

## コンシューマ・システム論文

遠隔地にある PAN デバイスとの直接通信を可能とする  
VPAN システム酒井 恵梨香<sup>1,a)</sup> 池内 紀貴<sup>1</sup> 鈴木 秀和<sup>1,b)</sup>

受付日 2021年2月26日, 採録日 2021年6月26日

**概要:** IoT デバイスの通信規格として Bluetooth を始めとした PAN (Personal Area Network) が主流となっている。しかし、PAN デバイスは通信可能範囲に制限があるため、ユーザは宅内と宅外で異なる通信手段に基づくアプリケーションを使い分ける必要がある。本論文では、遠隔地にある PAN デバイスとの直接通信を可能とする VPAN (Virtual PAN) システムを提案する。PAN デバイスの制御命令を処理する VPAN ミドルウェアをユーザ空間で設計し、ユーザの操作端末と宅内のホームゲートウェイに実装する。両デバイスの VPAN ミドルウェアが連携して動作することにより、遠隔地の PAN を操作端末周辺の PAN に仮想的に統合する。これにより、ユーザは場所を問わず一般的な PAN と同じ手順で近隣と遠隔地双方の PAN デバイスを制御できる。Bluetooth に対応した VPAN ミドルウェアのプロトタイプを Android スマートフォンに実装し、BLE (Bluetooth Low Energy) 機器探索およびデータ通信に関して評価を行った。その結果、近隣および遠隔の BLE 機器を統合的に発見でき、遠隔地とのデータ通信は Bluetooth で定義されているタイムアウト時間よりも十分に短い時間で完了していることを確認した。

**キーワード:** 無線 PAN, IoT, 遠隔制御, Bluetooth

Virtual Personal Area Network System that Enables Direct  
Communication with PAN Devices in Remote LocationsERIKA SAKAI<sup>1,a)</sup> NORIKI IKEUCHI<sup>1</sup> HIDEKAZU SUZUKI<sup>1,b)</sup>

Received: February 26, 2021, Accepted: June 26, 2021

**Abstract:** Personal Area Network (PAN) such as Bluetooth has become the mainstream communication standard for IoT devices. However, since PAN devices have a limited communication range, users need to use different applications based on different communication methods at home and outdoor. This paper proposes a Virtual PAN (VPAN) system that enables direct communication with PAN devices in remote locations. The VPAN middleware, which processes the control instructions of PAN devices, is designed in the user space and implemented in the user's operation device and the home gateway. The VPAN middleware of both devices works in cooperation with each other to virtually integrate the remote PAN into the PAN around the operation device. This allows the user to control both nearby and remote PAN devices by the same procedure as a general PAN regardless of location. We implemented a prototype of the Bluetooth-enabled VPAN middleware on an Android smartphone and evaluated its performance in terms of Bluetooth Low Energy (BLE) device discovery and data communication. As a result, we confirmed that the prototype was able to discover both neighboring and remote BLE devices in an integrated manner, and that the data communication with the remote location was completed in a sufficiently shorter time than the timeout time defined by Bluetooth.

**Keywords:** wireless PAN, IoT, remote control, Bluetooth

<sup>1</sup> 名城大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Technology, Meijo University, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan

a) erika.sakai@ucl.meijo-u.ac.jp

b) hsuzuki@meijo-u.ac.jp

## 1. はじめに

パソコンやスマートフォンだけでなく、家電や自動車など身の回りのあらゆるモノがインターネットなどのネット

ワークにつながり、相互に情報をやりとりして制御を行う IoT (Internet of Things) が普及している。インターネットに接続可能な機器およびセンサネットワークの末端機器としての IoT デバイスの数は、2019 年時点で世界で 253.5 億台存在し今後 2022 年には 348.3 億台に増えることが予想されている [1]。IoT デバイスに採用されている主な通信規格として、スマート家電などの制御には Bluetooth が、センサネットワークの構築には ZigBee などの PAN (Personal Area Network) 通信規格があげられる。Bluetooth デバイスの年間総出荷台数は 2019 年時点で 42 億台、2024 年には 60 億台を超えることが予想されており、PAN デバイスは今後ますます普及していくことが考えられる [2]。しかし、PAN デバイスは通信可能範囲に制限があるため、宅外から宅内のデバイスを直接 PAN 通信規格で制御することはできない。

遠隔地に存在する PAN デバイスと通信を可能とする遠隔制御サービスが PAN デバイス製造メーカーなどから提供されている。遠隔地に存在する PAN 通信規格の家電を制御するサービスとして、SmartThings [3] がある。SmartThings では、ユーザは SmartThings アプリを用いてインターネット上のサーバに接続する。ユーザが PAN デバイス操作を行うとサーバが宅内の SmartThings Hub に制御情報を送信し、Hub が対象の PAN デバイスと ZigBee や Z-Wave 通信を行うことで遠隔制御が実現する。このほかにも、遠隔地の PAN デバイスの制御システムとして PUEC (Peer-to-Peer Universal Computing Consortium) を用いた制御 [4], [5] が提案されている。このシステムでは、ユーザは携帯電話から PUEC プロトコルを実装したゲートウェイに接続する。ユーザからのデバイス制御命令を受信したゲートウェイが対象の PAN デバイスと Bluetooth や ZigBee 通信を行うことにより、遠隔制御を実現している。しかし、これらのシステムでは、制御可能なデバイスに制限がある、ユーザは宅外と宅内で異なるアプリケーションを使い分ける必要があるなどの課題が存在する。

岡田らは、ユーザが外出先から自宅の Bluetooth デバイスを Bluetooth 通信で制御することが可能なシステムを提案している [6], [7]。このシステム (以降、従来システム) では、Bluetooth プロトコルスタックにおけるソフトウェアとハードウェア間で交換される制御メッセージを遠隔地に伝送する。これにより、ユーザは自身の近隣に遠隔地の Bluetooth デバイスが仮想的に存在しているように認識することができる。しかし、従来システムはカーネル空間を拡張して機能を実装する必要があるため、スマートフォンなどの操作端末での実現が困難である。また、Bluetooth 以外の PAN 通信規格への対応も容易ではない。

本論文では、従来システムの考え方を踏襲しつつ、かつ実装が容易で複数の PAN 通信規格に対応可能な VPAN (Virtual PAN) システムを提案する [8], [9]。PAN デバイ

スの制御命令を処理する VPAN ミドルウェアをユーザ空間で設計し、ユーザの操作端末内と宅内のホームゲートウェイ内のミドルウェアを連携して動作させる。これにより、遠隔地の PAN を操作端末周辺の PAN に仮想的に統合することができる。VPAN システムを実現するために、Java を用いて VPAN ミドルウェアのプロトタイプ実装を行い、Android スマートフォンに導入して評価実験を行う。近隣および遠隔地に存在する Bluetooth Classic 機器と BLE (Bluetooth Low Energy) 機器を統合的に発見およびデータ通信できることを確認する。

以下、2 章で既存の遠隔制御システムについて、3 章で提案システムについて述べる。4 章で提案システムの実装および動作検証について述べ、5 章でプロトタイプを用いた評価を行い、6 章でまとめる。

## 2. 既存システム

### 2.1 スマート家電の遠隔制御サービス

市販されているスマート家電の遠隔制御サービスとして、SmartThings [3] がある。SmartThings は宅内の TCP/IP, ZigBee, Z-Wave 家電を制御可能なシステムである。図 1 に概要を示す。このサービスでは宅内に IP, ZigBee, Z-Wave インタフェースを持つ SmartThings Hub を設置し、ユーザは SmartThings アプリケーションをインストールしたスマートフォンから操作を行う。ユーザはあらかじめ自身の SmartThings アカウントでログインし、サーバに宅内の Hub と PAN デバイスを登録しておく。ユーザがスマートフォンで PAN デバイスを操作すると、サーバは宅内の Hub に制御情報を送信する。Hub は受信した制御情報に基づき、対象のデバイスと対応する通信規格で通信を行うことにより、PAN デバイスを遠隔制御することができる。

しかし、このサービスでは SmartThings 対応 PAN デバイスのみ制御可能であるという制限がある。また、SmartThings Hub は Bluetooth に非対応であるため、Bluetooth デバイスを遠隔制御することはできない。宅内の Bluetooth

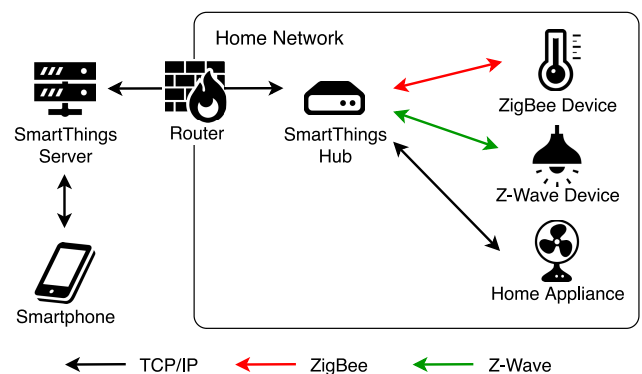


図 1 SmartThings の概要  
Fig. 1 Overview of SmartThings.

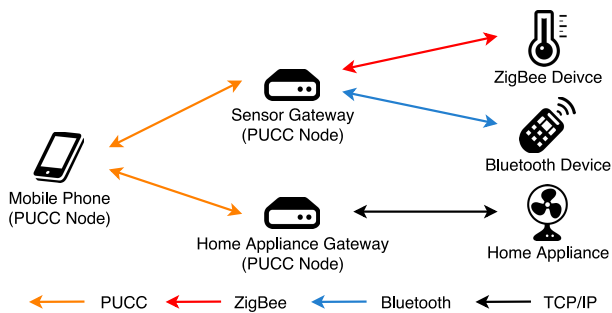


図 2 PUCC を用いたシステムの概要

Fig. 2 Overview of the system using PUCC.

デバイスを制御をする場合、ユーザは同じ宅内に位置したスマートフォンから直接操作するか、別の遠隔制御サービスを利用する必要がある。

## 2.2 オーバレイネットワークによる異種デバイスの遠隔制御システム

文献 [4], [5] では、PUCC プロトコルを用い、オーバレイネットワークを構築することによって遠隔制御を実現している。PUCC は異なる通信規格のネットワーク上にあるデバイスを相互に接続するオーバレイネットワーク技術の開発や標準化を行う組織である。図 2 に PUCC を用いたシステムの概要を示す。このシステムでは PUCC 仕様に基づいて経路制御やメッセージ制御機能を定義した PUCC プロトコルを用いる。PAN デバイスおよび家電の近隣に PUCC プロトコルを実装したゲートウェイを設置し、ユーザは同じく PUCC プロトコルを実装した携帯電話から操作を行う。ユーザは携帯電話を介してゲートウェイに接続し、デバイスの制御条件や制御内容を記述した PUCC プロトコルのメッセージを送信する。ゲートウェイは受信したメッセージに基づき、対象の PAN デバイスや家電と対応する通信規格で通信を行う。以上により、ユーザは遠隔地のデバイスを制御することができ、かつ ZigBee や Bluetooth など複数の PAN 通信規格に対応が可能である。

しかし、PUCC プロトコルを実装したアプリケーションは、PUCC プロトコル搭載デバイスおよびゲートウェイのみ通信が可能であり、PUCC プロトコルを実装しない一般の PAN デバイスと通信することはできない。そのため、ユーザは外出先から宅内の PAN デバイスを制御する場合は PUCC アプリケーションを、外出先の近隣の PAN デバイスを制御する場合は一般の PAN アプリケーションを使用する必要があり、自身の位置に応じてアプリケーションの使い分けを意識しなければならない。

## 2.3 Bluetooth over DTLS による IoT デバイスの遠隔制御システム

Bluetooth over DTLS (従来システム) は Bluetooth のプロトコルスタック内のメッセージに着目し、これを遠隔

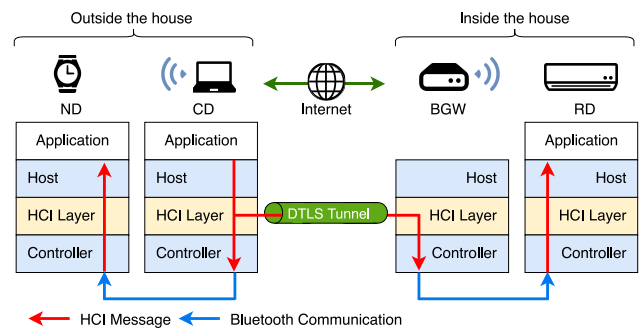


図 3 Bluetooth over DTLS の概要

Fig. 3 Overview of the Bluetooth over DTLS.

地の Bluetooth デバイスに伝送することによって制御を行うシステムである [6], [7]。図 3 に概要を示す。このシステムでは宅内に Bluetooth I/F (Interface) と IP I/F (Wi-Fi/Ethernet など) を搭載した BGW (Bluetooth Gateway) を設置し、宅外の操作端末 CD (Control Device) から宅内の Bluetooth 機器 RD (Remote Device) の操作を実現している。CD の Bluetooth プロトコルスタックにおけるソフトウェアとハードウェア間で交換される制御メッセージを HCI (Host Controller Interface) 層でフックし、DTLS (Datagram Transport Layer Security) トンネルを通して BGW に送信する。BGW は受信した制御メッセージを自身の Bluetooth プロトコルスタックの HCI 層に挿入することにより、CD の代理として RD との Bluetooth 通信を可能としている。その後、RD からの応答を逆の手順によって CD に返信することにより、CD は近隣に RD が仮想的に存在しているように認識することができる。また、CD 近隣の Bluetooth 機器 ND (Neighbor Device) と通信をする場合には、制御メッセージをフックすることなく通常の Bluetooth 通信を行う。

しかし、このシステムはカーネル空間に実装されている Bluetooth プロトコルスタックを拡張して機能を実装する必要があるため、実装の難易度が高く、スマートフォンなどの操作端末での実現も困難である。また、通信規格ごとにプロトコルスタックを拡張する必要があるため、Bluetooth 以外の新たな PAN デバイスへの対応も容易ではない。

## 3. 提案システム

### 3.1 概要

従来システムにおける実装に関わる課題を解決するために、筆者らは PAN デバイスの制御命令を処理する VPAN ミドルウェアをユーザ空間で設計し、それらが連携して動作するフレームワークを提案する [8], [9]。VPAN ミドルウェアは制御端末周辺と遠隔地との異なる通信結果をアプリケーションに対して等価的に提示する。操作端末の位置に依存することなく、ユーザは宅内外の PAN デバイスを同じ操作方法で制御することができる。これにより、遠隔地の PAN を操作端末周辺の PAN へ仮想的に統



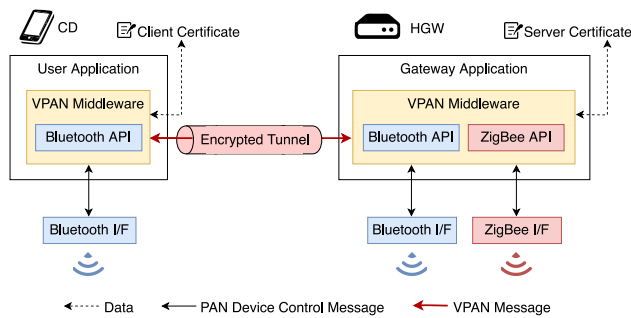


図 4 提案システムの概要  
Fig. 4 Overview of the proposed system.

合する VPAN システムを実現する。既存の遠隔制御サービスでは、HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) などの TCP/IP 通信を利用した宅外用アプリケーションと、PAN 通信を用いて直接通信する宅内用アプリケーションをそれぞれ開発するケースが多いが、提案システムでは位置の違いを意識してアプリケーションを区別する必要がない。また、提案システムでは遠隔地の PAN どうしを統合することもできる。複数の遠隔地の PAN を制御先として登録して結果をミドルウェア内で統合することにより、制御端末から複数の遠隔地の制御が可能となる。VPAN ミドルウェアによる PAN デバイスの制御は通常の PAN 通信の手順で行われるため、対象デバイスが制限されることはない。

### 3.2 システム構成

図 4 に提案システムの構成を示す。本論文における CD は Bluetooth 搭載のスマートフォンを想定し、宅内の HGW (Home Gateway) には Bluetooth, ZigBee などの PAN I/F と Ethernet や Wi-Fi などの IP I/F を搭載する。ユーザは宅内および宅外に位置し、CD を用いて宅内や宅外の PAN デバイスを制御する。制御対象の PAN デバイスが CD から直接通信できる位置にある場合は、CD の Bluetooth I/F から直接通信を行い、遠隔地にある場合は HGW を介した間接通信を行う。

VPAN ミドルウェアは CD と HGW 間のメッセージの暗号化伝送や認証処理、機器探索やデバイス制御など、CD の近隣や遠隔地の PAN デバイスとの通信 API を提供するもので、CD と HGW にインストールするユーザ/ゲートウェイアプリケーションにそれぞれ内包される。ユーザアプリケーションとゲートウェイアプリケーション間は IPv6 アドレスによって宛先指定を行い、TLS (Transport Layer Security) で暗号化トンネルが構築される\*1。このトンネルを通して PAN デバイスの制御依頼やその応答である VPAN メッセージを伝送することにより、HGW が CD の代理として宅内の PAN デバイス RD との接続および通信を行う。

\*1 CD が宅外へ外出しているときだけでなく、HGW と同じ宅内にいる場合もつねに HGW とは暗号化トンネルを構築する。

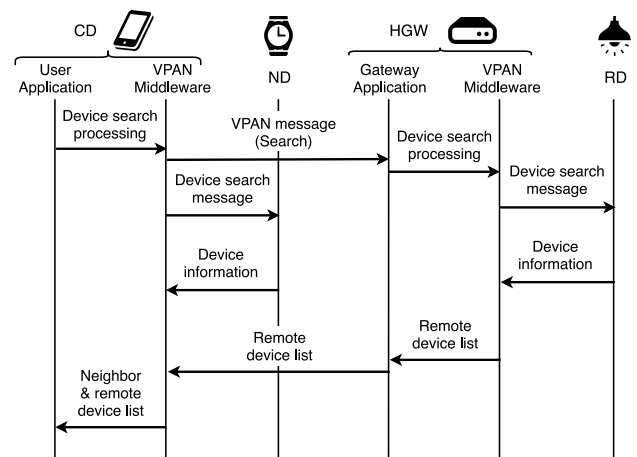


図 5 機器探索処理の動作シーケンス  
Fig. 5 Sequence of the device search process.

CD に搭載されていない ZigBee などの PAN I/F を HGW が有する場合、CD のユーザアプリケーションは HGW に ZigBee の制御命令をわたすことにより、探索結果や制御結果を受け取ることができる。すなわち、CD が搭載していない PAN 通信規格の I/F を仮想的に装着したかのように振る舞うことができ、この点は従来システムにはない新たな特徴である。

### 3.3 システム動作

#### 3.3.1 機器探索処理

図 5 に機器探索処理の動作シーケンスを示す。以下にその手順について説明する。

- (1) ユーザアプリケーションは VPAN ミドルウェアの機器探索処理を通信規格を指定して実行する。
- (2) CD 側 VPAN ミドルウェアはゲートウェイアプリケーションに指定された規格の機器探索を依頼する VPAN メッセージを送信する。同時に、CD 近隣の機器探索を開始し ND に対して機器探索メッセージを送信する。
- (3) ゲートウェイアプリケーションは VPAN メッセージの内容に基づき VPAN ミドルウェアの機器探索処理を実行する。
- (4) HGW 側 VPAN ミドルウェアは HGW 近隣の機器探索を開始し、RD に対して機器探索メッセージを送信する。
- (5) 機器探索が終了すると、各 VPAN ミドルウェアは発見したデバイス名やアドレスなどの情報をまとめたりリストを作成する。このリストは CD 側であれば近隣デバイスリスト、HGW 側であれば遠隔デバイスリストとなる。
- (6) HGW 側 VPAN ミドルウェアは遠隔デバイスリストをゲートウェイアプリケーションを介して CD 側 VPAN ミドルウェアに送信する。
- (7) CD 側 VPAN ミドルウェアは近隣デバイスリストと遠

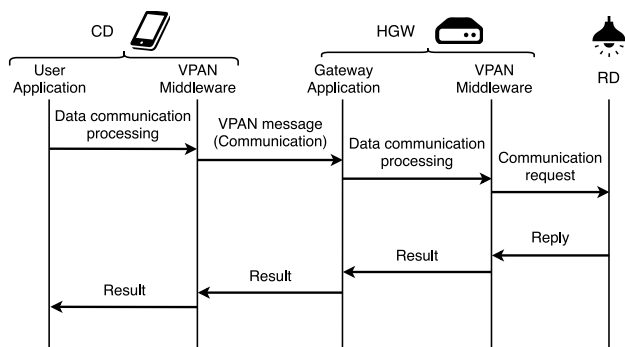


図 6 データ通信処理の動作シーケンス

Fig. 6 Sequence of the data communication process.

隣デバイスリストを統合する。このとき、双方のデバイスリストから同じアドレスを持つ PAN デバイスが発見された場合、近隣デバイスリストに登録されているデバイスを統合対象として採用する。その後、統合されたデバイスリストをユーザアプリケーションにわたす。

以上により、ユーザは自身の位置を意識することなく、近隣と遠隔地の双方の PAN デバイスを発見することができる。なお、CD が探索対象の通信規格に非対応である場合、CD は自身の Bluetooth I/F から機器探索メッセージを送信することなく、HGW に VPAN メッセージのみを送信する。

### 3.3.2 データ通信処理

図 6 にデータ通信処理の動作シーケンスを示す。以下にその手順について説明する。

- (1) ユーザアプリケーションは VPAN ミドルウェアのデータ通信処理を対象である RD と通信内容を指定して実行する。
- (2) CD 側 VPAN ミドルウェアは、機器探索において RD を発見した端末と CD の IP アドレスを比較し、近隣デバイスであるかを判断する。この結果、RD が HGW の近隣デバイスであることを確認すると、ゲートウェイアプリケーションにデータ通信を依頼する VPAN メッセージを送信する。
- (3) ゲートウェイアプリケーションは、VPAN メッセージの内容に基づき VPAN ミドルウェアのデータ通信処理を RD を指定して実行する。
- (4) HGW 側 VPAN ミドルウェアは RD に対してデータ通信を行い、その結果をゲートウェイアプリケーションを介して CD 側 VPAN ミドルウェアに送信する。
- (5) 最後に、CD 側 VPAN ミドルウェアは結果をユーザアプリケーションにわたす。

以上により、ユーザは遠隔地の PAN デバイスを制御することができる。なお、通信対象のデバイスが CD の近隣である場合には、手順 (2) において HGW に VPAN メッセージを送信することなく、CD 側 VPAN ミドルウェアが

デバイスとの通信を行う。

### 3.4 ユーザ位置の切り替わりとペアリング

PAN におけるアプリケーションの多くは長時間セッションを維持し続ける用途ではなく、提案システムでは CD と宅内の PAN デバイスが通信中に CD が宅外に移動することは想定していない。そのため、CD が宅内から宅外、または宅外から宅内へ移動した際には、機器探索処理を改めて行う必要がある。CD 側の VPAN ミドルウェアは自身の Bluetooth I/F で発見したデバイスか、HGW 経由で発見した PAN デバイスカを識別することができる。CD が宅内に存在し、宅内 PAN デバイスが近隣デバイス ND となる場合は、ユーザが ND を選択することにより、CD と ND は直接 Bluetooth 通信を開始する。CD が宅外に存在する場合、同じ宅内 PAN デバイスは遠隔デバイス RD として位置関係が切り替わるため、VPAN ミドルウェアは位置の切り替わりを検知して自動的に機器探索を行う。ユーザは RD を選択することにより、CD と RD は HGW 経由で間接的に Bluetooth 通信を開始する。

Bluetooth のペアリングでは、通信ペアとなる両端末の入出力機能（キー入力およびディスプレイ表示）の有無の組合せにより、デバイスの認証方法が異なる。CD はスマートフォンを想定しているため、キー入力およびディスプレイによる表示が可能であり、ND と直接通信できる場合は ND 側の入出力機能の有無に応じて次の 4 種類の認証方法のいずれかが適用される。

- Just Works：双方で認証をしない方法。楕円曲線暗号 Diffie-Hellman 鍵交換 (ECDH: Elliptic Curve Diffie-Hellman key exchange) で鍵交換されているため、盗聴されて暗号鍵が解読されることはない。
- Passkey Entry：片方が 6 桁の認証コードを入力する認証方法。
- Out of Band (OOB)：NFC (Near Field Communication) などの Bluetooth 以外の手段で鍵を交換する認証方法。
- Numeric Comparison：毎回ランダムな 6 桁の認証コードを双方で表示し、それらが同じであればそれぞれでボタンを押すことで認証する方式。

Just Works 以外の認証方法が適用された場合、CD を操作するユーザは認証コードを入力する、NFC でタッチするなどの操作が発生する。しかし、このような操作は CD が ND と初めてペアリングする際に発生し、2 回目以降の接続では認証コードの入力などの操作は発生しない。また、IoT デバイスの多くは入出力機能を持たないため、このような ND と通信する場合は Just Works が適用される。一方、HGW 経由で CD と RD が間接的に Bluetooth 通信を行う場合、RD の Bluetooth 通信相手は HGW となる。HGW はキーボードやディスプレイを持たない装置であるため、

RD 側の入出力機能の有無に関係なく、Just Works の認証方法が適用される。したがって、CD を操作するユーザは認証コードなどを入力する必要はない。

以上より、CD と PAN デバイスの位置関係が変化しても、ユーザはその違いを意識する必要はなく、特別な操作も発生しない。

### 3.5 VPAN システムを利用したサービス例

VPAN システムを適用することにより実現できるサービスは、制御内容により以下に分類される。

- CD から HGW に対して制御を依頼する場合  
外出先において、様々な PAN 規格に対応した宅内の家電やセンサを遠隔制御することができる。たとえば、外出先から宅内の ZigBee 対応照明を消灯する、Bluetooth 対応スマートロックが閉まっているかどうか調べるといったことが可能となる。また、PAN デバイスの保守サービスとして、保守要員が自社にいながら顧客宅内の製品の状態を確認することも可能である。その際、保守要員は自社内（近隣）にある正常な状態の製品とも直接通信ができ、顧客宅内の製品との応答比較が容易であるため、従来より作業効率が向上することが期待される。
- CD と HGW の PAN を統合する場合  
近隣と遠隔地のデバイスを連携して動作させることができる。たとえば、スマートフォンの NFC と自宅のエアコンの場合、自宅の最寄り駅の改札から出ると、自宅のエアコンをオンにするといった連携が可能となる。
- 異なる HGW の PAN を統合する場合  
広範囲に PAN が点在している場合や、住宅やビルなどにおける階層の違いにより PAN の直接通信が遮られてしまう際に、複数の HGW を設置することによりこれらの PAN を統合することができる。たとえば、大型の商業施設において、CO2 濃度センサなどの環境センサと HGW を各店舗に設置することにより、CD から施設全体の混雑度やエアクオリティを把握することができ、さらに空調設備を制御することにより施設内の環境を改善することが可能である。

## 4. 実装および動作検証

### 4.1 実装

本論文では、CD を Android スマートフォン、HGW を Linux マイコンと想定し、Bluetooth 機器探索と GATT (Generic Attribute Profile) 通信が可能な VPAN ミドルウェアのプロトタイプを実装した。図 7 にプロトタイプシステムのモジュール構成を示す。VPAN ミドルウェアは主に 2 つの要素によって構成される。1 つ目は PAN デバイスと HGW の情報管理および 3.3.1 項の機器探索処

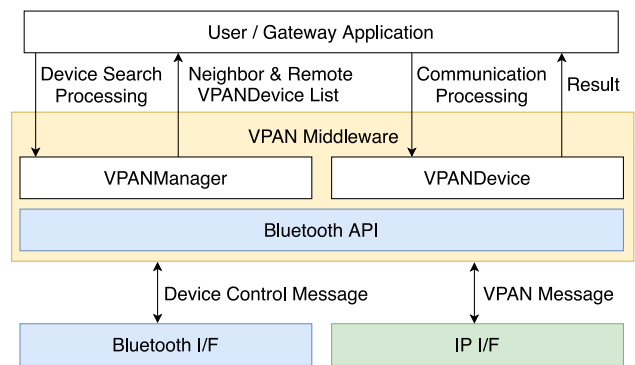


図 7 プロトタイプシステムのモジュール構成  
Fig. 7 Module configuration of the prototype system.

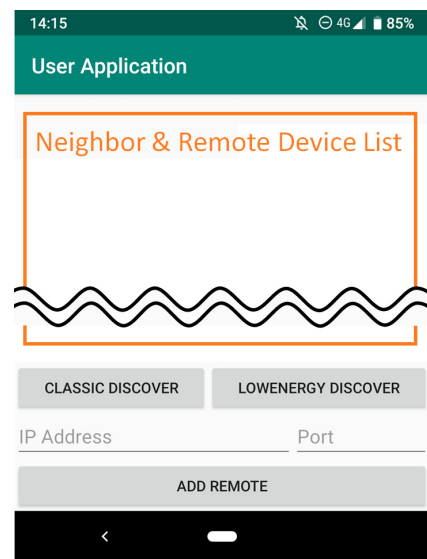


図 8 検証用ユーザアプリケーションの画面  
Fig. 8 User application for the operation verification.

理を担う VPANManager、2 つ目は個々のデバイスそのものを表しデータ通信を担う VPANDevice である。VPANManager は探索先となる HGW の情報を保持し、機器探索処理が実行された際には近隣探索と VPAN メッセージの送信、探索結果である VPANDevice のリストを生成する。VPANDevice はデバイス 1 つに対して 1 つ生成され、デバイスとの接続機能や 3.3.2 項のデータ通信などデバイスの制御機能を提供する。アプリケーションは対象のデバイスを表す VPANDevice を指定することで制御対象を区別する。また、対応する PAN 通信規格が増えた際には VPANManager および VPANDevice に関数を追加・修正する。アプリケーションが直接 PAN 通信規格の API を使用することはないため、VPAN ミドルウェアが提供する API のみで様々な PAN デバイスを制御することができる。

検証用ユーザ/ゲートウェイアプリケーションは VPAN ミドルウェアを搭載し、VPAN ミドルウェアが探索した近隣および遠隔地の Bluetooth Classic 機器と BLE 機器を統合したデバイスリストを表示する機能を実装した。図 8 に検証用のユーザアプリケーションを示す。図 8 下



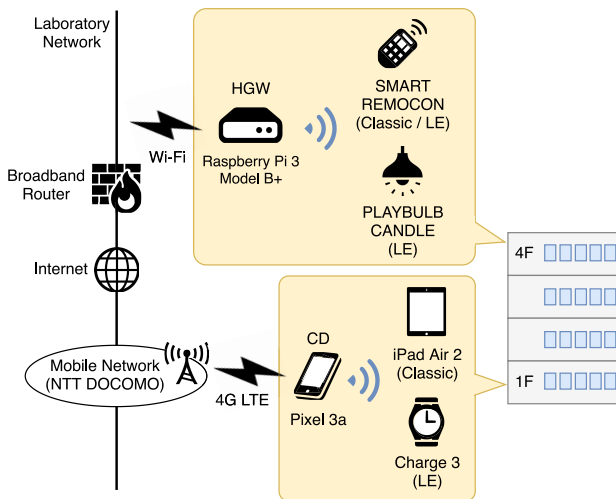


図 9 動作検証環境のネットワーク構成

Fig. 9 Network configuration for the operation verification.

部にゲートウェアアプリケーションがリッスンしている IP アドレスとポート番号を入力し, “ADD REMOTE” を押すことで探索先 HGW として登録を行う. “CLASSIC DISCOVER” を押すことで Bluetooth Classic 機器探索, “LOWENERGY DISCOVER” を押すことで BLE 機器探索を開始し, VPAN ミドルウェアから受け取った統合デバイスリストを画面中央に表示する. 探索先 HGW は複数登録することができ, 複数の HGW がある場合はすべての HGW に対して探索を依頼する VPAN メッセージを送信し, すべての地点の探索結果を統合したリストがユーザーアプリケーションに表示される.

検証用アプリおよび VPAN ミドルウェアは Java を用いて実装し, CD 側 Bluetooth 通信には Android 標準ライブラリを, HGW 側 Bluetooth 通信には BlueCove [10] および TinyB [11] ライブラリを使用した. なお, プロトタイプでは TLS 認証および暗号化機能の実装は省略した.

#### 4.2 動作検証環境

近隣と遠隔地双方のデバイスが発見できることを確認するために, VPAN ミドルウェアを実装した Bluetooth 通信用アプリを用いて動作検証を行った. 図 9 に動作検証環境のネットワーク構成を示す. 図 9 における 4F 研究室を宅内として, 研究室内の PAN デバイスと直接通信ができない 1F を宅外として見なす. CD として Google 社製 Android スマートフォン Pixel 3a を, HGW として Raspberry Pi 3 Model B+ を用いた. HGW は大学研究室 (建屋 4 階) に設置し, 無線 LAN (IEEE802.11ac) によりインターネット接続できるようにした. HGW 近隣にはラトックシステム社製学習リモコンユニット SMART REMOCON と, MIPOW 社製 LED ライト PLAYBULB CANDLE を配置した. CD を保持するユーザは HGW と直接 Bluetooth 通信ができない場所 (建屋 1 階) に存在し,

表 1 動作検証環境の Bluetooth デバイス情報

Table 1 Bluetooth device information for the operation verification.

デバイス名	規格	アドレス
iPad Air 2	Classic/LE	74:81:14:A0:97:02
SMART REMOCON	Classic/LE	8C:DE:52:7C:DB:30
Charge 3	LE	C6:C8:FB:F8:D1:B2
PLAYBULB CANDLE	LE	AC:E6:4B:07:F1:BB

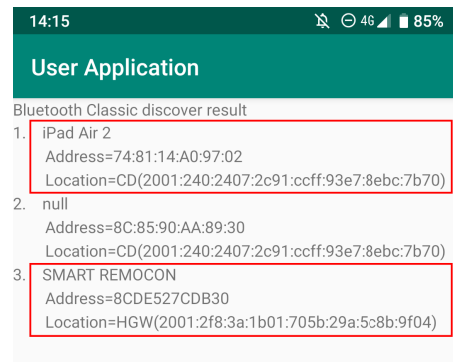


図 10 Bluetooth Classic 機器探索の結果

Fig. 10 Result of the Bluetooth Classic device searching.

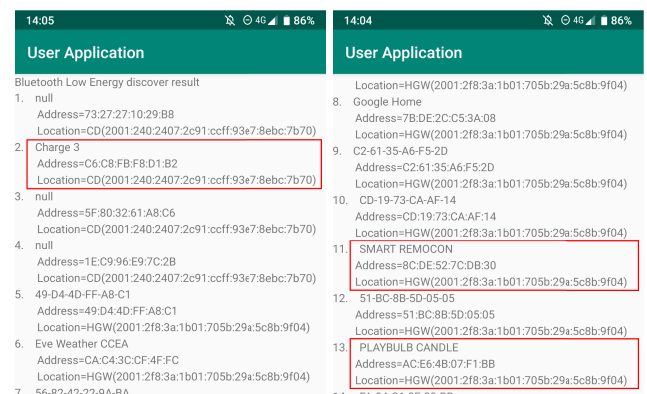


図 11 BLE 機器探索の結果

Fig. 11 Result of the BLE device searching.

4G/LTE によりインターネット接続した. また, Apple 社のタブレット iPad Air 2 と Fitbit 社製リストバンド型トラッカー Charge 3 を CD の近隣に配置した. 表 1 に使用した Bluetooth デバイスのデバイス名とアドレスの一覧を示す.

#### 4.3 動作検証

前述の動作検証環境を用いて, CD が近傍および遠隔地に存在する Bluetooth Classic 機器と BLE 機器を統合的に探索可能であることを確認する. 図 10 および図 11 に動作検証の結果である検証用スマホアプリの画面を示す. 図 10 において, iPad Air 2 および SMART REMOCON のデバイス情報があることが分かる. 同様に, 図 11 において Charge 3, SMART REMOCON, PLAYBULB CANDLE のデバイス情報があることが分かる. 今回の検証用スマ

ホアプリでは、CD および HGW のどちら側で探索した結果なのかが分かるように Location として機器情報を表記しているが、SMART REMOCON および PLAYBULB CANDLE は HGW 側で探索された結果であることが確認できる。

以上の結果より、CD は自身の近隣に存在する PAN と HGW の近隣に存在する PAN、すなわち遠隔地の PAN を仮想的に統合できたことを確認した。

## 5. 評価

### 5.1 測定方法

VPAN ミドルウェアを利用した際の BLE 機器探索時間と BLE データ通信時間を評価することにより、VPAN ミドルウェアがアプリケーションの通信性能に与える影響を明らかにする。測定環境は動作検証環境 (図 9) と同様であり、探索/通信対象は PLAYBULB CANDLE とした。

提案手法における探索時間とは、CD が BLE 機器探索処理を要求する VPAN メッセージを送信してから HGW 側の結果を受信するまでの時間を指す。BLE 機器探索では、探索待ち時間の間のみアドバタイズパケットを受信し、周辺のデバイス情報を取得する。VPAN ミドルウェアでは HGW 側の BLE 探索時間が 10 [s] に設定されているため、この値を従来の探索時間と見なす。また、従来の通信時間とは、CD が GATT を介して直接 PLAYBULB CANDLE と通信し、結果を受信するまでの時間である。提案手法における通信時間とは、CD が遠隔地の PLAYBULB CANDLE との GATT 通信を要求してから結果を受信するまでの時間を指す。試行回数は 10 回とし、各測定時間の最大/最小/平均時間および標準偏差を求めた。

### 5.2 結果

表 2 に測定結果を示す。CD と HGW 間の RTT (Round

表 2 測定結果

Table 2 Measurement results.

		最小 [s]	平均 [s]	最大 [s]	標準偏差 [s]
探索	従来	10.000	10.000	10.000	0.000
	提案	11.514	11.534	11.556	0.014
通信	従来	0.025	0.117	0.181	0.057
	提案	0.508	0.543	0.700	0.054
RTT		0.078	0.130	0.416	0.100

Trip Time) は平均 130 [ms]、提案手法における探索時間は平均 11.534 [s] となった。提案手法における探索時間から従来の探索時間と RTT を差し引くことで VPAN ミドルウェアの処理時間を求めると 1.40 [s] となった。よって、VPAN ミドルウェアの処理時間は、提案手法における探索時間の 12.2% であり、VPAN ミドルウェアの処理が機器探索処理に大きな影響を与えることはない。

提案手法における通信時間は平均 0.543 [s] であり、従来の通信時間である 0.117 [s] よりも大きくなる結果となった。Bluetooth の仕様 [12] では、ATT (Attribute Protocol) のトランザクションのタイムアウト時間は 30 [s] と定義されており、ATT の上位層プロトコルである GATT もこの定義に従っている。文献 [13] では、Android 上で約 58,000 [Byte] のファイルを TLS 暗号化すると 436 [ms] かかることが報告されている。提案システムにおいて、データ通信時に CD と HGW 間でやりとりされる VPAN メッセージは約 150 [Byte] である。したがって、VPAN ミドルウェアに TLS 暗号化処理を実装して今回測定した通信時間に暗号化処理時間が加わったとしても、Bluetooth のタイムアウト時間よりも十分に小さいと考えられる。

以上より、VPAN ミドルウェアを搭載したアプリケーションを用いて遠隔 PAN 通信を実現することは、実用上問題ないことを確認した。

### 5.3 既存システムとの比較評価

表 3 に提案システムと既存システムの比較を示す。2 章で述べたとおり、SmartThings は SmartThings 対応 PAN デバイスのみ制御可能という制限がある。サービスを提供するためには、ユーザが用いるアプリケーションのほか SmartThings サーバのような専用サーバを導入し、継続的に運用する必要があるため、開発者の負担が大きい。また、Bluetooth デバイスを遠隔制御する場合、ユーザは SmartThings アプリではなく、別の遠隔制御アプリケーションを使う必要がある。PUCC は対象デバイスの種類に制限はなく、携帯電話とゲートウェイの直接通信によって遠隔制御システムを実現できるため、サーバが不要である。しかし、外出先の PAN デバイスを制御する場合、ユーザは PUCC ではなく一般の PAN アプリケーションを使用する必要があり、位置を意識したアプリケーションの使い分けが求められる。Bluetooth over DTLS による遠隔制御シ

表 3 既存システムとの比較

Table 3 Comparison with existing systems.

	対象デバイスの自由度	運用の容易さ	位置を意識しない制御	CD の管理者権限が不要
SmartThings	△	×	×	○
PUCC	○	○	×	○
Bluetooth over DTLS	△	○	○	×
VPAN システム	○	○	○	○



システムでは、標準的な PAN アプリケーションで近隣・遠隔地双方の Bluetooth デバイスが制御可能であり、高い汎用性がある。しかし、カーネル空間に実装されているプロトコルスタックを拡張するため、管理者権限が必須であり、一般ユーザが本手法を CD に適用することは困難である。また、Bluetooth 以外の PAN 通信規格の対応は容易ではなく、実現性および拡張性が低い。

これに対して、提案システムは通常の PAN 通信の手順でデバイスを制御するため、対象デバイスが制限されることはない。遠隔制御は CD と HGW の直接通信によって実現されるため、VPAN システム専用のサーバを導入する必要はない。また、ミドルウェアによって近隣と遠隔地を判断し通信を制御するため、ユーザは位置を意識することなく 1 つのアプリケーションで制御が可能である。ミドルウェアの機能追加は関数の追加・修正によって容易に行うことができるため、管理者権限を取得することなく、複数の PAN 通信規格に対応させることができる。

## 6. まとめ

本論文では、従来システムの考え方を踏襲しつつ、かつ実装が容易で複数の PAN 通信規格に対応可能な VPAN (Virtual PAN) システムを提案した。PAN デバイスの制御命令を処理する VPAN ミドルウェアをユーザ空間で設計し、ユーザの操作端末内と宅内のホームゲートウェイ内のミドルウェアを連係して動作させる。これにより、遠隔地の PAN を操作端末周辺の PAN に仮想的に統合することができることを示した。また、Java を用いて VPAN ミドルウェアのプロトタイプ実装を行い、Android スマートフォンおよび Linux マイコンに実装し、BLE 機器探索およびデータ通信について評価を行った。その結果、ユーザは近隣と遠隔地に存在する各 PAN デバイスを統合的に発見でき、かつ実用上問題ない処理時間で機器探索およびデータ通信をできることを確認した。

現在の提案システムは暗号化機能が未実装であり、制御情報を平文のままインターネット上でやりとりしている。今後は安全な遠隔制御を実現するために TLS 通信機能を実装する。また、VPAN ミドルウェアを Bluetooth 以外の PAN 通信規格にも対応させることにより、異種規格の PAN システムを連携することを目指す。

**謝辞** 本研究は東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究により実施されたものである。

## 参考文献

- [1] 総務省：令和 2 年版情報通信白書，p.76 (2020)，入手先 <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/pdf/02honpen.pdf>。
- [2] Bluetooth SIG：Bluetooth 市場動向 2020，p.9 (2020)，入手先 [https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2020/03/BMU\\_2020-JPN.pdf](https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2020/03/BMU_2020-JPN.pdf)。

- [3] SmartThings Inc.: SmartThings, available from <https://www.smartthings.com/>。
- [4] Sumino, H., Ishikawa, N., Murakami, S., Kato, T. and Hjelm, J.: Pucc Architecture, Protocols and Applications, *2007 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pp.788-792 (2007)。
- [5] Ishikawa, N.: Pucc Activities on Overlay Networking Protocols and Metadata for Controlling and Managing Home Networks and Appliances, *Proc. IEEE*, Vol.101, No.11, pp.2355-2366 (2013)。
- [6] 岡田真実, 鈴木秀和: Bluetooth over DTLS による IoT デバイスの遠隔制御システム, 情報処理学会論文誌 コンシューマ・デバイス&システム (CDS), Vol.8, No.2, pp.34-42 (2018)。
- [7] Okada, M. and Suzuki, H.: Implementation of Seamless Connection System for Bluetooth Low Energy Devices in Remote Locations, *2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp.344-345 (2017)。
- [8] 酒井恵梨香, 池内紀貴, 林 宏輔, 鈴木秀和: 遠隔地にある PAN デバイスとの直接通信を可能とする VPAN システムの実装, 情報処理学会第 82 回全国大会講演論文集, Vol.2020, No.6X-06 (2020)。
- [9] Sakai, E., Ikeuchi, N. and Suzuki, H.: A Proposal of Virtual Personal Area Network System Which Enables Direct Communication with PAN Devices in Remote Locations, *2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp.846-847 (2020)。
- [10] BlueCove Team: BlueCove, available from <http://bluecove.org/>。
- [11] Intel Corporation: TinyB, available from <https://github.com/intel-iot-devkit/tinyb>。
- [12] Bluetooth SIG: BLUETOOTH SPECIFICATION Version 5.2 (2019)。
- [13] 金子洋平, 天野桂輔, 齋藤孝道: Android 端末における暗号モジュールの利用と評価, 第 75 回全国大会講演論文集, Vol.2013, No.1, pp.231-232 (2013)。



酒井 恵梨香 (学生会員)

2020 年名城大学工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科情報工学専攻修士課程に在学中。ホームネットワークに関する研究に従事。学士 (工学)。IEEE 会員。



池内 紀貴 (学生会員)

2020 年名城大学工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科情報工学専攻修士課程に在学中。ホームネットワークに関する研究に従事。学士 (工学)。IEEE 会員。



鈴木 秀和 (正会員)

2004年名城大学工学部情報科学科卒業。2009年同大学大学院理工学研究科電気電子・情報・材料工学専攻博士後期課程修了。2008年日本学術振興会特別研究員。2010年名城大学理工学部助教。2015年より同大学理工

学部准教授および東北大学電気通信研究所共同研究員を兼務。2020年より名古屋大学未来社会創造機構モビリティ社会研究所特任准教授を兼任。モバイルネットワークおよびユビキタスコンピューティング等の研究に従事。博士(工学)。IEEE, ACM, 電子情報通信学会各会員。本会シニア会員。