

遠隔地にある PAN デバイスとの直接通信を可能とする VPAN システムの評価

酒井 恵梨香¹ 池内 紀貴¹ 鈴木 秀和¹

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) 通信規格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, ユーザは宅外と宅内で別の通信規格のアプリケーションを使い分ける必要がある。この解決策として, 筆者らはユーザが外出先から自宅のデバイスを Bluetooth 通信で制御することが可能なシステムを提案してきたが, カーネル空間を拡張して機能を実装しているため, スマートフォンなどの操作端末での実現が困難であった。そこで, 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 通信規格に柔軟に対応可能な VPAN (Virtual PAN) システムを提案している。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とができる。本稿では, 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。

Evaluation of Virtual Personal Area Network System which Enables Direct Communication with PAN Devices in Remote Locations

ERIKA SAKAI¹ NORIKI IKEUCHI¹ HIDEKAZU SUZUKI¹

1. はじめに

近年, 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繋がり, 相互に情報をやり取りして制御を行う 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, 2018 年時点で世界で 307.1 億台存在し今後 2021 年には 447.9 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) 通信規格が挙げられ

る。Bluetooth デバイスの年間総出荷台数は 2018 時点で 37 億台, 2023 年には 54 億台になることが予想されており, PAN デバイスは今後益々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, 東芝 HEMS (Home Energy Management System) [3] がある。東芝 HEMS では, ユーザは「フェミニティ倶楽部」という Web サービスを通して宅内のホームゲートウェイに接続する。インターネット上に存在する Web サーバを介して遠隔地に存在するユーザからの Bluetooth 対応家電の制御命令をホームゲートウェイが受信すると, 対象家電の制御を行う。これによ

¹ 名城大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Meijo University

り、ユーザは宅外から宅内の Bluetooth 対応家電を遠隔制御することができる。この他にも、遠隔地の PAN デバイスの制御システムとして PUCC (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、ユーザはクライアントデバイスから PUCC プロトコルを実装した Web サーバに接続する。Web サーバは同じく PUCC プロトコルを実装したゲートウェイに対し、ユーザからの制御命令を送信する。これ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、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。

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]。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。

そこで、筆者ら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) システムを提案してきた [7]。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。

本稿では、この 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、東芝 HEMS [3] がある。東芝 HEMS は東芝が提供する宅内の家電の制御やエネルギーモニタリングが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

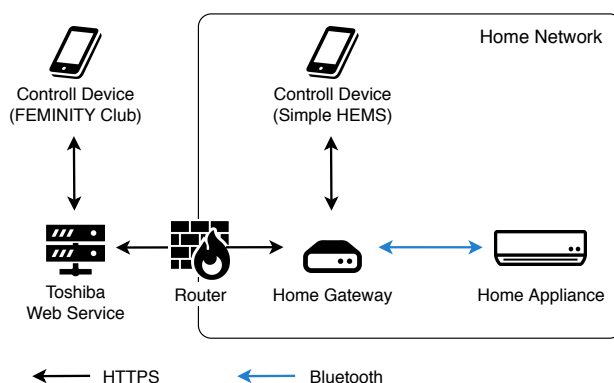


図 1 東芝 HEMS の概要

専用のホームゲートウェイを設置し、「フェミニティ倶楽部」という Web サービスに登録する。ユーザは宅外からフェミニティ倶楽部アプリケーションを用い、HTTPS によってサーバを経由して宅内のルータに接続する。ルータとホームゲートウェイ間も HTTPS によって通信し、ホームゲートウェイに Bluetooth 対応家電の制御命令を送信する。ホームゲートウェイは受信した命令に従い、Bluetooth 通信で対象の家電を制御することにより、遠隔制御が可能となる。

また、ユーザが宅内にいる場合には、「Simple HEMS」アプリケーションを使用する。Simple HEMS は HTTPS によってホームゲートウェイに接続することで家電の制御が可能となる。

しかし、このシステムでは制御対象のデバイスに専用のアダプタを取り付ける必要があり、対応している PAN 通信規格も Bluetooth のみである。また、ユーザは宅外ではフェミニティ倶楽部、宅内では Simple HEMS を使うなど自身の位置に応じて 2 つのアプリケーションを使い分ける必要があり、宅内で直接デバイスと Bluetooth 通信を行う場合にはこの他のアプリケーションが必要である。さらに、開発者は 2 つのアプリケーションを開発し、フェミニティ倶楽部のための Web サーバを運用する必要があるため、システムを実現するためのコストが高いという問題がある。

2.2 オーバー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、オーバー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ー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、インターネッ

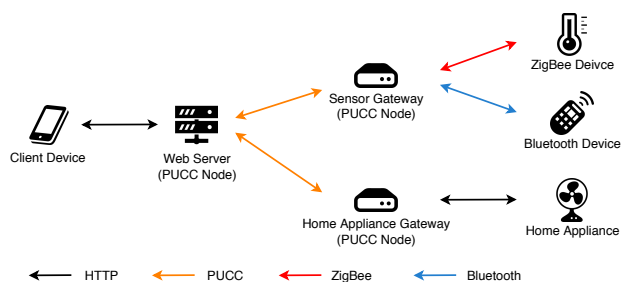


図 2 PUC を用いたシステムの概要

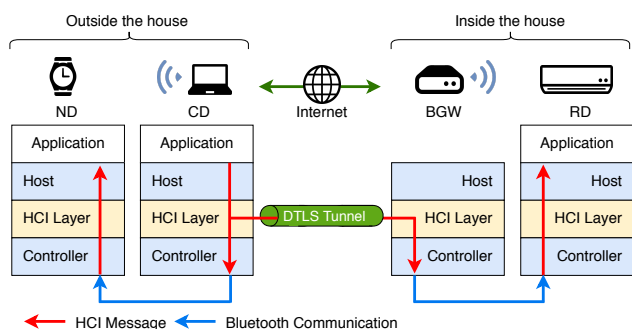


図 3 Bluetooth over DTLS の概要

ト上に PUC プロトコルを実装した Web サーバを設置する。ユーザはクライアントデバイスから HTTP によって Web サーバに接続し、デバイスの制御条件や制御内容を記載したリクエストを送信する。Web サーバは受信したリクエストを PUC プロトコルのメッセージにしてゲートウェイに送信する。ゲートウェイは受信したメッセージの制御内容に基づき、対象の PAN デバイスおよび家電の規格で通信することで制御を行う。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、ユーザが PAN デバイスの周辺に位置している場合には、直接そのデバイスの通信規格によって制御を行う必要がある。そのため、ユーザは自身の位置に応じて Web サーバを介したアプリケーションと PAN 通信規格のアプリケーションを使い分ける必要がある。

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]。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）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

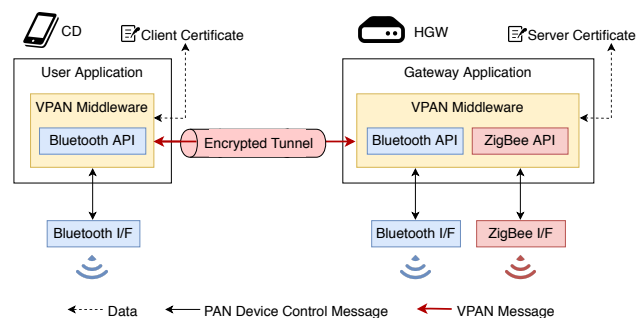


図 4 提案システムの概要

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、それらが連係して動作するフレームワークを提案している [7]。これにより、遠隔地の PAN を操作端末周辺の PAN へ仮想的に統合する VPAN システムを実現する。

3.2 システム構成

図 4 に提案システムの構成を示す。本稿では宅外の 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 I/F と IP I/F を搭載する。

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

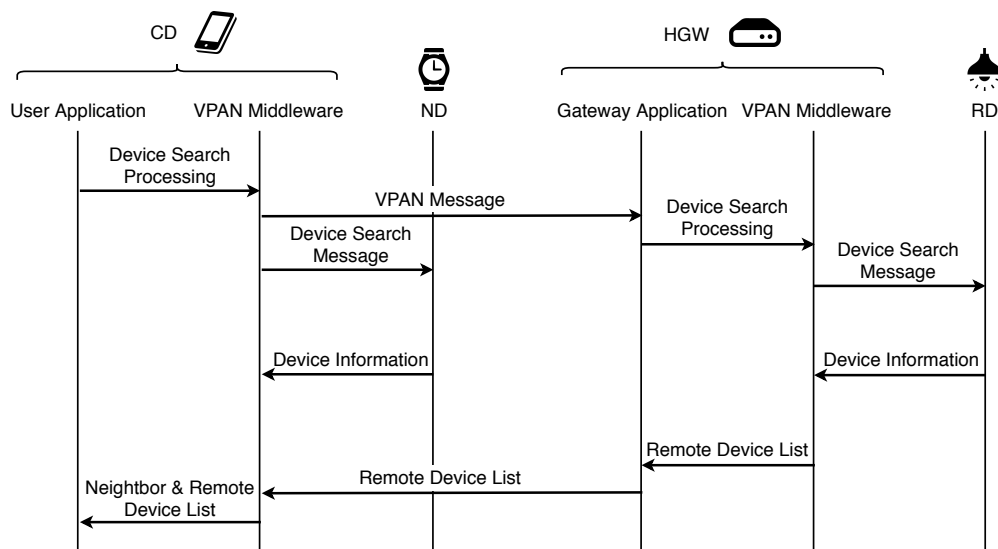


図 5 機器探索処理の動作シーケンス

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。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 メッセージを送送することにより、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。

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 の制御命令を渡すことにより、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隔デバイスリストを統合し、ユーザアプリケーションに渡す。

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。

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。

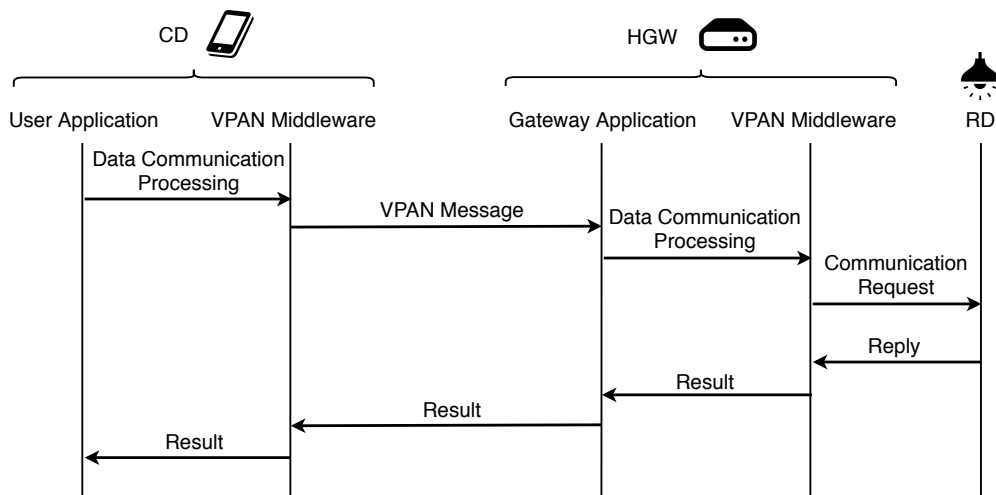


図 6 データ通信処理の動作シーケンス

(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渡す。

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。

4. 実装および動作検証

4.1 実装

本章では、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 の情報管理および機器探索処理を担う 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、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

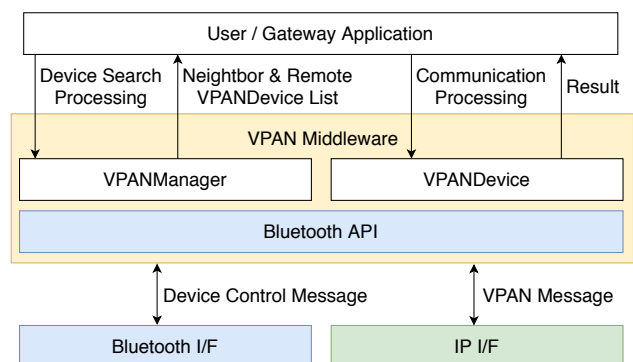


図 7 プロトタイプのモジュール構成

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 下部にゲートウェイアプリケーションがリスンしている 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。機器探索処理は“CLASSIC DISCOVER”または“LOWENERGY DISCOVER”を押すことで開始し、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。

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 [8] および TinyB [9] 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を省略した。

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。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。CD は大学研究室内のネットワークに無線 LAN (IEEE802.11ac) で接続させ、VPAN

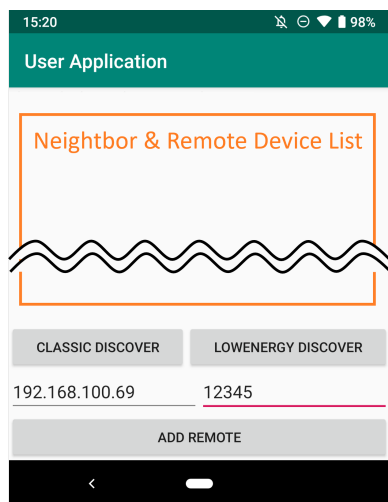


図 8 検証用ユーザアプリケーションの画面

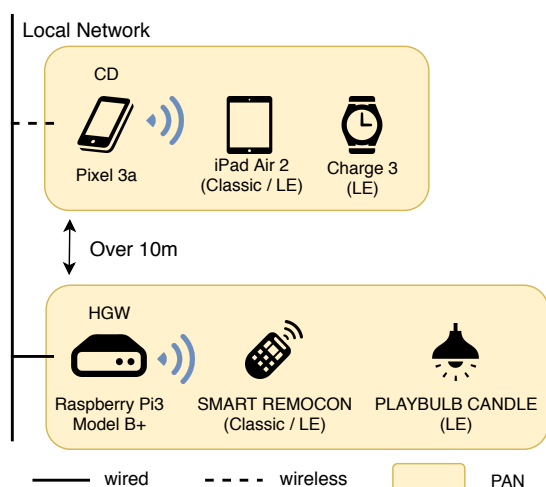


図 9 動作検証環境のネットワーク構成

ミドルウェアを搭載した検証用アプリをインストールした。HGW は別室の大学講義室に設置したが、CD と同一ネットワークとなるように、長い有線 LAN (100BASE-TX) にて大学研究室ネットワークに接続した。

また、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。CD を大学研究室に配置し、その近隣には Apple 社のタブレット iPad Air 2 と Fitbit 社製スマートウォッチ Charge 3 を配置した。また、大学講義室に配置した HGW の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。なお、各部屋に Bluetooth Classic 機器および BLE 機器がそれぞれ存在するが、研究室と講義室は十分に離れた距離に位置しており、Bluetooth の電波が直接届かず、他方の部屋の Bluetooth 機器を探索できないことを確認している。

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

表 1 動作検証環境の Bluetooth デバイス情報

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

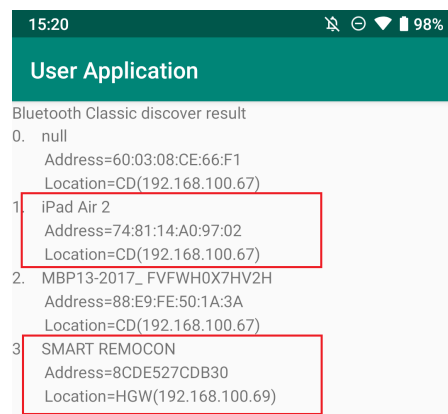


図 10 Bluetooth Classic 機器探索の結果

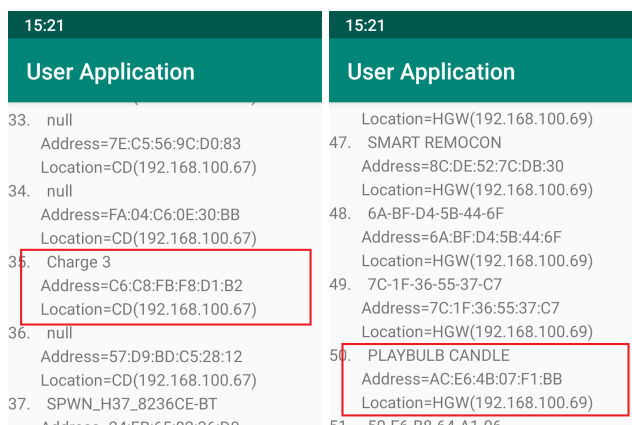


図 11 BLE 機器探索の結果

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わかる。同様に、図 11 において Charge 3 および PLAYBULB CANDLE のデバイス情報があることがわかる。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わかるように 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 近隣の PAN、すなわち遠隔地の PAN を仮想的に統合できたと言える。

表 2 測定結果

		最小 [s]	平均 [s]	最大 [s]	標準偏差 [s]
遠隔	探索	0.560	4.930	11.559	4.296
PAN	通信	0.157	0.228	0.372	0.058
近隣	探索	0.680	1.107	1.682	0.330
PAN	通信	0.025	0.117	0.181	0.057

5. 評価

5.1 測定方法

本章では、VPAN ミドルウェアを利用した際の機器探索時間と 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。

HGW は PLAYBULB CANDLE を発見すると、即座に CD に探索結果であるデバイス情報を返信する。CD が遠隔探索を依頼してからデバイス情報受信までの時間を“遠隔 PAN 探索時間”，CD が遠隔 GATT 通信を依頼してから結果受信までの時間を“遠隔 PAN 通信時間”としてそれぞれ計測する。また、別途 CD 周辺に同じ PLAYBULB CANDLE のデバイスを移設し、検証用スマホアプリを用いずに CD が通常の BLE の仕組みで直接探索および通信を行った時間も“近隣 PAN 探索時間”および“近隣 PAN 通信時間”として計測する。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る。

5.2 結果

表 2 に測定結果を示す。遠隔 PAN 探索時間は 4.930[s]、近隣 PAN 探索時間は 1.107[s] となり、提案システムによる遠隔 BLE 機器探索処理は CD 自身による探索よりも長くなる結果となった。測定結果に対して標準偏差を求めると、遠隔 PAN 探索時間は 4.296[s]、近隣 PAN 探索時間は 0.330[s] であり、遠隔 PAN は近隣 PAN の 13 倍以上と非常に大きな値となっている。このことから、提案システムによる遠隔 BLE 機器探索処理は探索時間のばらつきが大きいことがわかる。

このような結果になった理由は、PLAYBULB CANDLE からのアドバタイズパケットの受信間隔と、使用している TinyB ライブラリの特性の 2 点によるものだと考える。BLE 機器探索はデバイスが一定間隔で発信するアドバタイズパケットからデバイスを発見するため、探索開始直後にパケットが発信された場合には短時間で探索を終えることができるが、開始直前に発信された場合には次の発信を待つため長時間の探索となってしまう。また、TinyB ライブラリは探索結果の取得処理時点までで受信したすべてのパケット情報をリストとして取得する。このリスト内にデバイスがない場合には、もう一度その時点までの結果を

取得し直すこととなる。これにより、遠隔 PAN 探索はパケットを受け取ると即座に結果を返信できる Android の近隣 PAN 探索よりばらつき・探索時間が大きくなったと考える。

また、遠隔 PAN 通信時間は 0.228[s]、近隣 PAN 通信時間は 0.117[s] となった。Bluetooth の仕様では、ATT (Attribute Protocol) のトランザクションのタイムアウト時間は 30[s] [10] 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。

今回は大学研究室内のローカルネットワークにおける評価結果であるため、実際のインターネット環境での利用を想定すると、CD と HGW 間の RTT (Round Trip Time) と TLS による暗号化処理時間が加算される。日本国内の RTT は数十 [ms] 程度であり、日米間で約 100[ms]、日欧間でも約 200[ms] である。また、文献 [11] によると、Android スマートフォンにおいて TLS RTT 暗号化処理を行うとデータサイズが約 18[MB] の際に 6[s] ほど性能が劣化することが報告されている。したがって、遠隔 PAN 通信時間はこれらの時間を加えたとしても、Bluetooth の仕様で定められているタイムアウト時間よりも十分に短い時間となっており、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 通信を実現する上で実用上問題ないことを確認した。

6. まとめ

本稿では、筆者らが提案している VPAN ミドルウェアのプロトタイプを 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 を仮想的に統合でき、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。

今後は、CD-HGW 間の TLS 認証の実装を完了させ、4G などのモバイルネットワーク環境利用時の性能評価などを行うとともに、Bluetooth だけでなく、ZigBee など他の PAN 通信規格への対応なども行う予定である。

参考文献

- [1] 総務省：令和元年版情報通信白書，pp.48 (2019). <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r01/pdf/01honpen.pdf>.
- [2] Bluetooth SIG: Bluetooth 市場動向 2019, pp.9 (2019). https://3pl46c46ctx02p7rzdsvsg21-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2019/06/2019-Market_Update_LFC-JA.pdf.
- [3] 一色正男, 河口俊朗, 平原茂利夫: 広がる東芝ネットワーク家電“フェミニティ”シリーズ, 東芝レビュー, Vol. 60, No. 4, pp. 23-27 (2005). https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2005/04/60_04pdf/a07.pdf.
- [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, *Proceedings of the 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] 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).
 - [8] : BlueCove. <http://www.bluecove.org/>.
 - [9] : TinyB. <https://github.com/intel-iot-devkit/tinyb>.
 - [10] Bluetooth SIG: BLUETOOTH SPECIFICATION Version 4.2, Technical report, Bluetooth SIG (2014).
 - [11] 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, 暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2013) 予稿集, No. 3D3-5 (2013).