

消費電力予測とデータ送信経路の動的ルーティングによる バッテリー駆動時間の延長

杉本 一彦¹ 串田 高幸¹

概要: IoT の発展からセンサーデータの多様化により屋外で利用するケースが増加している。屋外の利用では IoT デバイスにバッテリーを搭載しメッシュネットワークを用いる手法がある。しかし既存手法の電波強度のみによるリンク構築ではバッテリー残量を考慮しておらずノード全体のバッテリー駆動時間が減少する。この課題の解決のためメッシュネットワークに所属する個々のデバイスのバッテリー駆動時間を延長する手法を提案する。提案手法ではリンクの接続先をバッテリー残量が最も多い IoT デバイスと決定する。これによりバッテリー残量が低い IoT デバイスのバッテリー駆動時間を延長する。そしてリンク構築のためのデータ送受信回数を削減するためにバッテリー残量推移を予測し、バッテリー残量の順位が変動するタイミングでリンクの更新を行う。そしてリンク構築にて消費される電力を削減するために IoT デバイス間のデータの送受信はセンサーデータの送受信パケットのペイロードに付与して行う。評価として電波強度のみのリンク構築手法との比較を行う。ノード全体のバッテリー駆動時間、消費電力量の総和をそれぞれ比較し評価を行う。

1. はじめに

背景

IoT における電力供給とネットワークは IoT システム全体を支えるためのインフラとして重要である。IoT デバイスやセンサーモジュールを起動し稼働させるために電力供給は必須であり、IoT デバイスをインターネットへ接続するためにはネットワークをより確実に接続することが求められている [1]。本章では IoT デバイスにおける電力供給とネットワークについて下記に述べる。

IoT デバイスへの電力供給は通常、電力系統からなされている。したがって使用できる電力は事実上無制限となり、消費電力が問題になることは少ない。しかし IoT の発展に伴い、IoT デバイスの設置場所が拡大しており、電力系統へ接続できない場所への設置も求められるようになってきている [2]。電力系統へ接続できない場合は、1 次電池や 2 次電池を用いて電力供給を行う [3]。1 次電池や 2 次電池は電力が蓄電され、電力供給をする機器に対し動作可能な電力を送り続ける限り利用することができる。しかし蓄電されている電力が減少していくと機器へ十分な電力を供給することが出来ず電池の交換や充電が必要となる。消費電力が増加するに従い、電池交換や充電までの期間が短くなる。

したがってメンテナンスコストが増加する可能性が高くなる [4]。

次にネットワークについて述べる。IoT デバイスは通常、有線 LAN もしくは無線 LAN で接続されている。しかし屋外の利用では有線 LAN を敷設や整備をしない限り用いることはできない。そのため無線 LAN の利用が増加することとなる。ただしこの無線 LAN を用いるためにはルータを IoT デバイスを無線 LAN の電波強度-70dBm 圏内に捉えるように設置するため、より多くのルータを設置する必要がある [5]。ネットワークにおける課題の解決策としてメッシュネットワークを用いる手法がある [6]。これはアクセスポイントから IoT デバイスが離れておりインターネットへ接続することができない際に、インターネットに接続されている IoT デバイスと接続することで間接的にアクセスポイントへ接続する手法である。従って IoT デバイスはセンサーモジュールからデータを取得するのみではなく、同時に他の IoT デバイスから送信されたデータをサーバへ転送を行うこととなる [7]。

バッテリーで動作する IoT デバイスにおいて、メッシュネットワークを構築する際、それぞれの IoT デバイスで消費電力が異なる場合がある。これはデータの転送量が異なるためである。メッシュネットワークを用いない場合、IoT デバイスは自らのセンサーデータのみ送信すれば良い。しかし、メッシュネットワークにてセンサーデータを送信す

¹ 東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科コンピュータサイエンス専攻
〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

る場合、別のIoTデバイスを経由してアクセスポイントへデータが到着する。そのためそのアクセスポイントとセンサーデータを送信するIoTデバイスの間に存在し、センサーデータの中継を行うIoTデバイスは転送する分の消費電力が増加する。

課題

本稿における課題はバッテリーで動作するIoTデバイスにおいてメッシュネットワークを構築する際、全体のノードのバッテリー残量が均衡されない事である。バッテリー残量を考慮せず既存の手法である電波強度のみでリンクを結ぶ結果としてバッテリー残量が少ないIoTデバイスが電力不足で停止する可能性が増加する。メッシュネットワーク内の一部のIoTデバイスが停止することで本来得られるべきセンサーデータが得られない問題が発生する。

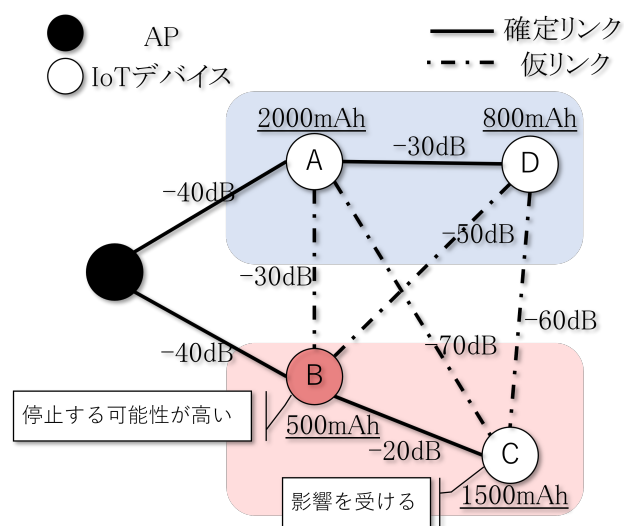


図1 電波強度でのリンク構築における課題

図1ではAP(アクセスポイント)とIoTデバイス4台にてメッシュネットワークを構築した際の構成図である。メッシュネットワークを構築する際は電波強度が最も強いIoTデバイスへ接続する。図1ではリンクを確定リンクと仮リンクの2つに分けて示している。確定リンクはIoTデバイス同士で実際にデータの転送を行なっていることを示しており、仮リンクは実際にデータの転送は行なっていないが接続可能であるIoTデバイス同士であるということを示している。IoTデバイスの上もしくは下に表記されている数値はIoTデバイスのバッテリー残量を放電容量で示したものである。

図1では通信強度のみでリンクの構築を行なっているため、アクセスポイントからIoTデバイスA,Bに対して2本のリンクが最初に構築される。そしてIoTデバイスCへは最も通信強度が高いIoTデバイスBと接続され、同様にIoTデバイスDはIoTデバイスAへと接続される。しか

しIoTデバイスBはバッテリー残量が20%であり、これはIoTデバイスAのバッテリー残量である70%より低い数値である。全てのIoTデバイスのバッテリー容量は同じとなっているため、実際に蓄電されている静電容量もIoTデバイスBの方がIoTデバイスAより低い。

IoTデバイスAとIoTデバイスDのリンク(図1中の青い枠)はIoTデバイスAのバッテリー残量が70%であり、IoTデバイスDが50%となっているためバッテリー残量に準じたリンク構築となっている。しかしIoTデバイスBとIoTデバイスC(図1中の赤い枠)はIoTデバイスBの方がバッテリー残量が低くなっているためAPに近いIoTデバイスBが先に停止する確率が増加してしまう。

各章の概要

2章では、本研究の関連研究について紹介し、課題について言及する。3章では、本研究における提案について提案方式の具体的な説明と、ユースケースシナリオについて述べる。4章では、提案方法をもとに開発したソフトウェアの実装と実験方法について説明する。5章では、本研究の評価手法とデータの分析方法について説明する。6章では、提案、実験、実験環境、評価、分析に関する議論を述べる。最後に7章では、本研究のまとめを述べる。

2. 関連研究

バッテリーで動作するデバイスにおけるワイヤレスメッシュネットワークの構築手法を提案している[8]。当該論文はメッシュネットワークの構築しているノード全体のバッテリー持続時間を伸ばす事が目的としているが、提案手法では消費電力を均一にすることで解決しているとしている。しかし、バッテリー残量が個別に異なる場合には消費電力を均一化することでは、そのバッテリー残量の偏りを平衡することができない。

バッテリーで動作するIoTデバイスにおけるBLE(Bluetooth Low Energy)メッシュネットワークを、エネルギー効率を考慮し構築する手法を提案している[9]。当該論文ではデバイスにかかる負荷に応じて、消費電力の制御を行なっており、よりバッテリー残量が多いノードへ負荷を集めるようにしている。しかしバッテリー残量の閾値が固定値であるため拡張性に欠ける。

IoTアプリケーション向けにLPWA(Low Power Wide Area)にて低電力なメッシュネットワークの構築手法を提案している[10]。当該論文ではLPWAとIEEE802.11nを組み合わせて通信を行う事で効率的で低消費電力なネットワークを構築できるとしている。しかし、LPWAは未だ標準化された規格とはなっていない。そのためハードウェアに専用の機器を取り付けなくてはならないため拡張性に欠ける。

バッテリー駆動のIoTデバイスにおいては電力制約が非

常に強いとし、エネルギー効率の最適化を行うため、コグニティブ無線メッシュネットワークを提案している [11]. しかしメッシュネットワークの頻度が一定かつ静的があるため、コグニティブでありながらも余計な通信が発生していることとなる. より消費電力を抑えるためにはメッシュネットワークの更新タイミングを動的にする必要がある.

3. 提案方式

本章では本研究での提案方式とそれを用いたユースケースシナリオについて述べる.

提案方式

本稿ではバッテリー駆動 IoT デバイスにおけるリンク構築手法について提案する. 本手法の目的はメッシュネットワーク全体の消費電力を分散させ、メッシュネットワークに所属する個々の IoT デバイスの稼働時間を既存手法より延ばすことである. また前提として、本稿では全ての IoT デバイスが同一のものであり、センサー、センサー送信間隔においても全て同一であるとする.

本章では提案を下記に記す 4 つの手法によって説明する.

- 確定リンクの決定手法
- IoT デバイス間でのデータ送受信
- バッテリー残量の推移予測
- 親ノードの確定リンク数の変更におけるデータの共有手法

IoT デバイスにてメッシュネットワークを構築した全体の構成図を図 2 に示す. 図 2 ではアクセスポイント 1 台, IoT デバイス 9 台にてメッシュネットワークを構築しているのを想定している. 親ノードは IoT デバイス B, C, D, X であり, 子ノードは IoT デバイス A₁, A₂, A₃, X₁, X₂ である. 本稿における親ノードと子ノードの定義, 保持している情報を下記に示す.

- 親ノード:
IoT デバイスからセンサーデータを送信する際, 送信先となる IoT デバイスのこと. 親ノードは確定リンクを定めない. 親ノードでは自身が接続されている確定リンク数の保持している.
- 子ノード:
IoT デバイスからセンサーデータを送信する際, 送信元となる IoT デバイスのこと. 子ノードがどの親ノードに確定リンクを決定するかを定める. 子ノードでは各親ノードのバッテリー残量, また親ノードが接続している確定リンク数を保持している.

確定リンクの決定手法

本節では確定リンクの決定手法について述べる. 初めに確定リンクを構築する際に必要となる決定条件を 3 つ下記に示す.

- 電波強度が-70dBm 以上であること

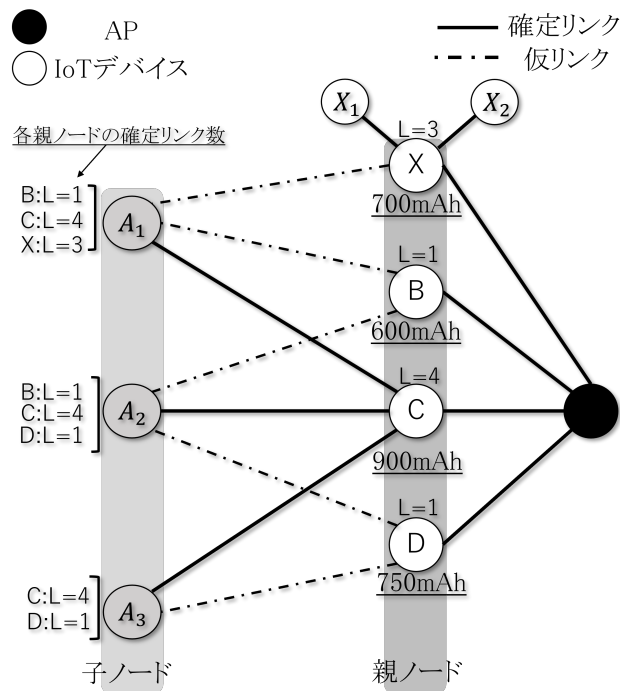


図 2 提案手法適応後における全体のメッシュネットワーク構成図

- バッテリー残量が全ての仮リンクの中で最も多いこと
- AP に接続できるリンクであること

電波強度が-70dBm 以上である理由はセンサーデータを安定して送受信できる最低値であるためである [5]. また AP に接続できるリンクである理由としては全ての IoT デバイスは外部のネットワークへ接続し, センサーデータを確実にサーバやユーザへ届ける必要がある. そのため AP へ接続しなければならない. この 3 つの条件が全て満たされる場合に親ノードが決定される.

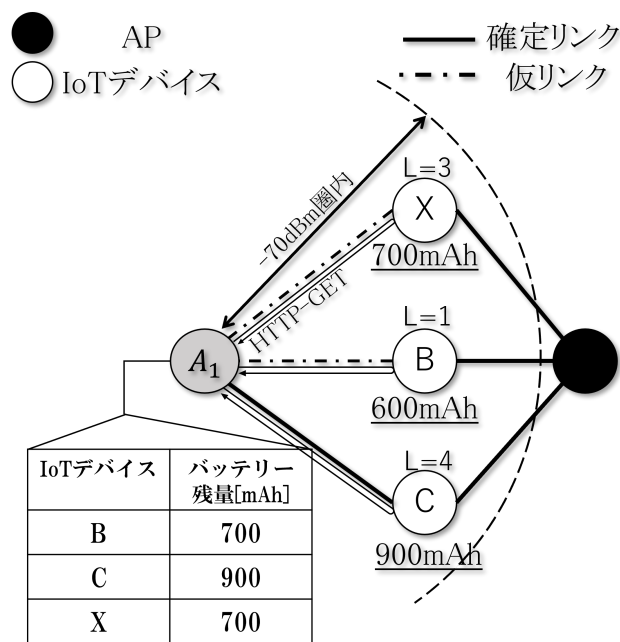


図 3 バッテリー残量に応じたリンク接続先の決定

そしてバッテリー残量を考慮した接続方式について図3にて説明する。図3は図2から子ノードであるIoTデバイス A_1 に関係があるIoTデバイスのみを抽出して示している。IoTデバイスAがIoTデバイスB, C, Dのいずれかに接続する場合を想定する。またIoTデバイスB, C, Dは全てIoTデバイスAから-70dBm圏内にあるとする。IoTデバイスAが接続先を決定したのち、IoTデバイスAと接続したいずれかのIoTデバイスとアクセスポイントが接続され、確定リンクが決定される。

図3における確定リンクの手順について説明する。IoTデバイスAはIoTデバイスB, C, Dのバッテリー残量の比較を行い最も高いIoTデバイスに接続する。そのため図3におけるIoTデバイスDが70%と最も高い数値であるためIoTデバイスAはこれに接続することとなる。全てのIoTデバイスが仮リンク中の電池残量が最も多いIoTデバイスに接続することで最終的に各IoTデバイスにおける確定リンクが決定され、メッシュネットワークが構築される。

IoTデバイス間でのデータ送受信

子ノードのIoTデバイスは確定リンクを決定する際に、親ノードのバッテリー残量を知る必要がある。本節ではその際にIoTデバイス間でどのようにデータの送受信を実行するかについて説明を述べる。メッシュネットワークの構築するに当たりバッテリー残量や各親ノードの確定リンクである必要なデータ(以下メッシュネットワーク構築データ)の送受信はセンサーデータの送信パケットと共に載せられ行われる。図4はセンサーデータ送信パケット中にメッシュネットワーク構築データが載せられているIEEE802.11フレームフォーマットをイメージした図である。センサーデータはIoTデバイスにて一定間隔にて送信される。したがって本稿でのメッシュネットワーク構築データはセンサーデータの送信間隔と同間隔で送受信され、それに従いリンクの構築も同じタイミングで実行される。

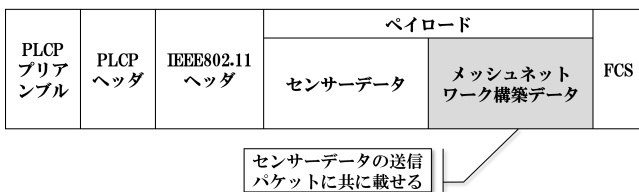


図4 センサーデータ送信パケット中にメッシュネットワーク構築データを付与

バッテリー残量の推移予測

本節でバッテリー残量の推移の予測手法について説明する。予測は子ノードのIoTデバイスで行う。バッテリー残量の推移を予測する目的は確定リンクの更新頻度を削減することである。バッテリー残量の推移を予測することで、親ノードのバッテリー残量の順位が変動するタイミングを子ノードが認識することが可能となる。したがって定期的

に親ノードのバッテリー残量を取得する必要が生まれず、確定リンクの更新に当たりメッシュネットワーク構築データの受信回数と受信データ量を削減することが出来る。

予測するバッテリー残量の推移は親ノードが対象となる。子ノードが保持している各親ノードの確定リンク数を用いて予測を行う。まず予測の計算手法について説明する。本稿では前提条件として、IoTデバイスやセンサーの種類、センサーデータ送信間隔を全て同一のものとしているため、各IoTデバイスの消費電力は同一であるとする。結果としてリンク数と消費電力の増加量は比例することとなる。従って予測については下記に示す計算式で線形に計算を行う。

$$P_{est} = P_{cur} - (L_n P_{con}) \quad (1)$$

(1)におけるそれぞれの表記は、 P_{est} は予測バッテリー残量、 P_{cur} は現在のバッテリー残量、 L_n は確定リンク数、 P_{con} はIoTデバイスにおけるリンク1つ当たりの消費電力を示している。本計算式にそれぞれの数値を当て、それぞれのIoTデバイスで計算を行い、バッテリー残量の推定を予測する。計算で求め出される予測バッテリー残量は現在時刻を T_0 とし次のデータ送受信時を T_1 とする時、この T_1 におけるバッテリー残量のことを指している。この計算を繰り返していくことによって T_n までのバッテリー残量の推移予測が可能である。

予測の過程において現時点で接続している親ノードよりもバッテリー残量が高いIoTデバイスが検知された場合、そのタイミングで確定リンクの更新を実行する。更新は子ノードのIoTデバイスが現在の確定リンクを解除し、再度リンクを構築し直す。リンクの再構築に当たっては提案方式にて前述した確定リンクの決定手法と同様である。

親ノードの確定リンク数の変更におけるデータの共有手法

本節では親ノードの確定リンク数に変動があった場合、その時点で計算している子ノードのバッテリー残量の推定予測を更新する必要がある。しかし子ノードは消費電力の増加を抑えるために確定リンク以外の親ノードと通信を行うことが出来ない。したがって間接的に確定リンク数を変更した情報を子ノードが検知しなくてはならない。その際の変更データの共有手法について述べる。

図5は図2においてIoTデバイスXの確定リンク数が $L = 3$ から $L = 2$ へと変更された際の状況を示している。IoTデバイスXでは子ノードであるIoTデバイス X_2 が確定リンクから仮リンクへと変更されている。

図5におけるデータ共有の流れについて下記に記す。

- (1) IoTデバイスXのLが3から2へと変更される。
- (2) IoTデバイスXは自身が接続している確定リンク先へと、確定リンク数の変更データをセンサーデータと共に送信する。例として5においてIoTデバイスXは

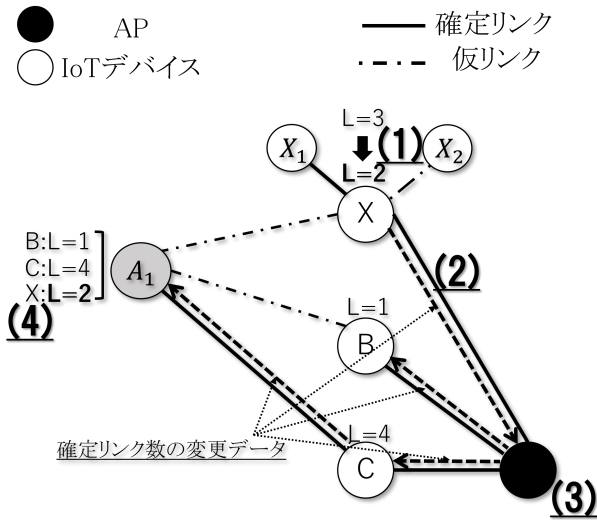


図5 親ノードにおける確定リンク数の変動の際のデータ共有

親ノードであるアクセスポイント (AP) へと変更データを送信している。

(3) IoT デバイス X から受け取った変更データを AP は自身の子ノードである、IoT デバイス B と C に対してセンサーデータの送信のレスポンスの中に載せて送信する。IoT デバイス C も同様に、受信した変更データを IoT デバイス A_1 へ送信する。

(4) IoT デバイス C から変更データを受信した IoT デバイス A_1 は自身が保持している各親ノードの確定リンク数を変更する。したがって図5では IoT デバイス X の L が 3 から 2 へと変更されているのを示している。

本手法によりメッシュネットワークの構築に必要なデータを消費電力を増加させることなくネットワーク全体の個々の IoT デバイスへ送信することが可能である。

ユースケース・シナリオ

本節では前節で先述した提案を用いたユースケースシナリオについて説明する。ユースケースシナリオでは水田における IoT デバイスを用いた水質監視システムの構築を想定する。水質監視は水量の測位と水温の計測を行う。本提案ではバッテリーにて動作する IoT デバイスの利用を想定している。そのため屋外において、かつ電力系統からの電源供給がなされず、インターネットへ接続するためのアクセスポイント (AP) を設置する、ネットワークインフラの構築が出来ない状況を考えている。以上の理由により水田での利用を策定した。

本ユースケースシナリオの構成図を図6へ示す。

図6は主に主に4つのコンポーネントと、4つの手順によって構成されている。図6におけるコンポーネントは、水質データを取得と送信するための IoT デバイス、IoT デバイスから受信したデータをサーバへ転送するためのアクセスポイント (AP)、水質データを保存するためのサーバ、

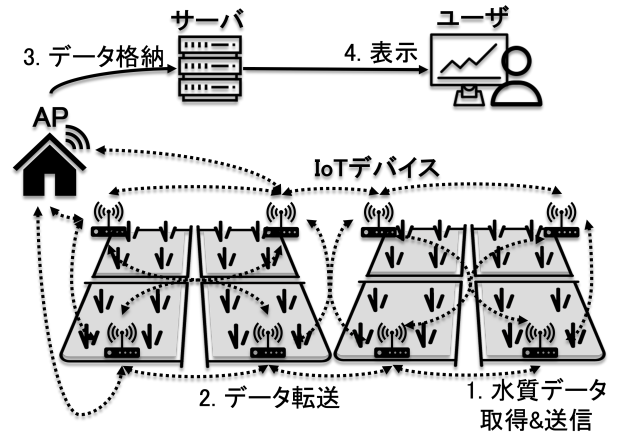


図6 水田での水質監視ユースケース

そして水質データを確認するユーザがある。IoT デバイスは合計 8 台設置してあるが、この中でアクセスポイントに直接接続できる IoT デバイスは 3 台のみである。そのため、アクセスポイントに直接接続できない IoT デバイスは本提案手法のメッシュネットワークを用いてデータをサーバまで送信する。また IoT デバイスは 1 町*1の水田あたりにつき 1 台の設置とする。

図6では水質データを取得してからユーザへデータを表示するまで、合計 4 つの過程を踏む。これは図6中にも示している。まず水田に設置されている IoT デバイスにて水質データである水温と水位データを取得する。そして得られた水質データは別の IoT デバイスへと送信される。送信された IoT デバイスはサーバまで水質データを送るために、そのデータを転送する。いくつかの IoT デバイスを経由し、AP へ転送する事でサーバへとデータが送信される。サーバでは水質データを受信すると、サーバ内のデータベースへとデータが格納される。そして最終的にユーザ (水田管理者) へとデータが表示される。

本ユースケースにおいて、本稿の提案を用いる事でユーザある水田管理者はより容易に水田の水管理を行うことができる。水位管理は稲作の肝となる。水位の確認を行うために、水田管理者 (農家) は 30 分から 1 時間間隔でその水田まで向かい直接視認するしかない。しかしこの作業はこまめに自宅と水田を往復する必要がある、肉体的にも時間的にも負担となる。この課題を解決するために本稿の提案手法は IoT デバイスを電力供給インフラやネットワークインフラをコストをかけて整える必要なく、展開することができ、低コストで水田水質監視を行うことが可能となる。

4. 実装と実験方法

本章では提案を実装した環境や各種設定やソフトウェア構成図について述べる。

*1 町とは水田の広さを表す単位の 1 つである。面積にして $9917.4m^2$ となる。

実装

本節では提案の実装手法について述べる。図7は本稿で提案した内容を実際にソフトウェアとして実装した際に構築するイメージ図である。本提案においてメッシュネットワークを構築する中でサーバといった集中管理を行う機器は用いない。そのためメッシュネットワークの構築はIoTデバイスのみで行う。図7ではアクセスポイント (AP) とIoTデバイスとして ESP32 というマイクロコンピュータにて構築している様子を示している。また実装ソフトウェアの詳細については ESP32, 1 台のみで説明を行う。図7の ESP32 のソフトウェアは全て同じ構造で実装されるため、ソフトウェアをパッケージ化し同時に展開出来るため汎用性があると言える。

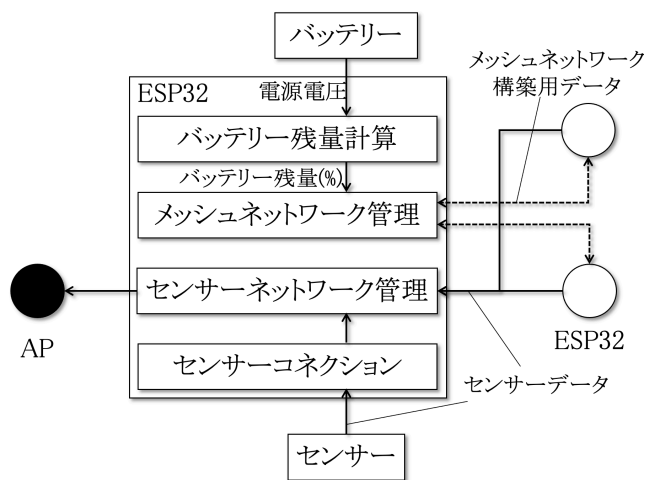


図7 ソフトウェア構成

図7中のバッテリーとセンサーはソフトウェアではなく実際のハードウェアである。図7でのソフトウェアコンポーネントについて下記に説明を記す。

- センサーコネクション
センサーからデータを取得するためのソフトウェアである。予め設定されているタイミングにて接続されているセンサーからデータを取得し、センサーネットワーク管理へセンサーデータを返すのが主な処理である。
- センサーネットワーク管理
自身のセンサーをネットワークを介してサーバに届けるのが主の役割である。さらに他の ESP32 から送信されたセンサーデータを次の AP または ESP32 に転送する役割も担っている。
- バッテリー残量計算
ESP32 に取り付けられているバッテリーの電源電圧を計測し、その値からバッテリー残量を百分率で返す処理を行う。バッテリーは通常 ESP32 に給電する際 DC/DC コンバーターにより 3.3[V] へ昇降圧するが、本ソフトウェアは DC/DC コンバーターの手前に電圧

計を設置することでバッテリーの電源電圧を正しく計測することが出来る。

- メッシュネットワーク管理
メッシュネットワーク管理は主に他の ESP32 とメッシュネットワークの構築に必要な情報のやりとりを行い、どの ESP32 とリンクを構築するかの処理を行う。またバッテリー残量計算からバッテリー残量を取得し、それを他の ESP32 へ送信する事や他の ESP32 のバッテリー残量を受信し、リンク構築アルゴリズムにて接続先を決定する役割も担っている。

さらに図8に開発ソフトウェアのレイヤーについて示す。開発レイヤーはアプリケーション層であり、各IoTデバイスの通信は物理層を通して IEEE802.11n で行い、通信方式は TCP を用いる。TCP を用いる事でデータ転送の通信信頼度を増加させる。

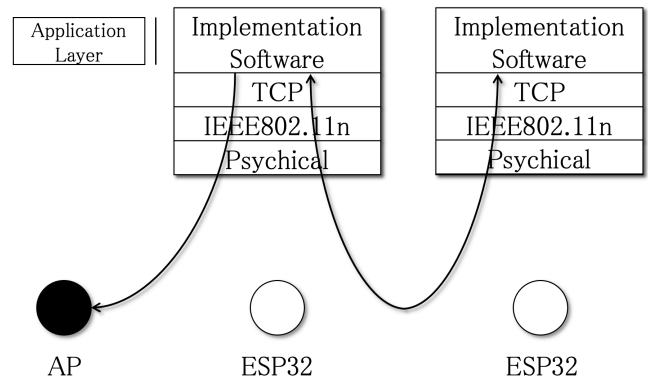


図8 実装ソフトウェアの開発レイヤー

実験環境

表1は実装におけるハードウェアを示している。

IoT デバイス	ESP-WROOM-32
電力計センサー	INA226PRC
温度センサー	S-8581A
バッテリー	リチウムイオン電池 4000mAh

表1 実装のハードウェア詳細

実験では本提案による実装によって、全体の総消費電力の変化と消費電力の適切な分散が為されることを確認する。そして消費電力の分散によってバッテリー残量不足による停止を抑えることを分析する。

5. 評価手法と分析手法

評価手法は提案手法と既存手法である電波強度のみにてメッシュネットワークの構築を行う場合とで各比較を行う。比較対象を下記に記す。

- 各 IoT デバイスの消費電力量とその総和
- 1 台目の IoT デバイスが停止するまでの時間

● センサーデータ受信率

各IoTデバイスの消費電力量と総和と比較に関しては本稿にて提案したアルゴリズムを導入した場合であっても既存手法と消費電力量の総和が増加しないことを示すのを目指している。

1台目のIoTデバイスが停止するまでの時間に関しては本稿の目的がバッテリー駆動時間の延長であるため、既存手法と比較し1台目が停止するまでの時間を計測し、その時間がより長くなることを示す。

センサーデータ受信率はIoTデバイスから取得・送信されたセンサーデータが確実にサーバへ届けられているか比較を行うために検証する。例として親ノードのIoTデバイスが停止し、子ノードのIoTデバイスが停止した親ノード以外に接続できるノードがおらず、センサーデータの取得はできるが送信が行えない状況に陥る度合を検証する、ということである。

本稿では、ノード全体のバッテリー駆動時間が延長されることでセンサーデータをより確実にサーバへ届けることを目的としているため、その目的評価に付随する内容の検証を行う。

6. 議論

本稿における提案手法では、前提条件としてIoTデバイス、バッテリー、センサー、センサーデータ、センサーデータの取得する間隔を全て同一のものとしている。したがって消費電力がどのIoTデバイスでも同一となり、接続するリンク数の増加量とそれに伴う消費電力量の増加量が比例する。しかし、実際のユースケースやサービスでは全て同一のものではなく、ハードウェアのバージョンが異なることによる消費電力の変動や、扱うセンサーデータの種類が増加することによるセンサーデータの送信間隔の変動がある。したがってヘトログニアスな状況下での最適化を目指すのが望ましい。そのため、その解決手法として各IoTデバイスの消費電力量と、センサーデータの送信間隔を現在の提案手法に組み込むことで更に精度の高い動的ルーティングを行うことが可能となる。

7. おわりに

本稿ではバッテリーで動作するIoTデバイスにおいてメッシュネットワークを構築する際、既存の電波強度でリンクを設定するのでは消費電力がAPに近いノードに集中、もしくは電池残量が低いIoTデバイスに対しても複数のリンクが接続されてしまい、メッシュネットワークにおけるノード全体のバッテリー駆動時間が減少してしまうことを課題とした。この課題の解決を図るため、メッシュネットワークノード全体のバッテリー駆動時間をする手法を提案した。提案手法では、子ノードのIoTデバイスがどのIoTデバイスを親ノードとするか決定できるようにした。これ

によりメッシュネットワーク全体を管理するサーバを設置する必要がなくなり、IoTデバイスのみでメッシュネットワークを構築することが可能となる。また親ノードの決定には子ノードが親ノード候補の消費電力量を予測し、バッテリー残量の減少の推移を予測することで、より効率的に動的なルーティングを行うことを可能とした。

本研究は3章のユースケースにて記したように電力供給・ネットワークインフラが整えられていない場所、地域にIoTデバイスを設置しデータ収集を行う場合に最も利点を発揮することが可能である。インフラ設備を整えずともIoTデバイスを設置することでより低コストにユーザが任意のデータの収集を行うことに貢献する。

参考文献

- [1] Chin, W. S., soo Kim, H., Heo, Y. J. and Jang, J. W.: A Context-based Future Network Infrastructure for IoT Services, *Procedia Computer Science*, Vol. 56, pp. 266–270 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.207> (2015). The 10th International Conference on Future Networks and Communications (FNC 2015) / The 12th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC 2015) Affiliated Workshops.
- [2] Wan, T., Karimi, Y., Stanačević, M. and Salman, E.: Perspective Paper—Can AC Computing Be an Alternative for Wirelessly Powered IoT Devices? *IEEE Embedded Systems Letters*, Vol. 9, No. 1, pp. 13–16 (2017).
- [3] Myridakis, D., Spathoulas, G., Kakarountas, A., Schoini-anakis, D. and Lueken, J.: Anomaly detection in IoT devices via monitoring of supply current, *2018 IEEE 8th International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin)*, pp. 1–4 (2018).
- [4] Jolly, B.: The Last Thing IoT Device Engineers Think About: End of Battery Life Behavior for IoT Devices, *2019 IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, pp. 837–840 (online), DOI: 10.1109/MWSCAS.2019.8885125 (2019).
- [5] Tatsuta, A., Shimazaki, Y., Emura, T., Asada, T. and Hamabe, T.: Throughput Performance Prediction Approach for Wi-Fi Site Surveys, *2021 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, pp. 126–129 (online), DOI: 10.1109/RWS50353.2021.9360357 (2021).
- [6] Kashyap, R., Azman, M. and Panicker, J. G.: Ubiquitous Mesh: A Wireless Mesh Network for IoT Systems in Smart Homes and Smart Cities, *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/ICECCT.2019.8869482 (2019).
- [7] Liu, Y., Tong, K.-F., Qiu, X., Liu, Y. and Ding, X.: Wireless Mesh Networks in IoT networks, *2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition*, pp. 183–185 (online), DOI: 10.1109/iWEM.2017.7968828 (2017).
- [8] Arezoomand, A. S. and Pourmina, M.: Prolonging network operation lifetime with new maximum battery capacity routing in wireless mesh network, *2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, Vol. 4, pp. 319–323 (online), DOI: 10.1109/ICCAE.2010.5451679 (2010).
- [9] Brandão, A. S., Lima, M. C., Abbas, C. J. B. and

Villalba, L. J. G.: An Energy Balanced Flooding Algorithm for a BLE Mesh Network, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 97946–97958 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993819 (2020).

- [10] Jiang, X., Zhang, H., Barsallo Yi, E. A., Raghunathan, N., Mousoulis, C., Chaterji, S., Peroulis, D., Shakouri, A. and Bagchi, S.: Hybrid Low-Power Wide-Area Mesh Network for IoT Applications, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 901–915 (online), DOI: 10.1109/JIOT.2020.3009228 (2021).
- [11] Liu, J., Pang, Y., Ding, H., Cai, Y., Zhang, H. and Fang, Y.: Optimizing IoT Energy Efficiency on Edge (EEE): A Cross-Layer Design in a Cognitive Mesh Network, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 20, No. 4, pp. 2472–2486 (online), DOI: 10.1109/TWC.2020.3042704 (2021).