

Bluetooth メッシュ規格、プロフェッショナル照明のニーズに適合するワイヤレス技術を採用

シモン・スルピク、シモン・ジャドコシュ

Bluetooth メッシュ規格のアーキテクチャについて知っておくべきことと、IoT ネットワーク技術がコネクテッドSSL に対して最適である理由について、説明する。

Bluetooth メッシュネットワーク技術がついに登場した。待った甲斐があっただろうか。コネクテッド固体照明 (SSL: Solid State Lighting) の幅広い普及を本当に促進できるだろうか。また、プロフェッショナル照明を念頭に設計されているというが、具体的にはどういうことだろうか。米シルヴェール社 (Silvair) は、この新しいワイヤレス規格の策定に主導的な立場で関与した企業の1社として、読者の現在の疑問に答えることができる。同規格の策定経緯を振り返り、モノのインターネット (IoT: Internet of Things) の動きにLED 照明を組み込むにあたってそれが与え得る影響について考察したいと思う。

難局に直面した過去

シルヴェール社がそもそも Bluetooth に関心を抱いたのは2013年、米グーグル社 (Google) が「Android 4.3」(API レベル18) をリリースし、BLE (Bluetooth Low Energy) のサポートを導入した時だった (<http://bit.ly/2xUccvh>)。同社は当時、Bluetooth にそれほど馴染みがあったわけではないが、(たとえば ZigBee で使用されていた) IPv6 over IEEE 802.15.4 規格が夢物語であることをすでに見抜いていた。6Lo の圧縮 (6LoWPAN: IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Network、IP ネットワークを組み込みまたはIoT デバイスに導入することを目的とした軽量プロトコル、<http://bit.ly/20t1qRN>)

をもってしても、IPv6 は普及するにはとにかく重く、加えて802.15.4 はあまりに低速で、それを加速化させることはできなかった。2012~2013年にかけてシルヴェール社は、現在の Thread に非常によく似たものを実験した (<http://bit.ly/2t4mCGn>)。しかし最終的に、この組合せ (IPv6+802.15.4) では、ワイヤレスのプロフェッショナル照明のニーズには対応できないという結論に至った。そのためシルヴェール社は、適切な無線技術を探し続けていた。

Android でBLE をサポートするというグーグル社の発表は、一縷の望みだった。BLE はすでにiOS でサポートされていたので、これにAndroid が加わったことで、試す価値のある有力な候補のように思われた。しかしこれもうまくはいかなかった。シングルホップの通信距離が非常に限られており、ハブアンドスポーク (Hub-and-Spoke) 型のトポロジは、照明のニーズに有効とはまったく言えないものだった。BLE では、数件のポイントツーポイント接続しか提供できない。心拍モニタをスマートフォンに接続するための手段としては素晴らしいが、ホテルロビーの天井に取り付けられた500個の照明を制御するためにはまったく使えない。しかし、望みはあった。

BLE で解明された動作原理

BLE の根底にある動作原理は非常に



Bluetooth メッシュネットワークにより、照明を主要なネットワークノードとして使用する場合は特に、ビルシステム全体が秩序ある形で通信可能となる。(写真提供: Bluetooth 特別部会)

有望なものだった。シルヴェール社は数カ月のうちに、500mのシングルホップ距離で通信可能なBLEモジュールを構築することができた。また、適切なソフトウェアエンジニアリングを適用すれば、そのモジュールでBluetoothの複数のロール(GAPオブザーバーとGAPブロードキャスター)を同時に実行できることも明らかになった(GAPはGeneral Access Profile[汎用アクセスプロファイル]の頭文字)。この実験は2014年初頭に実施されたもので、現在、メッシュプロファイル仕様の基本要件に組み入れられている(<http://bit.ly/2yrrbgN>、セクション3.3.1の最終段落を参照のこと)。

これは、Bluetoothメッシュネットワークの概念といえるものである。結局のところ、商用Bluetooth SoC(System on Chip)のソフトウェア部分を、メッセージを受信して再送信できるように変更することができれば、Bluetoothでメッシュネットワークを構築することが可能となる。つまり、このソフトウェアの詳細を明確にして、誰もが同じことを行えるようにオープン仕様として文書化するだけの「簡単」な話だった。

この「簡単」と思われた作業に3年以上の年月を要し、公開された仕様は3つにわたり、合計およそ1000ページにも及ぶものとなった。実際、複雑なソリューションだった。しかしその過程で、コネクテッド照明用の確かな技術の概要を、数十ページにまとめて数カ月以内に公開するのはまず無理だということがわかった。ワイヤレスメッシュネットワークの性質は複雑である。ジェットエンジンや自動車が複雑であるのと同じように、私たちが日常的に使用するセルラーネットワークなど、多くの素晴らしい技術が複雑である。それらがすべて成功を取めているの

は、複雑だからであり、問題の本質を解決しているからである。Bluetoothメッシュで行おうとしていることもそれと同じである。リソースの乏しいIoT環境の中で、コネクテッド照明ネットワークの有線状態に近い性能を確保しつつ、低い消費電力で通信するという複雑な課題に対処しようとしている。それを目指す多数の技術が登場したが、これまでにそれを達成したものはない。

カギを握るのは、パケット

Bluetoothメッシュはほかとは違うと信じてよいのはなぜか。Bluetoothメッシュネットワーク仕様(<http://bit.ly/2yrrbgN>)が公開されたことで、この新しいワイヤレス規格のさまざまな構成要素について分析や議論を始めることができる。メッシュには多数の斬新で独特な概念が存在するが、おそらく最大のアセットであり差別化要因となるのはパケットである。パケットは非常にコンパクトである。このコンパクト性が、Bluetoothメッシュネットワークのスペクトル効率(とスループット)の高さにつながっている。

無線は共有媒体であり、データパケットの衝突が解決すべき主要な問題の1つである。スケラビリティがコネクテッド照明ネットワークの大きな課題であるのは、そのためである。その理論は単純で、パケットが短いほど衝突は少なくなる。しかし問題は、どこまで短くできるかだ。メッシュプロファイル仕様のセクション3.4.4に記載されているように、29バイトまでというのが、その答えである。

当然ながら、このような設計にはまず基本要素がある。テキスト表現の代わりとなる、圧縮されたバイナリペイロードだ。幅広い種類の使用事例(コ

ネクテッド照明、ビルオートメーション、センサなど)に対応して、アプリケーションペイロード用に11バイトというのが適切なようである。規格では、オペコード用に1~2バイト、センサによる測定値や、遷移時間にともなう多次元の光特性(明度、色相、彩度)といったパラメータ用に最大10バイトを許容している。

それ以外に、アドレス指定および伝搬制御(SRC、DST、CTL+TTL:合計5バイト)と、セキュリティ(IVI+NID、SEQ、AppMIC、NetMIC)という2つの要素が存在する。オーバーヘッドとみなされるかもしれないが、必要不可欠なオーバーヘッドである。IVI+NIDは1バイトで、ネットワークの識別に使用される(これは相互作用のためのキーを持つ、筆者が知っているネットワークだろうか)。SEQは3バイトで、ゆっくり伝搬されるIV Indexという独自の概念を合わせて長さ7バイトのシーケンス番号を構成する。メッシュネットワーク上で送信される各パケットには、与えられたSRCアドレスごとに一意のシーケンス番号がある。ここで巧妙な点は、その無線インタフェースパケットには3バイトしか含まれていないことである。残りの4バイトは変化が少なく、ネットワークにおいて「既知」である。シーケンスは、リプレイパケット(きわめて平凡なセキュリティ攻撃)の検出において重要であるほか、ネットワークとアプリケーションの両方のノンス(使い捨てのランダム値)の主要要素であるという点でも重要である。上記の仕様のセクション3.8.5を参照してほしい。

システムの保護

MIC(Message Integrity Check)は、システムのセキュリティレベルを定義



SSL 製品開発者は、シルヴェール社の評価キットを使用することによって、Bluetoothメッシュの機能を試用し、コネクテッド照明製品の設計サイクルを加速化させることができる。

する。Bluetoothメッシュは2階層のセキュリティとして、ネットワーク層とアプリケーション層を備える。メッセージは、2つの独立したキーで保護することができる。これは、リレーノードがアプリケーションペイロードの改ざんを許容することなく、ネットワーク層上のメッセージを認証するために役立つ。ドアロックにメッセージをリレーする電球は、ペイロードを「開」から「閉」に変更することはできないが、パケットが同じネットワークに所属するかどうかを確認することはできる。ネットワーク層のMICの長さは8バイトまたは4バイトのどちらでもよい。4バイトの場合は、こちらも8または4バイトのアプリケーション層のMICと組み合わせられる。

その最終的な結果として、強力なセキュリティと柔軟なアドレス指定方法を備えつつ、ほぼすべてのビルオートメーション、照明制御、センサアプリケーションに対して十分なアプリケーションペイロードが得られる。そのすべてがかなりコンパクトなフォームファクタに収められる。BLEで提供される変調方式と組み合わせれば、非常に軽量にもなる。プリアンプル、アクセスアドレス、巡回冗長検査(CRC: Cy-

clical Redundancy Check)など、必要なすべての無線インタフェースフィールドを含めて、合計47オクテットである。その結果、単一周波数上の単一伝送の持続時間は400 μ s未満となる。これは、他の既存のワイヤレス技術を用いた同等のメッセージ伝送の10分の1に相当する。また、Bluetooth 5で導入された新しい2M PHYを利用すれば、このメリットを倍増できる可能性がある。

すべてのワイヤレスシステムの成功を基本的に左右するのは、スペクトル効率である。航空会社の成功が、基本的に燃費によって左右されるのと同じだ。低消費電力でメッセージが非常に短い場合は、Bluetoothメッシュで他のワイヤレスソリューションよりも数ケタ高い効果が得られる。データ伝送に関する限りでは、IoT時代の多大な期待に応えることのできる最初のワイヤレス規格である。

なぜ照明なのか

優れているとはいっても、ITや通信分野の技術が照明に対して適切なのだろうかという疑問に思う人もいるかもしれない。Bluetooth特別部会(SIG: Special Interest Group)のメッシュワ

ーキンググループは、Bluetoothメッシュシステムのアーキテクチャに取り組む上で、解決しようとしていた問題の本質を深く解明することを常に心がけていた。メンバーらは特に、スマート照明環境の多数の課題に対処することにおおいに力を注いでいた。照明をメッシュシステムの最重要アプリケーションとして扱うには、多くの理由がある。最も重要な点として、照明は至る所に存在し、電源を必要とする。そのため、見方によって、照明制御システムは目標そのものと捉えることもできれば、メッシュ接続のインフラストラクチャーに基づくさらなるサービスを開発するための最初のステップにすぎないとみなすこともできる。

空港、病院、企業の敷地や、複数のテナントが入った高層オフィスビルを想像してほしい。そこで、おそらくは数千もの無線ノードで構成される、高密度のインフラストラクチャーを必要とするサービスを展開したいとする。適切なハードウェアを導入するにはかなりのコストがかかる。各コンポーネントに設置場所と電源が必要になるためだ。ここで、各照明がすでに設置済みで電源に接続されており、所望のワイヤレスアプリケーションに対応可能な状態にあるとしよう。状況は一変し、ハードウェアはすでに存在することになる。つまり、数千の低消費電力でワイヤレスのコンピューティングノードが存在し、それらがメッシュネットワークを構成する。

照明分野がBluetoothメッシュ技術において非常に重要である理由はそこにある。この分野に対して優れたソリューションとなるために、新しいワイヤレス規格は、コネクテッド照明アプリケーションに対して傑出したものでなければならなかった。それ以外はす

べて、二の次である。

照明制御の難しさ

照明に対する適切なソリューションを構成する重要な要素は多数存在する。2つの簡単な例を詳しく見ていこう。

まず、いわゆるポップコーン効果を排除することを考える。ここには、ワイヤレス照明制御システムに関する2つの課題がある。

- ・制御メッセージの伝達という点において、絶対的な信頼性が必要である。天井に取り付けられた照明が1つでも点灯しないならば、それを直ちに検知して、システム障害とみなさなければならない。
- ・制御コマンドの実行を同期しなければならない。ポップコーン効果はシステム品質の低下につながり、従来の照明制御の円滑で同期された動作と比べて、明らかな後退となってしまう。

Bluetooth メッシュネットワークでは、上述の両方の課題に確実に効果的に対応できるようにするために、かなりの労力が注がれている。まず、マルチキャストトラフィックに対して主に最適化されている。そのため、天井に取り付けられている照明の数が10個でも100個でも1000個でも、単一のメッセージによってそのすべてを制御することができる。そのメッセージを受信するのは、実際には照明の約90%かもしれない。最終的にすべての照明にそのメッセージが確実に届くように、メッセージは数回繰り返し送信される。メッセージを2回送信すれば、少なくとも1つのメッセージを受信する確率は約99%にまで上昇する。5回連続でメッセージを送信すれば、信頼性は99.999%にまで高まる。

ここで、最初のメッセージを受信す

る照明もあれば、後続のいずれかのメッセージを受信する照明もある。しかし、すべての照明を一斉に点灯したい。照明制御はこれまで数十年間にわたって、そういうものだったからだ。新規格でその動作を保証するために導入されているのが、Delayパラメータである。5つのメッセージが20ms間隔で送信されるとしよう。最初のメッセージはT=0に、Delayを100msに設定して送信される。2つめはT=20に、Delayは80msで送信される。以下同様にして、最後の5つめのメッセージはT=100に、Delayは0で送信される。これにより、個々の照明がどのメッセージを受信したとしても、すべての照明が一斉に点灯する。当然ながら、全体的に100msの実行遅延が生じるが、それは人間が認識できないレベルである。基盤となる無線の速度に、マルチキャスト送信や、時間を補償した再送信を組み合わせてことによって、アプリケーション要件に合った最終効果が保証される。

2つめの例はさらにシンプルだが、Bluetoothメッシュ仕様を特徴づける細部に焦点を当てる、適切な例である。電源が一旦切断された後に復旧した場合、照明システムはどのように動作するだろうか。どのように動作するのが適切だろうか。場合による、というのがその答えだ。もちろん、照明の種類やその目的などによって異なる。電源サイクルを経なければ点灯しないというのは避けたい場合もあるだろう(残念ながら、人気の高い一部の家庭用照明システムでは、これが採用されている)。しかしそれが望ましい動作と考えられるケースも、他に多数存在する。

Bluetoothメッシュネットワークには、OnPowerUpという設定状態がある(メッシュモデル仕様のセクション

3.1.4)。これをOff、Default、またはRestore(電源切断前の最後の値に戻す)に設定することができる。この設定は、Light Lightness Default(セクション6.1.2.4)という別の設定状態と連動する。Light Lightness Defaultには、任意のレベルか、最後のゼロ以外の値(たとえば、照明を20%の明るさに落とした状態で消灯した場合は、電源サイクル後は、全灯状態ではなく20%の明るさで点灯する)が設定可能である。ここにも、他のワイヤレスソリューションよりもはるかに細かい部分にまで、設計チームが配慮している様子が表れている。

規模の拡大

スケーラビリティは、堅牢で低消費電力のメッシュネットワーク技術の基盤を模索する中で、シルヴェール社がBLEに着目した最初の理由だった。そのワイヤレス機能は、利用可能なほかのどの技術よりもはるかに高かった。最大の要因は、パケット構造が非常にコンパクトで、低エネルギーで最も高速な無線で伝送されることにある。ただし当然ながら、どのソリューションにも一定の限界がある。ではBluetoothメッシュの限界は何かというと、いつものことながら、それは場合による。ネットワークの状況(どのような種類のメッセージをどれだけ送信し続けているか)やその設定によって異なる。Bluetoothメッシュには多数のパラメータがあり、それらを細かくチューニングすることによって特定の要件に合わせてその性能を調整することができる。

大まかな経験則として、デバイスが200台(またはそれ以下)の場合、チューニングの必要はまったくないと考えてよい。その状況でいずれか2つの通信が衝突する確率はかなり低いので、そ

うなった場合は喪失してもよしとする。

デバイスが200台を超えると、通信量によってはいくらかの衝突が生じる可能性がある。Bluetoothメッシュで、優れたパケット到達率を維持しつつ、規模を大幅に拡大できるように、ネットワークを最適化するための多数の手段が提供されているのはそのためである。その中でも最も重要なものを以下に示す。

TTL (Time To Live)：メッセージ伝送に許容されるリレーホップ数を定義する。大規模なネットワークの場合、個々の送信元がネットワーク全体にメッセージを伝達しなければならないケースはまれである。たとえば占有センサは通常、同じ部屋の中の照明器具だけに通知できればよい。あるいは、ゲートウェイに通知する場合もあるが、その部屋の状況に誰も興味がないような場所を含めて、建物全体にメッセージを送信する必要はない。Default TTLに低い値(場合によっては0を設定してもよい)を設定するのは、スケラビリティを大幅に高めるための有効な手段である。

リレー：受信したメッセージを再送信することにより、明らかに一定空間内のトラフィックは倍増する。通常は、小規模なネットワークをシームレスにセットアップできるように、リレー機能のデフォルト設定は「オン」になっている。大規模なネットワークでは、リレーとして指定するデバイスの数を慎重に選択し、不要な箇所ではリレーを無効にすることで、大きな効果が得られる。スウェーデンのエリクソン・リサーチ社 (Ericsson Research) は最近、900近いメッシュデバイスが互いに頻繁に通信するオフィスフロアをモデル化した、詳しいケーススタディを公開した (<http://bit.ly/2xV2XLm>)。実際

のネットワークから取得した実データに基づいている。オフィスフロアのようなケースでは、ノードの約1.5%をリレーとして割り当てれば十分であることが示されている。

サブネット：メッシュネットワークの規模はかなり大きくなる場合があり、複数階からなるビル全体にわたることもある。しかし、異なるフロアのデバイスが互いに通信しなければならないケースは非常にまれである。ネットワーク全体のリキー (re-key) や、ビル全体のシャットダウンといった管理タスクを除けば、各フロアは通常、自己完結している。ネットワークトラフィックの区分としてサブネットが優れたメカニズムとなるのは、この事実に基づいている。各メッシュノードは複数のサブネットに属することができるので、すべてのフロアにわたるベースネットワークを設けてから、各フロアに対してサブネットを定義するのが、良い方法である。(管理タスク以外は)メインネットワークではなく、自らが属するサブネット上のみ送信するように、ノードを設定する。1つのメッシュネットワークに、4000を超えるサブネットを設定することができる。それほど膨大な規模の構造はまだ構築されたことがない。そのような規模に達するまでは、サブネットで、考えられる任意のネットワークの規模を拡大できるはずだ。

新しい時代の幕開けか

シルヴェール社のワイヤレス設計者らによると、Bluetoothメッシュのバージョン1.0は、誰も予測をはるかに超える高い能力を備えるという。低消費電力で完全相互運用可能なメッシュネットワークのための完全なシステムであり、柔軟で深いアプリケーション

層がメッシュモデル仕様とメッシュデバイスプロパティ仕様で定義されている。メッシュモデルでネットワークノードの基本機能を定義することにより、デバイスは、自らが実行する機能、接続可能な他のノード、それらに対して実行可能なアクションを認識できるようになる。

最大限の設計柔軟性を達成するために、モデルには、特定のアプリケーションに応じて調整可能な複数のプロパティが含まれている。メッシュモデルは、標準的な照明機能全体を網羅するだけでなく、占有検知、採光、時間スケジュールを含む、高度な照明制御戦略などの追加機能を完全にサポートする。また、調整可能な複数のパラメータとプロパティも備えており、世界中でCO₂排出量を規制する動きが加速する中、ますます厳しくなると予測される環境要件に対し、ビルの将来性を実質的に保証するものとなっている。

Bluetoothメッシュネットワーク仕様がすでに公開されたことで、まもなくこうしたネットワークが実際に動作する様子を目にして、この新しいワイヤレス規格に、コネクテッド照明を1つ上の段階へと押し進めるだけの力があるかどうかを確認できるようになるだろう。すでに確かだと思われるのは、照明分野の一般的な課題に対する、このように包括的なアプローチを築き上げてきた技術はほかにはないということである。その取り組みが十分だったかどうかは、時間が経てば明らかになるだろう。

著者紹介

シモン・スルピク (SZYMON SLUPIK) は、米シルヴェール社 (Silvair) の最高技術責任者 (CTO) で、Bluetoothメッシュワーキンググループ会長。シモン・ジャドコシュ (SZYMON RZADKOSZ) は、シルヴェール社のテクニカルライター。URL: silvair.com