operated sensor network based on ZigBee. Among the improvements are a flexible sleep control protocol and a high-accuracy time synchronization mechanism between sensor nodes. From the simulation based on the actual data collected at a hospital, we have confirmed that the system can last usually over 30 days using four AA size Ni-H batteries at a hospital room in the hospital.

1. はじめに

近年、無線通信技術および半導体技術の発展により、ワイヤレスセンサネットワークの研究が盛んに行われている。ワイヤレスセンサネットワークでは、センサノード同士がネットワークを構成することで、センシングデータを無線マルチホップ通信を用いて他のセンサノードに転送できる。ワイヤレスセンサネットワーク技術を活用することで、医療・健康、防犯・セキュリティ、防災、農業などのあらゆる分野において、状況に応じた様々なサービスが提供できるようになる。

我々は、ワイヤレスセンサネットワーク技術を活用して医療機関などの作業現場での業務を支援するためのシステムに関する研究を推進している。病院などの様々な現場で働く

人々の業務支援を行う際には、その作業内容が場所によって限定されることが多いため、作業者がどの部屋に存在するかを知ることは行動を特定し、有効な支援を行うための重要な情報となる。そこで、図1に示すように、作業者の場所を部屋単位の粒度で特定するために、部屋の出入り口に赤外線受光器を備えたセンサノードを設置し、作業者の通過を検知するセンサネットワークシステムを開発した¹⁾。このシステムでは、IDを発信する赤外線送信機を装着した作業者が部屋の出入り口を通過する際、赤外線受光器をもつセンサノードが作業者のIDを読み取る。センサノードには無線LANカードが装着されており、収集されたセンサデータはサーバに送信され、蓄積される。このシステムを用いることで、作業者がいつどこにいるかを特定できる。

過去に試作した通過センサシステムでは無線通信手段としてIEEE 802.11bを用いてネットワークを構成しており、その消費電力の大きさから、AC電源を用いてデバイスを駆動させる必要がある。そのため、センサノードの設置場所がAC電源供給可能な地点周辺に限られてしまい、自由に設置位置を変更できないという問題があった。また、現在は部屋の出

^{†1} 株式会社国際電気通信基礎技術研究所知識科学研究所
Knowledge Science Laboratories, Advanced Telecommunications Research Institute International

^{†2} 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{†3} 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University

*ZigBee は Koninklijke Philips Electronics .N.V. の登録商標です。

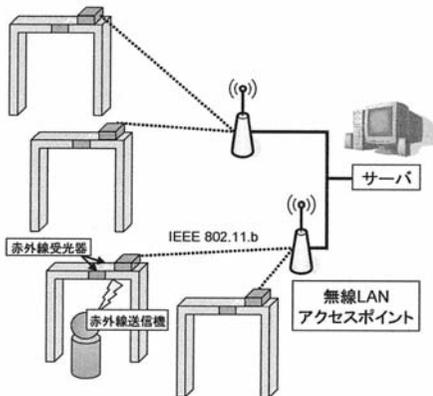


図1 通過センサシステム

入り口のみセンサを設置しているが、今後はベッド周辺でのセンシングや医療機器の位置特定など、あらゆる場所にセンサノードを設置することを考えている。このとき、ベッドや医療機器などは配置変更が頻繁に生じ、AC電源から電力を供給しなければならない現在のセンサノードでは、設置場所や運用方法が限定されてしまう。

そこで本稿では、これらの問題を解消するため、電池駆動でも長時間稼働する低消費電力なセンサノードの開発について報告する。このセンサノードには、低消費電力の無線規格である ZigBee を採用し、さらに独自の細やかなスリープ制御プロトコルを実装することで消費電力を低減する。また、通過を検知するにあたって、センサ値の検出タイミングを正確に知らなければ移動経路を誤って解釈することがある。そこで、提案するセンサノードでは頻繁にスリープしながらも高い時刻同期精度を実現することを目指す。

以下、2章で関連研究について述べ、3章で本研究で提案するセンサノードの設計について説明する。4章ではまず予備実験のために試作した予備試作機について述べ、5章では予備試作機で得られた問題点を改良した試作機について述べる。6章で提案するセンサノードを用いた通過センサシステムについて述べ、最後に7章で本研究のまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

ユビキタスネットワーク環境を実現するため、様々なセンサノードやプラットフォームに関する研究・開発が行われている。代表的なものとして、Smart-Its²⁾が挙げられる。Smart-Its プロジェクトは、あらゆる日用品がコンピュータ化し、人間が意識せず利用できる環境が構築される。そこでは、センサをネットワークで接続したセンサネットワークデバイスが重要となるという考えのもと、EU(欧州連合)で行われている Disappearing Computer プログラム³⁾傘下のプロジェクトの1つであり、英ランカスター大学や独カールスルーエ大学、フィンランドの国立技術研究センターなどが中心となって推進している。Smart-Its デバイスは、コアとなるユニットとセンサユニットが自由に組み合わせられるようになっており、

必要なセンサを組み合わせる機能を選択的に利用できるようにになっている。また、既に普及しているセンサノードとして、MICA MOTE⁴⁾が挙げられる。MICA MOTE は UC Berkeley の NEST プロジェクトが開発したセンサネットワーク構築用のセンサノードであり、現在 Crossbow 社が一般に製造・販売している。MICA MOTE は、コインサイズのモジュールである MICA2 DOT や無線規格として ZigBee を採用している MICA_z など様々な種類が開発されている。MICA MOTE の最大の特徴は、専用の OS である TinyOS を搭載することにより、低消費電力を実現している点にある。TinyOS は限られた資源下で高効率な処理を行えるように設計されており、メモリや CPU パワー、消費電力などを小さく抑えることができる。他にも、SensiNet⁵⁾ や Ubisense⁶⁾、U³⁷⁾ などのように、様々なセンサノードが研究開発され、実用化・販売している事例も数多くある。

省電力性を考慮したセンサノードの研究・開発も盛んに行われており、Hempstead らはセンサネットワークアプリケーションのための低消費電力デバイスをハードウェアレベルから設計解析している⁸⁾ この研究では、センサネットワークアプリケーションの特徴を考慮した上で最適化したデバイスを設計し、シミュレーションでは既存システムの消費電力よりも 1~2 桁少ない消費電力を達成しており、現在は実際にデバイスの作成を行っている。また、Lymberopoulos らは低消費電力なセンサノードである XYZ を作成している⁹⁾。XYZ は無線規格として IEEE 802.15.4 を採用している他、RTC を搭載し CPU だけでなく全てのセンサを長期間スリープさせることで消費電力を抑えられる。

センサノードやプラットフォームの低消費電力化によって長期間の動作を目指す研究が数多く成されているが、我々はさらに計測において高い時刻同期精度の実現を目指した。

3. センサノードの設計

1章で述べたように、これまでに IEEE 802.11b ベースの通過センサシステムを試作したが、AC電源を用いてデバイスを駆動させるため、センサノードの設置場所が AC電源供給可能な地点周辺に限られてしまい、自由に設置位置を変更できないという問題があった。そこで、この問題を解決するため、本稿では、無線通信規格として近距離・低消費電力の無線通信規格である ZigBee を採用し、電池駆動でも長時間稼働させることができる低消費電力なセンサノードの開発を行う。新しいセンサノードでは低消費電力を実現するため、以下の2点について特に考慮した設計を行った。

- センサノードのスリープ制御プロトコルの実装
- 時刻同期精度の保証

以下、それぞれについて詳細に説明する。

3.1 ZigBee ネットワーク

今回採用した ZigBee とはアドホックなワイヤレスセンサネットワークの構成を目的として、IEEE 802.15.4 をベースとし、ZigBee Alliance¹⁰⁾によって規格化された無線通信規格である。IEEE 802.15.4 では物理層とメディア・アクセス層(MAC層)までが規格化されており、その上位のプロトコルを ZigBee Alliance で規格化している。ZigBee は、他の無線規格である WiFi、Bluetooth と比較して、低速度(256kbps)ながら柔軟な電力制御が可能である。また、ZigBee の端末

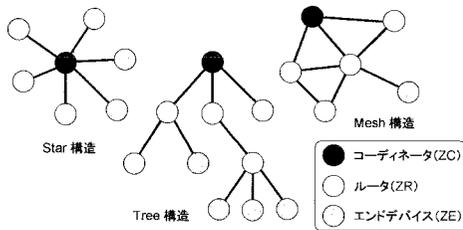


図 2 ZigBee ネットワーク構成の例

は、コーディネータ、ルータ、エンドデバイスの 3 種類に分類され、それぞれ以下のような役割をもつ。

- コーディネータ (以降、ZC とする)
 - ネットワーク内に 1 台存在し、ネットワークの制御を行う端末。通常サーバが接続されている。
- ルータ (ZR)
 - データ中継機能を有する端末。
- エンドデバイス (ZE)
 - データ中継機能をもたない端末。

これらのデバイスを用いることで、図 2 のように動的にネットワークを構成することができ、ZE から ZR を介して ZC にデータを送るというように、マルチホップ通信も可能になっている。

また、ZigBee のエンド端末である ZE はスリープすることで電力消費を低減する機能を有している。ZE がスリープを行う場合、ZE から ZC へのメッセージ送信は ZR と ZC がスリープしないため問題はないが、ZC から ZE へメッセージを送信する際に、もし ZE がスリープ中ならば ZE はメッセージを受け取ることができない。そのためスリープ機能を有効にした ZE がネットワーク内に存在している場合、ZR が ZE へのメッセージをバッファリングしておき、ZE が ZR に対してポーリングを行うことでそのメッセージを取得する。しかし、ZR のバッファが溢れたり、メッセージ保持時間を超えてしまうとバッファリングされているメッセージは破棄されてしまう。このとき、ZR はメッセージを破棄したことを ZC や ZE には通知しないため、メッセージを ZE が受信できないことがある。そのため、メッセージを確実に受信するためにはユーザがスリープ制御およびメッセージ制御を実装しなければならない。また、ZigBee では通信ディレイを保障しておらず、ZE と ZC 間でメッセージを送受信する際、ZE と ZC 間の経路や電波の状況、ZE のスリープ状態により不規則に送信遅延が発生してしまう。

以上のように、ZigBee はルーティングに関する機能を提供しているが、スリープ制御や送信遅延に関する制御はユーザが実装する必要がある。そこで、我々はスリープ制御および送信遅延を考慮した時刻同期制御について以下のような手法を導入した。

3.2 スリープ制御プロトコル

ZigBee によるセンサネットワークを構築するにあたり、センサネットワーク全体で時刻同期を行うなどのためには、ZC から ZE にメッセージを送る必要がある。しかし、前述のように ZE がスリープを行う場合、ZC から送られてきたメッセージを ZE が確実に受け取る保証がなく、またこれを検知

する手段がない。この問題は、サーバで動作しているアプリケーション (以下サーバアプリケーション) 上で各 ZE のスリープ状態を管理しておくことで解決できる。つまり、サーバアプリケーションが ZC を経由して ZE にメッセージを送信する場合、保持している各 ZE の状態情報から送信する ZE の状態を検索し、スリープ中であればアプリケーション上でメッセージをスタックし、ZE がスリープから復帰した際に改めてメッセージを送るようにする。このような処理を行うことで、ZE がスリープしている際にメッセージを送信することが抑制され、ZE は確実にメッセージを受け取ることができる。そこで、サーバアプリケーションが各 ZE の状態を管理するために、ZE からサーバに送られる状態通知メッセージを導入する。状態通知メッセージは以下の 2 つがある。

- GTB(Go To Bed) メッセージ
 - ZE のスリープ通知メッセージ。ZE がスリープに入る際に、ZC に送信される。
- IAA(I Am Awake) メッセージ
 - ZE のスリープ復帰通知メッセージ。ZE がスリープから復帰した際に、ZC に送信される。

これらのメッセージをサーバアプリケーションが取得することで各 ZE の状態を保持する。具体的には、ZE はスリープから復帰した際に IAA メッセージを ZC に送信し、ZC を介して IAA メッセージを受け取ったサーバアプリケーションはその ZE に対する予約メッセージがないかを調べ、メッセージがあればすぐさま送信を行う。ZE は一定時間メッセージ受信処理を行った後に、GTB メッセージを送信しスリープに移行する。各 ZE ではこの動作を定期的に行うことで、スリープ中に発生した自身宛のメッセージを確実に取得する。

また、メッセージ取得のための定期的な復帰処理以外に、ZE はセンサから入力検知された場合はすぐさまスリープから復帰し、IAA メッセージを送信して、順次センシングデータをサーバに送信する。センサからの入力処理が終了した後は、ZE はメッセージ受信状態となり、一定時間経過した後 GTB メッセージを送信後、スリープに移行する。

以上のように、ここでは、スリープ制御に関するプロトコルを採用することで、スリープしながらもメッセージを確実に送受信できるようにしている。また、センサ入力による即時復帰の機構を設けることで、スリープによるセンサデータ収集の遅れがでないようにしている。

3.3 時刻同期精度の保証

通過センサシステムでは作業者がどこにいるかをリアルタイムで認識するため、各 ZE は通過を検知した場合に直ちにデータをサーバに送信する必要がある。しかし、前述のように ZigBee では送信遅延を考慮していないため、サーバにデータが届いたタイミングでタイムスタンプを付加すると通過時間に誤差が生じてしまう。そのため、各センサデータに対して、ZE 自身がタイムスタンプを付加する事により通過時間をより正確に保つ手法を採用している。この手法では送信遅延については解消できるものの、各 ZE が保持する時間の同期精度を高める必要がある。実際に、病院に設置した通過センサシステムシステムでは、初期の段階では、各センサノードが内部に保持している時刻の僅かなずれにより、実際に人物が通った経路とは異なる経路が復元されるといった問題が生じた。

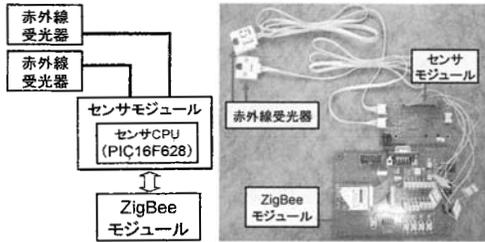


図3 予備試作機の回路図(左)と実装したセンサノード(右)

このような問題を回避するために必要な時刻同期精度について検討をおこなった結果、センサノード間誤差が1日で約300[ms]の時刻同期精度が必要な精度であることがわかった¹¹⁾。そこで、この時刻同期精度を保つために各ZEでは内部クロックの精度を高めることで時刻同期精度自体を向上させると共に、通過センサシステム全体で定期的に時刻同期を行うようにする。後者については、サーバアプリケーションから各ZEに対して、定期的に時刻設定コマンドを送信し、送信時間とレスポンス到達時間の差から誤差を計算し、その誤差が300[ms]以下なるまで時刻同期を行う。

4. 予備試作機の実装と評価

4.1 実装

3章で述べた仕様を満たすセンサノードの予備試作機を作成した。予備試作機の回路図および実際のノードを図3に示す。図3に示している実装したセンサノードの下部分がZigBeeを搭載した通信モジュールである。この通信モジュールは、ルネサス社のZigBee/IEEE802.15.4評価キットにスリープ制御プロトコルを実装したものである。このモジュールに赤外線受光器を搭載したセンサモジュールを接続することで、センサノード間でZigBeeネットワークを構築でき、ノード間でデータの送受信ができる。センサモジュールは、我々が以前の研究において試作した通過センサシステムで作成したもの転用している。センサCPUにはPIC16F628を利用し、赤外線受光器で受信したセンサデータに対して、センサCPU内で保持しているタイムスタンプを付加し、センサモジュールを介してセンサデータをサーバアプリケーションに送信する。

4.2 評価

予備試作機の性能を評価するため消費電力の計測をおこなった。計測は、センサモジュールを接続したセンサノードに対して5[V]を印加し、その消費電流を測定し消費電力を算出する。その結果、スリープ時における消費電力は61.6[mW]、通信時は平均して199.0[mW]であり、スリープ時は通信時の3分の1程度に抑えていることがわかる。

この結果を元に、これまでに行った実際の病院での実験で得た通過データログを用いて、センサノードの稼働時間を評価するためのシミュレーションをおこなった。通過データログは表1に示すように、それぞれ通過検知頻度が異なる3ヶ所の出入り口に設置されているセンサノードの通過データを用いた。赤外線送信機は50Hzで固有のIDを送信しているが、表1はそのIDの受信回数であり、実際の通過回数で

表1 各センサノードの通過データ履歴

Sensor	設置場所	1日の平均データ受信回数
A	病室入口(出入多)	36000
B	病室入口(出入並)	23000
C	ナースステーション入口	140000

表2 スリープへの移行時間

電源投入時	起動処理終了から5秒後
通常時	スリープ復帰処理終了から10秒後
センサデータ受信時	受信処理終了から10秒後
PCからのデータ受信時	受信処理終了から30秒後

表3 各センサノードの稼働時間

Sensor	稼働時間
A	約6日6時間
B	約6日7時間
C	約4日23時間

はA、Bでは一日あたり約150回、Cでは約1000回であった。ここでは各センサノードにNiHの二次電池4本(5[V]・2400[mAh])を備えることを想定し、センサデータログを元に各センサノードに通過イベントを発生させた。センサノードのスリープ時間を4分50秒、スリープ復帰後の通信時間を表2のように設定している。ただし、通過を検知した場合はすぐさまスリープから復帰し、センサデータの通信を行うものとする。

各センサノードの稼働時間を評価した結果を表3に示す。表より、作成したセンサノードの予備試作機は、データを採取した病棟の各病室ではNiHの二次電池4本で6日間の稼働が可能であることがわかる。一方で、ナースステーションのような4倍程度通過データが送信された場合でも、稼働時間は短くなりながらも大きくは変動しないことから、センサデータ受信による電力消費よりも、定常的なセンサモジュール全体の消費電力が稼働時間に大きく影響していると考えられる。

5. 試作機の実装と評価

予備試作機の評価実験により判明した問題点を考慮し、センサノードの試作機として新たなセンサノードを設計・実装した。試作機では、スリープ時における消費電力を抑えることで更なる省電力性を実現しながら、高い時刻同期精度を実現している。

5.1 設計

予備試作機の評価結果から、定常的なセンサモジュールの消費電力の大きさが稼働時間の短さの原因となったと推定される。しかし、スリープ時間を現在の4分50秒より長くした場合、サーバアプリケーションからのメッセージを受信するまでの遅延が大きくなってしまふ。そこで、センサノードを運用するには通信時間よりもスリープ時間の占める割合が多いことから、スリープ時の消費電力を抑制することでセンサノードの消費電力を低減する。そのため、センサCPUに関してZigBeeモジュール同様、一定時間CPUコアをスリープさせることで消費電力を低減する。

また、予備試作機では時刻を管理していたセンサCPUの

Hospital Viewer(RTHV)でマップ上に誰がどの場所にいるかをアイコンを用いて表示する。このように ZigBee センサノードを用いた通過センサシステムを構築することで、誰がどこにいるかをすぐに確認することができる。

7. おわりに

本稿では、通過センサネットワークのための低消費電力なセンサノードを提案し、その設計と実装を行った。提案するセンサノードでは、無線規格として ZigBee を採用し、スリープ制御プロトコルを実装することで頻繁にスリープを行い消費電力を低減しながらも高い時刻同期精度を実現した。特に ZigBee ではルーティングに関する機能を提供しているが、スリープ制御や通信遅延に関する制御は提供されていないため、実装したスリープ制御プロトコルにより、細やかなスリープ制御を行うことができる。まず、センサノードの予備試作を行い、過去の通過履歴を用いたシミュレーション実験を行った結果、二次電池 2 本で約 5 日程度稼動することがわかった。予備試作で得られた知見から新たにセンサノードの試作機を作成し、二次電池 4 本で、高い時刻同期精度を保ったまま一般的な病室であれば約 30 日以上稼動できることが予測できた。結果から、センサノードの試作機は一日 150 回程度の通過頻度をモニタする環境下では電池によって十分運用に耐えうる稼働時間と時刻同期精度を備えているといえる。

今後は、センサノードに状況にあわせたダイナミックな動作モードの変更機能を追加するなどソフトウェア面での消費電力低減を行うことを考えている。これは、現在のセンサノードではスリープと復帰の切り替えを一定期間毎に行い、スリープ時間に関しても常に一定としているためである。スリープに入る最適なタイミングや適切なスリープ時間はセンサノードの状況に応じて変化するため、適応的に制御することで消費電力を改善できると考えられる。例えば、病院における通過センサを想定した場合、日中と夜間では通過頻度が異なることから、スリープ動作においてもその間隔を長く取ることができる。そこで、ある種の動作ルールを定義し、時刻や明るさ、温度を条件として、省電力モードのパラメータを変更させることを考えている。また、通過センサシステムを実際に病院に設置し実証実験を行うことを予定している。

謝辞 本研究は情報通信研究機構 (NICT) の研究委託により実施したものである。

参 考 文 献

- 1) 高柳美沙子, 大村廉, 納谷太, 野間春生, 小暮潔, “人の行動分析のための赤外線通過センサの開発,” 第 4 回情報科学技術フォーラム (FIT2005), pp.259-260 (2005)
- 2) Michael Beigl and H. Gellersen: Smart-Its: An Embedded Platform for Smart Objects, In Proc. of the Smart Objects Conference (sOc) (2003)
- 3) The Disappearing Computer: <http://www.disappearing-computer.net/>
- 4) Crossbow MIAC MOTE: <http://www.xbow.jp/>.
- 5) Sensicast SensiNet: <http://www.sensicast.com/>.
- 6) Ubisense: <http://www.ubisense.net/>.
- 7) Kawahara, Y., Minami, M., Morikawa, H., and Aoyama, T.: Design and Implementation of a Sen-

sor Network Node for Ubiquitous Computing Environment, In Proc. of VTC2003-Fall (2003)

- 8) Mark Hempstead, Nikhil Tripathi, Patrick Mauro, Gu-Yeon Wei, and David Brooks: An Ultra Low Power System Architecture for Sensor Network Applications, In Proc. of the 32nd annual international symposium on Computer Architecture (ISCA '05), Vo.33, Issue.2, pp.208-219 (2005)
- 9) Dimitrios Lymberopoulos and Andreas Savvides: Networked sensor platforms: XYZ: a motion-enabled, power aware sensor node platform for distributed sensor network applications, In Proc. of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks (IPSN '05) No.63 (2005)
- 10) ZigBee Alliance: <http://www.zigbee.org/en/index.asp>.
- 11) 坂本龍哉, 大村廉, 納谷太, 野間春生, 鳥山朋二, 小暮潔, 佐野睦夫, “複数人物移動軌跡を観測するセンサネットワークにおける時刻同期精度の評価,” 第 15 回ユビキタスコンピューティングシステム研究発表会 (2007-UBI-015), Vol.2007, No.74, pp.35-40 (2007).