

広域に分散するセンサネットワークのための 統合通信基盤の提案

磯村 学^{†1} 井戸上 彰^{†1} 堀内 浩規^{†1}

センサノードが様々なサービスに適用されるに従い、用途、種類、運用者などの異なる複数のワイヤレスセンサネットワーク（以下、WSN）が広域に分散して存在すると予想される。そして、そのセンシングデータを、WSN の設置位置や種類に依存せず取得できれば、センシング可能な範囲を拡大したり、異なるセンシングデータを組み合わせることによる新たな利用方法を創出したりすることができよう。しかしながら、このような環境では、所望のセンサノードや WSN を検索・発見する必要がある。また、センサノードのプラットフォームの種類によって通信プロトコルやメッセージフォーマットは異なっているため、それに応じてセンシングデータの取得方法を変更する必要がある。そこで、本論文では複数の WSN が広域に分散する環境において、Peer to Peer (P2P) 技術を適用することで、センサの種類や設置位置などの属性情報に基づいてセンサノードならびに WSN を検索・発見するとともに、P2P ネットワークを通じたセンシングデータの転送ならびにセンシングデータの要求や加工処理を行うセンシングサービスを提供する統合通信基盤を提案する。また、提案方式に基づいたシステムの実装を行い、異なる種類のセンサノードを用いた WSN を収容した測定環境において、センサノードの発見、センシングデータの転送ならびにセンシングサービスの利用にかかる処理時間の観点から性能を測定、評価する。

Proposal of Integrated Communication Platform for Widely Distributed Sensor Networks

MANABU ISOMURA,^{†1} AKIRA IDOUE^{†1}
and HIROKI HORIUCHI^{†1}

With the rapid deployment of wireless sensor node to diversified services, multiple wireless sensor networks (WSN) of different purpose, platform and operator will be distributed widely. If we can retrieve the sensing data regardless of the location or the platform of the WSN, it becomes possible expanding the coverage of sensing area, or combining different kinds of sensing data from different sources to create new usage of sensing data. However, in such envi-

ronment, it is required to search and discover desired WSN or sensor node to access. In addition, the communication protocol and message format may be different according to the platform of sensor node. Therefore, we propose an integrated communication platform leveraging Peer to Peer (P2P) technology to discover WSN and sensor node by their attributes, such as type of sensor, location. It also supports forwarding sensing data through the P2P network and providing sensing service to request or process sensing data. Furthermore, we implement the proposal and construct a test bed accommodating WSNs composed of different kinds of sensor node. In the test bed, we perform measurements to evaluate the performance of our implementation in terms of the processing delay of sensor node discovery, sensing data forwarding and invocation of sensing service.

1. はじめに

今後、環境モニタリング、建造物の構造監視、生産・物流管理、ビル・ホームオートメーションなど、様々なサービスへのワイヤレスセンサノード（以下、センサノード）の適用が期待される¹⁾。このような環境では、用途、種類、運用者などの異なる複数のワイヤレスセンサネットワーク（以下、WSN）が広域に分散して存在することになる。これらの WSN が提供するセンシングデータを、WSN の設置位置や種類に依存せず、統一的な方法で取得、利用できれば、WSN の地理的なカバー範囲を拡大したり、異なる WSN のセンシングデータを組み合わせることによる新たな利用方法を創出したりすることができよう。

たとえば、各店舗に設置された商品情報を管理する WSN を統合して仮想的な 1 つの WSN を構築し、ある地域全体を対象としたショッピングガイドサービスを提供したり、分散型生産システム (Distributed Manufacturing System) において、異なる事業者の各生産拠点に設置された生産管理のための WSN を統合して 1 つの仮想的な WSN を構築し、システム全体を通じた生産管理²⁾を行ったりすることが考えられる (地理的なカバー範囲の拡大)。また、各地に設置された地震計測器だけでなく、ビル、橋梁などの構造監視を行うために設置された管理者の異なる各 WSN からセンシングデータを収集し、それらを組み合わせる地震の影響をより詳細に調査したりすることが考えられる (異なる WSN のセンシングデータの組合せ)。

^{†1} KDDI 研究所
KDDI R&D Laboratories

しかしながら、複数の WSN が広域に分散して存在する環境では、まずその中から所望のセンサノードや WSN を検索・発見する必要がある。また、センサノードのプラットフォームの種類によって通信プロトコルやメッセージフォーマットは異なるため、それに応じてセンシングデータの取得方法を変更する必要がある。したがって、そのままでは WSN の設置位置や種類に依存せず、統一的な方法でセンシングデータを取得することは困難である。

そこで、本論文では複数の WSN が広域に分散して存在する環境において、(1) センサの種類や設置位置などの属性情報に基づいてセンサノードならびに WSN を検索するとともに、統一的な方法で (2) センシングデータの転送ならびに (3) センシングデータの要求や加工処理を行うセンシングサービスを提供する統合通信基盤を提案する。

このような統合通信基盤を実現する手段の 1 つとして、すべてのセンサノードならびに WSN に関する属性情報をサーバに集約し、クライアントからの検索要求を解決することが考えられる。しかしながら、センサノードや WSN の数の増加により、大量の情報がサーバに集中することから、サーバのスケラビリティや耐障害性が問題となる。近年では、サーバの負荷分散技術やフェールオーバー技術の進展により、多数の WSN の属性情報を集約することも可能だが、収容する WSN の数に応じてシステムの規模を拡張していく必要があり、運用コストが増大するという問題がある。同様に、サーバがシンクノードからのセンシングデータをクライアントへ転送する手法では、サーバの性能がセンシングデータの転送に際してボトルネックとなりうる。

このため、本論文では統合通信基盤に Peer to Peer (P2P) 技術を利用する。具体的には、P2P のリソース発見機能を利用してセンサノードならびに WSN の検索の解決を行う。これにより、WSN の属性情報の管理に必要な計算機資源を、P2P ネットワークの参加者が提供可能になり、運用コストの分散化を図ることができる。また、WSN とクライアント間で P2P 通信を行うため、より効率的にセンシングデータの転送ならびにセンシングサービスの提供が可能である。

また、提案方式に基づき、P2P ミドルウェアに JXTA³⁾ を適用し、異なる種類のセンサノードの例として Particle コンピュータ⁴⁾ ならびに MOTE⁵⁾ を用いた WSN を収容するシステムの実装について説明する。さらに、実装したシステムにおいてセンサノードの発見、センシングデータの転送ならびにセンシングサービスの提供にかかる処理時間の観点から性能を測定し、本提案の実現可能性について評価する。

以下、2 章ではセンサノードの概要ならびに複数の WSN が広域に分散して場合の問題点について説明し、3 章では広域に分散する WSN のための統合通信基盤の提案を行う。ま

た、4 章ではシステムの実装概要、5 章では実装したシステムの性能評価、6 章では関連研究について述べ、最後に 7 章でまとめる。

2. センサノードの概要と広域に分散する WSN の問題点

一般に、センサノードはマイコンクラスの処理能力を持ち、振動、照度、温度などのセンサデバイスならびに Light Emitting Diode (LED)、スピーカなどのアクチュエータを備えた、バッテリーで駆動する小型のハードウェアである⁴⁾⁻⁶⁾。また、センサノードはバッテリー容量の制約から、Bluetooth、Zigbee、特定省電力無線などの消費電力の小さい無線通信手段を用いて近隣のセンサノードと WSN を構成し、センサが測定したセンシングデータを伝送する。

さらに、センサノードは処理能力などの制限から、IP プロトコルを実装しないことが多い。このため WSN 外の端末は図 1 に示すように、LAN やインターネットなどの中継網を通じて WSN に接続するシンクノードにアクセスし、そこからセンシングデータを取得する。取得したセンシングデータは端末のセンサアプリケーションで利用される。

このような WSN が広域に分散して複数存在する環境においてセンシングデータを取得する場合、以下のような問題が生じる。

- (1) WSN 外の端末は所望のセンシングデータを提供するセンサノードや WSN を検索・発見し、そのシンクノードにアクセスする必要がある (たとえば、ある指定した位置に存在する、特定の種類のセンサを持つセンサノードを検索するなど)。
- (2) センサノードのプラットフォームによって、WSN 外の端末とシンクノード間の通信プロトコルやメッセージフォーマットなどのインタフェースは異なるため^{7),8)}、それに応じてセンシングデータの取得方法を変更する必要がある。

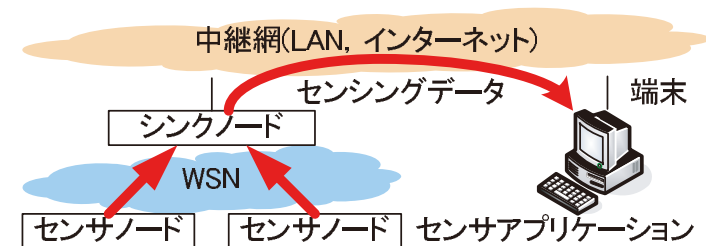


図 1 一般的なワイヤレスセンサネットワークのシステム構成
Fig. 1 Typical system architecture of wireless sensor network.

3. センサネットワークのための統合通信基盤の提案

3.1 統合通信基盤の利用モデル

図 2 に統合通信基盤の利用モデルを示す。センシングデータ提供者は統合通信基盤を用いて自身の持つ WSN のセンシングデータならびにセンシングサービスを、外部のセンシングデータ利用者に公開する。なお、セキュリティやプライバシーなどの理由により、特定の利用者にのみ開示したい場合もある。センシングデータ利用者は統合通信基盤を通じて、必要なセンシングデータ、センシングサービスを取得し、センサアプリケーションで利用する。また、統合通信基盤は統合通信基盤運用者によって管理、運用され、加入したセンシングデータ提供者ならびにセンシングデータ利用者のみが統合通信基盤を利用する。

統合通信基盤、シンクノード、センサアプリケーションは以下のインタフェース (IF) を持つ。IF1 は従来のシンクノードとセンサアプリケーションの間のインタフェースであり、以下のような機能を持つ。

- WSN からのセンシングデータの提供
- WSN へのセンシングデータの要求
- WSN へのその他の制御要求

IF1 だけでは 2 章で述べたように、あらかじめ定められた WSN のセンシングデータしか取得できない。そこで、まずシンクノードと統合通信基盤の仲立ちをし、IF1 を通じてシンクノードと通信を行うとともに、IF2 を通じて統合通信基盤との通信を行うゲートウェイを配置する。ここで IF2 は以下のような機能を持つ。

- センサノード、WSN の属性情報を統合通信基盤に登録
- センシングデータの送信

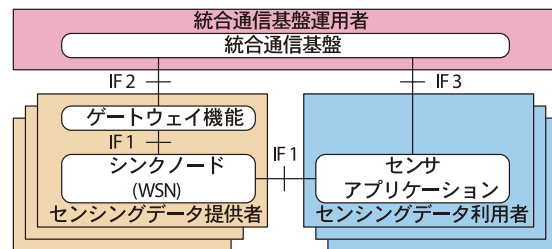


図 2 統合通信基盤の利用モデル

Fig. 2 Usage model of Integrated Communication Platform.

- センシングデータの要求の受信
- センシングサービスの登録
- センシングサービスの提供

次いで、センサアプリケーションと統合通信基盤の間に IF3 を新たに定義し、以下の機能を持たせることで、統合通信基盤上に公開されている WSN のセンシングデータを取得する。

- センサノード、WSN の検索・発見
- センシングデータの受信
- センシングデータの要求の送信
- センシングサービスの検索・発見
- センシングサービスの利用

また、従来のセンサアプリケーションが統合通信基盤を利用するため、シンクノードの場合と同様に、センサアプリケーションと統合通信基盤の間にゲートウェイを配置してもよいが、本論文では扱わない。

3.2 統合通信基盤の基本設計

本節では 2 章で述べた問題 (1), (2) を解決する統合通信基盤の基本設計を行う。

3.2.1 センサノード・WSN の検索・発見

2 章の (1) を解決するための方法の 1 つとして、すべてのセンサノードならびに WSN に関する識別子 (以下, ID), 位置情報, 搭載されたセンサの種類などの属性情報を、IF2 を通じて統合通信基盤内のサーバに集約し、IF3 を通じたセンサアプリケーションからの検索要求を解決することが考えられる。属性情報をサーバに集約することで、複雑な検索や、統合通信基盤の一元的な管理が可能になる反面、センサノードや WSN の数の増加により、大量の情報がサーバに集中することから、サーバのスケラビリティや耐障害性が問題となる。

これに対して、サーバの負荷分散技術やフェールオーバー技術を利用し、複数のサーバで多数の WSN の属性情報を管理することも可能である。しかしながら、収容する WSN の数に応じてシステムの規模を拡張していく必要があるため、運用コストが増大するという問題がある。したがって、属性情報をサーバに集約するアプローチは、サーバの設備・運用コストを負担するリスクを負うことができる統合通信基盤運用者が不在の場合、導入が困難である。

一方、近年の Peer to Peer (P2P) 技術では、リソース発見機能として Distributed Hash

Table (DHT)⁹⁾⁻¹¹⁾などを用いることで、情報を高速に検索することが可能になりつつある。この方法ではP2Pネットワークに参加する端末(ピア)間で情報を分散して蓄積、検索するため、同規模の情報を扱うサーバよりもシステムを安価に導入することができる。また、P2Pネットワークでは自律的にピアの構成を管理することから、ピアの追加、削除に対する設定は不要であり、管理コストの軽減も期待できる。さらに、センシングデータの提供者や利用者が、ピアをP2Pネットワークに参加させることで統合通信基盤に必要な計算機資源を提供可能であるため、運用コストを分散することができる。これはセンシングデータの提供者と利用者のみで自営的に統合通信基盤を導入、運用することも可能であることを意味する。

しかしながら、所有者の異なる複数のピアが協調動作することから、障害時の原因や責任の所在が不明確になりやすく、障害の復旧に時間がかかる可能性があるなど、前述のサーバを用いたアプローチに比べて管理面で不利な問題も存在する。この問題の解決策の1つとしては、ピアを、リソース発見機能を担うものと、それ以外の属性情報の登録や検索要求を行うものとに分割し、統合通信基盤の運用者が前者のすべてピアを運用する方法が考えられる。これにより、統合通信基盤の運用者は複数のサーバで統合通信基盤を実現する場合と同様に管理を行うことができよう。

以上より、本論文では、サーバを用いるアプローチに比べて一元的な管理が行いにくいものの、統合通信基盤の導入可能性を高め、WSNの利用促進を図ることができるという観点から、後者のP2P技術を利用する。具体的には、シンクノードからIF1を通じて得たセンサノードならびにWSNの属性情報を、IF2を通じてP2Pネットワーク上に広報するゲートウェイ機能としてP2PBridgeを新たに導入する。センサアプリケーションが動作する端末は、ピアとしてP2Pネットワークに参加し、IF3を通じて広報された属性情報を基に検索を行うことで、所望のセンサノードやWSNを発見する。

3.2.2 シンクノードとの通信

センサアプリケーションはセンサノードやWSNを検索・発見した後、センシングデータを要求、取得する。

統合通信基盤内のサーバにセンシングデータを集約する手法では、サーバの性能がセンサアプリケーションへのセンシングデータの転送に際してボトルネックとなりうるため、効率的にセンシングデータを転送するためには、サーバを介さずに、シンクノードとセンサアプリケーション間でP2P通信を行うことが好ましい。そこで、統合通信基盤内にサーバにWSNの各シンクノードのアドレスを登録し、それをセンサアプリケーションに通知するこ

とで、シンクノードとセンサアプリケーション間でP2P通信を行う方法がある。これは一般にハイブリッド型P2Pといわれる形態であり、センサノードの検索・発見にサーバを用いるアプローチを用いる際に適した方法である。

本論文では、3.2.1項で述べたように、統合通信基盤にP2P技術を適用することから、センサアプリケーションとP2PBridgeはP2Pで通信を行うことができる。

また、2章の(2)で述べたように、センサノードのプラットフォームによって、シンクノードのIF1における通信プロトコルは異なり、センサアプリケーションが接続しうるすべての種類のシンクノードの通信プロトコルに対応するのは効率的でない。そこで、P2PBridgeは収容するWSNのシンクノードの通信プロトコルをIF1として持つとともに、IF2を通じてセンサアプリケーションと通信を行う。これにより、センサアプリケーションはIF3のみを持つことで、シンクノードの通信プロトコルの種類に依存せず、P2PBridgeを通じてシンクノードと通信が可能となる。

一般的にピアの実ネットワークにおけるアドレス(たとえば、IPアドレス)は、P2Pネットワークにおいて解決可能であることから、P2Pネットワーク上の通信プロトコルとしてはHyper Text Transport Protocol (HTTP)などの適当な通信プロトコルが利用できる。また、ピアがプライベートネットワークに設置される可能性を考慮すると、P2PプロトコルはNetwork Address Translation (NAT)を透過する機能を持つことが望まれる。

3.2.3 センシングデータの取得

3.2.2項により、センサアプリケーションはP2PBridgeならびにシンクノードを介して、センシングデータを取得する。しかしながら、2章の(2)で述べたように、センサノードのプラットフォームによって、シンクノードのIF1におけるメッセージフォーマットも異なり、センサアプリケーションが利用しうるすべての種類のメッセージフォーマットに対応するのは効率的でない。

ここで、センサアプリケーションが利用するメッセージとは、センシングデータのほか、センサノードに対して何らかの動作(たとえばセンシングデータの送信、アクチュエータの起動など)を要求する制御メッセージがある。

まずセンシングデータについて、本論文では、P2PBridgeが収容するWSNのセンサノードのセンシングデータを、センサノードのプラットフォームに依存しない共通的なフォーマットに変換し、IF2を通じてセンサアプリケーションに送信する。ただし、既存の特定のプラットフォームに依存したセンサアプリケーションも利用可能とする観点から、共通的なフォーマットに変換しないことも選択可能とする。

共通的なフォーマットについて、将来的には、センシングデータのフォーマットに関する標準化を待つ必要があるが、基本的には同種のセンサによるセンシングデータの測定単位を、代表的な単位系にまとめていくことで定義可能と考える。代表的な単位系としては、一般に広く用いられている国際単位系がある。また、測定単位が変換不可能な独自のものについては、そのセマンティクスをフォーマット内に記述する。また、各センサノードの利用しているセンサの測定誤差、解像度などの付加情報についても、P2PBridge が把握できる場合には、フォーマットに追加してもよい。

また、制御メッセージについては、P2PBridge が収容する WSN のセンサノードのプラットフォームに準じた制御メッセージを送信するためのセンシングサービスを IF2 に用意する。これにより、センサアプリケーションは IF3 を通じてセンシングサービスを利用し、異なるプラットフォームのセンサノードに対して制御メッセージを送信することが可能となる。センシングサービスの利用については次項で述べる。

3.2.4 センシングサービスの利用

3.2.3 項のセンシングサービスについて、単にセンサノードへの制御メッセージの送信だけでなく、センシングデータの統計処理やコンテキスト情報への変換などを行うセンシングサービスを提供すれば、センサアプリケーションの処理負荷や中継ネットワークのトラヒックを軽減することができる。

このように、様々なセンシングサービスの提供が可能であるが、センシングサービスを利用するためのメッセージ仕様や、各 P2PBridge でどのようなセンシングサービスが提供されているかを、センサアプリケーションがどのように知りうるかという問題がある。

そこで、センシングサービスの提供方法として Simple Object Access Protocol (SOAP)¹²⁾ を用いた WEB サービスの利用し、その Web Service Description Language (WSDL)¹³⁾ をサービス記述としてセンサアプリケーションに提供することで、センサアプリケーションがセンシングサービスを利用するためのメッセージを動的に生成することを可能にする。

さらに、センシングサービスの名称や機能を説明する属性情報を、サービス記述とともに広告として P2P ネットワークに広報することで、センサアプリケーションは 3.2.1 項のセンサノードや WSN と同様に、P2P のリソース発見機能を利用して所望のセンシングサービスを検索し、取得した広告に含まれるサービス記述を用いてセンシングサービスを利用することができる。

サービス記述の検索・提供には、上記の方法のほかに、Universal Description, Discovery and Integration (UDDI) を利用することも可能である。これはサービス記述をサーバに集

約するアプローチを用いており、3.2.1 項で述べたようなセンサノードや WSN の検索・発見の場合と同様の長所・短所が存在する。このため、本論文では、システムの導入可能性を高める観点からサービス記述についても P2P のリソース発見機能を用いて検索・取得することとする。

3.2.5 アクセス制御

セキュリティやプライバシーなどの理由により、特定の利用者のみセンシングデータやセンシングサービスを提供したい場合がある。このためには、P2PBridge が接続してきたセンサアプリケーションの動作しているピアが許可されたものかどうか確認する必要がある。確認する方法としては、以下のようなものがある。

- 事前にセンシングデータの利用者との間でパスワードや鍵を交換しておき、センサアプリケーションが P2PBridge に接続した際に、それらを用いた認証を行う。
- P2PBridge にあらかじめセンシングデータの送信を許可するピア ID のリストを登録しておき、接続してきたセンサアプリケーションの動作しているピアのピア ID がそれに合致するかどうか確認する。ただし、各ピアが P2P ネットワークに参加する際にピア ID の認証を行い、ピア ID の正当性を保証しておく必要がある。

3.3 統合通信基盤の要求条件

3.2 節の基本設計に基づき、広域に分散するセンサネットワークのための統合通信基盤の要求条件を以下にまとめる。

- (1) P2P ネットワーク上にセンサノードならびに WSN の属性情報を広報できること。
- (2) 属性情報に基づき、センサノードならびに WSN を検索、発見できること。
- (3) 発見したセンサノードならびに WSN のセンシングデータを取得できること。
- (4) P2P ネットワーク上にセンシングサービスのサービス記述ならびに属性情報を広報できること。
- (5) 属性情報に基づき、センシングサービスを検索、発見できること。
- (6) 発見したセンシングサービスを利用できること。

3.4 統合通信基盤のシステム構成ならびに機能

図 3 に統合通信基盤のシステム概要を示す。センサノードは WSN を形成し、シンクノードを介して LAN に接続する。P2PBridge はいくつかのシンクノードを収容するとともに、他の P2PBridge やピアとインターネット上に P2P ネットワークを形成する。ピアではセンシングアプリケーションが動作する。以下に、3.3 節の要求条件を実現する統合通信基盤の各機能を説明する。

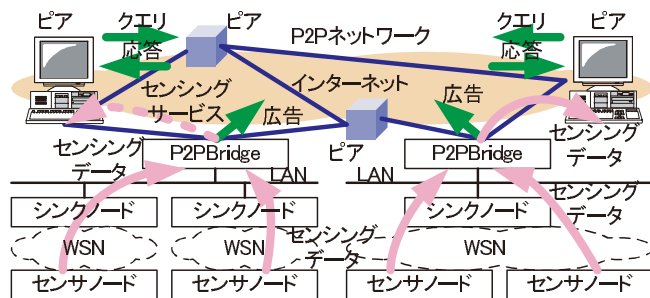


図 3 統合通信基盤のシステム概要

Fig. 3 System overview of Integrated Communication Platform.

3.4.1 センサノードならびに WSN の属性情報の広報

3.3 節の (1) のため、P2PBridge は収容する WSN 内に存在するセンサノードを、センサノードから自律的に送信されたセンシングデータの受信や、センサノードへの応答要求メッセージの定期的な送信などの方法で検知する。P2PBridge はセンサノードを検知すると、センシングデータに含まれるセンサノードならびに WSN の ID、位置情報、搭載されたセンサの種類などの属性情報を広告として P2P ネットワーク上に広報する。また、WSN の広告には、その WSN に接続するセンサノードの ID のリストを加える。

センシングデータに含まれない属性情報については、あらかじめセンサノードや WSN の ID ごとに属性情報を P2PBridge に登録しておき、それを広告に入力する。たとえば、センサノードや WSN の設置住所などである。

また、広告にはピアが P2PBridge と通信コネクションを確立するための接続記述子を含める。

3.4.2 センサノードならびに WSN の検索・発見

3.3 節の (2) のため、ピアは所望のセンサノードや WSN の属性情報に対する検索条件を入力したクエリを P2P ネットワークへ送信する。クエリは P2P ネットワークのリソース発見機能により解決され、3.4.1 項で広報した広告のうち、検索条件に該当する属性情報を持つものがピアに提供される。たとえば、センサノードの設置された住所を示す属性情報に対して検索を行うことで、その住所に存在するすべてのセンサノードの広告を発見する。

しかしながら、DHT を用いた P2P ネットワークでは、広告内の属性情報をピア ID 空間上にハッシュすることでインデックスを生成し、その値を担当するピア（たとえば、イン

デックスに最も近いピア ID を持つピアなど）に、広告のロケータ（インデックスと広告の広報元のピアのピア ID の組合せ）を配信する。このため、基本的に完全一致による検索条件しか解決できない。一方、ある地理的範囲に存在するすべてのセンサノードを検索する場合、数値型の属性情報に対する範囲検索ならびに複数の検索条件による多項目検索が必要となる。たとえば、センサノードの設置座標が緯度・経度で記述され、ある矩形範囲に存在するセンサノードを検索する場合、緯度と経度に対する 2 つの範囲検索からなる多項目検索を行う必要がある。さらに、センサの種類などの文字列型で示される属性情報に対する検索条件を組み合わせるなど、より複雑な検索が考えられる。そこで、以下のとおり、これらの検索を可能とする機能を付加する。

3.4.3 範囲検索

一般に DHT でインデックスの作成に Message Digest Algorithm 5 (MD5) や Secure Hash Algorithm 1 (SHA1) などのハッシュ関数を用いるため、元の属性情報の値（属性値）の連続性は失われる。このため、ある範囲の数値を検索する場合、その範囲に含まれる各値についての検索が必要となり非効率である。そこで、属性情報 A が数値型の場合、ハッシュ関数の代わりに、属性値の連続性を維持した形でピア ID 空間に射影する関数 $F(v)$ を適用してインデックスを生成し、ロケータの配信を行う。 $F(v)$ は、たとえばピア ID の値域に対する A の値域の比を属性値 v にかける関数であり、ピア ID の値域を $[PID_{min}, PID_{max}]$ 、属性情報 A の値域を $[A_{min}, A_{max}]$ とした場合、次のように示される。

$$F(v) = (PID_{max} - PID_{min}) / (A_{max} - A_{min}) * v \quad (1)$$

たとえば、属性情報 A に対する下限値 q_{min} 、上限値 q_{max} が与えられた範囲検索において、 $F(q_{min})$ 、 $F(q_{max})$ を計算し、その範囲を担当するすべてのピアにクエリを送信すれば、 $q_{min} \leq v \leq q_{max}$ を満たす属性情報 A を持つ広告が検索できる。下限値もしくは上限値が指定されない場合、それぞれ A_{min} 、 A_{max} を適用する。

3.4.4 多項目検索

従来、1 つのロケータは 1 つの属性情報についてのインデックスしか持たないため、複数の属性情報に対する検索条件を持つ多項目検索を行う場合、まず各項目の検索条件についてクエリを該当するピアに送信し、得られた広告から項目間の論理式を満たすものを抽出する必要があるが、クエリの送信ならびに広告の応答が多数発生するため、処理時間やネットワークのトラフィックが増大するという問題となる。

そこで、ロケータに広告の持つすべての属性情報のインデックスを含めることで、ピアが受信したロケータの中から多項目の検索条件に合致したものを検索できるようにする。これ

により、まず各項目の検索条件について、それぞれクエリを送信すべきピアを決定し、その中から項目間の論理式を満たすピアを抽出する。次いで、抽出したピアにのみ多項目検索のクエリを送信することで多項目検索を解決することができる。

たとえば、設置位置の X 座標と Y 座標を示す属性情報が $0 < X < 50$ かつ $0 < Y < 100$ に該当する WSN を検索する場合、X 座標の条件についてクエリを送信すべきピアの集合 P_x と、Y 座標の条件についてクエリを送信すべきピアの集合 P_y を 3.4.3 項の方法によってそれぞれ算出し、最終的に集合 $P_x \cap P_y$ のピアに対してクエリを送信する。集合 $P_x \cap P_y$ のピアは、保持するロケータの中から $0 < x < 50$ かつ $0 < y < 100$ を満たすものを検索し、クエリを広告の送信元のピアへ転送する。

3.4.5 センシングデータの転送

3.3 節の (3) のため、ピアは 3.4.2 項で発見した広告に含まれる接続記述子を用いて、その広告を広報した P2PBridge と通信コネクションを開設する。P2PBridge はその通信コネクションを通じて、センシングデータをそのままのフォーマットもしくは共通的なフォーマットに変換してピアに転送する。なお、センサノードの広告に含まれる接続記述子を用いた場合、そのセンサノードのセンシングデータのみが転送され、WSN の広告に含まれる接続記述子を用いた場合、その WSN の全センサノードのセンシングデータが転送される。

また、ピアはその通信コネクションを通じて、広告に該当する WSN またはセンサノードに対し、制御メッセージを送信することができる。ただし、制御メッセージのフォーマットは送信先の WSN プラットフォームの仕様に準拠したものである必要がある。

3.4.6 サービス記述の広報

3.3 節の (4) のため、P2PBridge は収容する WSN のセンサノードのプラットフォームに準じた制御メッセージを送信するためのセンシングサービスならびにそのサービス記述をあらかじめ用意する。

サービス記述に加え、センシングサービスの名称、引数、戻り値、機能概要などの属性情報を広告として P2P ネットワークに広報される。

3.4.7 センシングサービスの検索・発見

3.3 節の (5) のため、ピアはセンサノードの検索・発見と同様に、センシングサービスの属性情報を基に、所望のセンシングサービスを P2P ネットワークより検索し、その広告に含まれるサービス記述を得る。

3.4.8 センシングサービスの提供

3.3 節の (6) のため、ピアは 3.4.7 項で取得したサービス記述から SOAP メッセージを

生成し、それを P2PBridge に送信する。P2PBridge は要求されたセンシングサービスに対応する処理を行い、その結果をピアに返信する。たとえば、指定されたセンサノードに対してセンシングデータを要求し、取得したセンシングデータを SOAP の応答メッセージとしてピアに返信する。

なお、SOAP では一般に通信プロトコルとして HTTP が用いられるが、代わりに P2P ネットワークで用いられる通信プロトコルを利用してもよい。

4. 実装概要

本章では、3 章で提案した統合通信基盤の実装概要を述べる。

4.1 実装システムの構成

図 4 に実装したシステムの構成を示す。P2PBridge を PC (Linux Kernel 2.6) 上に、P2P ミドルウェアとして JXTA 2.4³⁾ を用いて実装した。また、P2PBridge の動作を確認するため、別の PC (Linux Kernel 2.6) 上にセンサノード、WSN、センシングサービスの発見、センシングデータの取得、センシングサービスの利用を行うセンサアプリケーションを実装した。センサノードには Particle コンピュータ (以下、Particle)⁴⁾ ならびに MOTE⁵⁾ を使用した。

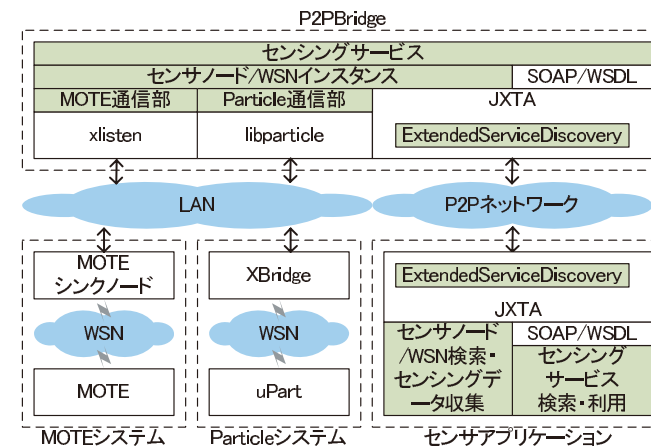


図 4 P2PBridge
Fig. 4 P2PBridge.

4.2 Particle

Particle は Karlsruhe 大学で開発されたセンサノードであり、本論文では uPart と呼ばれる Particle の中で最も小型のセンサノードを使用した。uPart の持つセンサデバイスは照度、温度、振動、バッテリー電圧であり、これらのセンシングデータを 315 MHz 帯の微弱無線を用いて定期的に送信する。本論文では、センシングデータの送信間隔を 30s とした。送信されたセンシングデータは、シンクノードである XBridge で受信されると、UDP パケットにカプセル化されて LAN にブロードキャストされる。この際、XBridge はあらかじめ設定された Location ID を付加する。したがって、同じ XBridge に接続する Particle のセンシングデータは、すべて同じ Location ID を持つ。なお、Location ID には WSN の ID ならびに緯度、経度の情報が含まれる。

4.3 MOTE

MOTE は Crossbow 社より市販されているセンサノードであり、本論文では Mica2 Mote (MPR400CB) を使用し、それにセンサデバイスとして温度、気圧、照度、加速度を持つセンサボード MTS420CA を接続した。また、測定したセンシングデータを定期的（本論文では 30s ごと）に送信するプログラムとして XSensorMTS420 を MOTE にインストールした。シンクノードには MPR400CB に LAN インタフェースボード MIB600CA を接続したものを使用し、uPart と同様に 315 MHz 帯の微弱無線を用いてセンサノードから受信したセンシングデータを、TCP で接続した P2PBridge に送信する。

4.4 JXTA

JXTA はアプリケーションに対して P2P プロトコルを隠蔽し、各種サービスを利用するための API を提供する。

JXTA を利用する理由は以下のとおりである。

- リソース発見機能である DiscoveryService や、ピア間の通信を行う PipeService などの基本的なサービスが備わっているうえ、それらを応用したサービスを新たに実装するためのフレームワークが整えられているため拡張性が高い。
- NAT ルータ配下に接続したピアが P2P ネットワークに参加可能とするためのリレーピアを設置することができ、実環境における運用性が高い。
- 様々な実行環境に対応している。たとえば Java Connected Device Configuration (CDC) の実行環境を持つため、組み込み機器への P2PBridge の実装も可能である（本論文では扱わないが、別途動作を確認している）。
- JXTA ではランデブーピア（以下、RDV）と呼ばれるピアのみが DHT 構築し、収容

しているエッジピア（以下、EDGE）の広告を DHT へ広報ならびにクエリの解決を行う機能分離を実現している。このため、3.2.1 項で述べた統合通信基盤の運用者のみがリソース発見機能を担う RDV を運用する形態も可能である。

- ピアはピアグループによってグループ化、階層化されており、各ピアグループでは独立した DHT を構築することができるうえ、ピアグループに参加する際に認証を行うことができるため、これを拡張することで 3.2.5 項に示したアクセス制御機能の実装が可能と考えられる。

本実装では、Java2 Standard Edition (J2SE) の実行環境を用い、ルートグループ Net-PeerGroup の下にピアグループ WSNGroup を作成し、そこにすべての P2PBridge, RDV, センサアプリケーションが動作するピアが参加することとした。

4.5 P2PBridge

4.5.1 センサノード通信部

図 4 に示すように、実装した P2PBridge では、Particle 通信部ならびに MOTE 通信部において、それぞれ Particle ならびに MOTE が送信したセンシングデータを、シンクノードから受信する。次いで、センシングデータから属性情報を抽出し、センサノードならびに WSN のインスタンスを生成する。また、各通信部は他のピアから受信した制御メッセージや、センシングサービスが生成する制御メッセージをシンクノードへ送信する（たとえば、応答要求など）。

シンクノードとの通信ならびにセンシングデータの解析のため、Particle 通信部では Particle の専用ライブラリである libparticle を使用し、MOTE 通信部はセンシングデータを取得、表示するアプリケーションである xlisten を改造して実装した。また、これらの通信部は、収容する WSN の種類に応じて追加できるように設計した。

4.5.2 センサノード/WSN インスタンス

各インスタンスは、担当するセンサノードならびに WSN の属性情報を保持するとともに、広告の作成と P2P ネットワークへ定期的な広報を行う。広告の持つ属性情報を表 1 に示す。

広告は JXTA の PipeAdvertisement クラスを拡張して実装した。このクラスは PipeService の接続記述子である Pipe ID を入力するフィールドを持つ。そこで、各インスタンスは 4.5.3 項のため、双方向通信を行う JxtaBiDiPipe をオープンし、その Pipe ID を広告に入力する。また、センサノードの ID は既存の Name フィールドに入力した。

WSN の ID (WSN ID)、センサノードの保持する各センサの有無、設置場所の住所、緯

表 1 広告の属性情報
Table 1 Attributes in advertisement.

属性情報	Particle	MOTE
既存フィールド		
Pipe ID	オープンした JxtaBiDiPipe の ID	
Name	“Particle” + ID	“MOTE” + ID
新規追加フィールド		
P2PBridge ID	P2PBridge のピア ID	
WSN ID	Location ID	IP アドレス
温度センサ		あり
気圧センサ	なし	あり
照度センサ		あり
加速度センサ	なし	あり
振動センサ	あり	なし
バッテリー電圧		あり
設置場所 住所	P2PBridge で設定	
設置場所 緯度	Location ID から抽出	P2PBridge で設定
設置場所 経度	Location ID から抽出	P2PBridge で設定

度、経度を示す属性情報については、入力するフィールドを新たに追加した。WSN ID には Particle の場合には XBridge の Location ID、MOTE の場合にはシンクノードの IP アドレスを入力した。センサノードの保持するセンサの有無については、受信したセンシングデータから判断する。設置場所の住所、緯度、経度については、あらかじめ P2PBridge に WSN ID ごとに設定を行っておくものとした。なお、Particle については Location ID から緯度、経度を抽出した。

また、WSN の広告については、同様に PipeAdvertisement クラスを用い、その Name フィールドに WSN ID を入力した。また、WSN に接続するセンサノードの ID のリストを入力するフィールドを新たに追加した。

JXTA において広告は eXtensible Markup Language (XML) で記述される。このため、新たな種類のセンサを持つセンサノードを P2PBridge に収容する場合でも、それを示す XML のタグを新たに定義することで、広告の属性情報として容易に追加することが可能である。

JXTA の P2P ネットワークでは、広告は設定したライフタイムが経過するまで保持される。このため、各インスタンスはライフタイムの半分が経過した時点で、再度、広告の広報を行う。また、センサノードの故障や WSN 外への移動などにより、ライフタイム内に同じセンサノードからセンシングデータを受信できなかった場合には、該当するセンサノードの

```

<sensingData>
<type>Temperature</type>
<value>25.0</value>
<scale>0</scale>
<unit>Celsius</unit>
<additionalInfo>
<!-- 測定誤差, 解像度など -->
<!-- 変換前の値, 測定単位など -->
<!-- 独自の測定単位の説明など -->
</additionalInfo>
</sensingData>

```

図 5 センシングデータの共通フォーマット
Fig.5 Common sensing data format.

インスタンスは削除される。本実装ではセンサノードが WSN の外へ移動しうることを想定し、それを検知するためライフタイムを 600s としたが、データの送信間隔が長いもしくはセンサノードが WSN 内に固定されると期待される場合には、広告の再広報処理を省くため、より大きなライフタイムを設定することが望ましい。

4.5.3 センシングデータの転送

JXTA ではピア間の通信のため、PipeService と呼ばれる P2P 通信サービスを提供している。そこで、センシングデータの転送のため、特に双方向通信をサポートしている JxtaBiDiPipe を利用した。

ピアが広告を検索によって取得し、それに含まれる Pipe ID を使って P2PBridge と通信コネクションを開設すると、P2PBridge はその広告に該当する Particle や WSN のセンシングデータをピアに転送する。JxtaBiDiPipe ではメッセージの記述に XML を用いるため、P2PBridge は受信したセンシングデータをそのままのフォーマットで転送する場合、BASE64 でエンコードするとともに、センシングデータの受信時刻を入力した XML 文書を作成して送信することとした。

また、Particle と MOTE で共通的なフォーマットを使用する場合には、図 5 に示すフォーマットを用いた。将来的にどのようなスケール、測定単位がセンシングデータの共通のフォーマットとして用いられるかは標準化を待つ必要がある。このため、本実装では各センシ

データのセンサの種類 (type), 値 (value), スケール (scale), 単位 (unit) を最小限の情報として記述することとした。本実装では測定単位に国際単位系を用いたが, Particle と MOTE のセンシングデータについてはともに国際単位系に準拠していたため, 単位の変換は不要であった。ただし, スケールについては単位をミリなどの接頭辞を含まない形で記述できるように調整した。たとえば, MOTE の加速度センサの単位は mG であったため, スケールに “-3”, 単位に “G” を入力した。

センシングデータの記述に XML を用いることにより, 4.5.2 項の広告の属性情報の場合と同様に, センシングデータの測定誤差ならびに解像度などの情報も, 新たに XML のタグとして追加定義可能である。ただし, 通常, これらの情報はセンサノードからのセンシングデータには含まれておらず, P2PBridge にあらかじめ設定したり, センサノードの ID から検索, 取得したりするなどの対応が必要となるため, 付加情報として additionalInfo タグ内に記述する。また, 変換可能かつ異なる測定単位のセンシングデータが存在する場合には, その値を変換する必要がある。その際, 元の値ならびに測定単位も付加情報として追加することも有益と考えられる。また, 測定単位が変換不可能な独自なものについては, そのセマンティクスを付加情報として記述することが望ましい。

4.5.4 ExtendedDiscoveryService

JXTA における既存の検索機能である DiscoveryService は, DHT による完全一致検索と, Walk と呼ばれる RDV 間のクエリの巡回による前方・後方一致検索しかサポートしていない。

このため, DiscoveryService を拡張し, 3.4.3 項の範囲検索, 多項目検索の機能を追加した ExtendedDiscoveryService を新たに実装した。JXTA は一般的な DHT 手法と異なり, DHT を構築する RDV は, 他の RDV とピア ID を定期的に交換するため, すべての RDV のピア ID を把握することができる。したがって, RDV 間のロケータの配信ならびにクエリ・応答の送受信を 1 ホップで行うことが可能である (ただし, RDV の数の増加した場合, RDV のピア ID の交換にかかる負荷が増加するため, スケーラビリティに劣る)。そこで, 本実装では広告の広報の際, ロケータである SrdiMessage を各属性情報のインデックスに該当する (複数の) RDV へ同時に直接送信することとした。また, クエリである ResolverQueryMsg を多項目の検索条件を入力可能なように拡張したうえで, 3.4.4 項に従って決定した (複数の) RDV へ同時に直接送信するようにした。

さらに, 広告に属性情報のデータ型を記述することで, 各 RDV が事前に属性情報についての情報を持たなくても, 適切に広告のロケータを配信することを可能とした。具体的

には, 属性値のデータ型が文字列型であった場合はハッシュ関数を用い, 数値型であった場合は 3.4.3 項の方法に従ってインデックスを生成し, それぞれロケータを配信する RDV を決定する。また, 属性情報が数値型の場合には, 値域を示す情報も盛り込んだ。たとえば, 符号なし 8 ビット整数 (uint8) であれば値域は [0, 255] となり, これによって RDV は 3.4.3 項の式 (1) を決定することができる。

4.5.5 センシングサービス

センシングサービスを提供するため, P2PBridge ならびにピアに, JXTA の P2P ネットワーク上で Web サービスを実現するミドルウェア JXTA-SOAP¹⁴⁾ を導入した。

JXTA-SOAP では, サービス情報の記述に WSDL を用いる。このため, 新たなセンシングサービスを実装した場合, その WSDL を生成し, P2PBridge に登録する。P2PBridge は起動時に WSDL を読み込み, センシングサービスの広告を P2P ネットワーク上に広報する。ピアは ExtendedDiscoveryService を用いて広告を検索, 発見し, それに含まれる WSDL からセンシングサービスを利用するための SOAP の要求メッセージを生成, P2PBridge に送信する。P2PBridge は要求されたセンシングサービスの処理を行い, 結果を SOAP の応答メッセージとしてピアに返信する。JXTA-SOAP ではこれらの SOAP メッセージの伝送プロトコルに, JXTA の PipeService が用いられる。

本論文ではセンシングサービスの例として, ピアから要求されたセンサノードが最後に送信したセンシングデータを提供するセンシングサービス 1 ならびにピアから要求されたセンサノードに回答要求メッセージを送信するセンシングサービス 2 を実装した。センシングサービス 1 により, ピアはセンサノードが次に送信するセンシングデータを待つことなく, 直近のセンシングデータを取得することができる。また, センシングサービス 2 によりピアがセンサノードに対する回答要求メッセージのフォーマットを知らなくても, センサノードの死活を確認することができる。

4.6 センサアプリケーション

P2PBridge の機能を確認するため, ピアに以下の機能を持つセンサアプリケーションを実装した。P2PBridge の広報するセンサノードならびに WSN の広告を ExtendedDiscoveryService により検索し, 発見した広告に含まれる Pipe ID を用いて P2PBridge に接続, センシングデータを受信する。また, P2PBridge の提供するセンシングサービス 1, 2 の広告を同様に検索し, 発見した広告に含まれる WSDL を用いて P2PBridge にセンシングサービスの実行を要求する。

5. 性能評価

5.1 性能測定環境

図 6 のように、4 章で実装した P2PBridge1 ~ 3 ならびにセンサアプリケーションを実装したピアのほか、RDV0 ~ 10, Particle ならびに MOTE のシンクノード、データ生成 PC を L3 スイッチで接続した。各シンクノードにはセンサノードを 10 個接続した。データ生成 PC は P2PBridge の性能測定のため、擬似的な Particle のセンシングデータを任意の間隔で送信できる。ピアならびに P2PBridge1 ~ 3 は DHT の構築を行わない EDGE として動作し、それぞれ RDV0 ~ 3 に収容される。また、各 PC の時刻は Network Time Protocol (NTP) を用いて同期させた。

次節では、本環境における性能測定ならびに評価について述べる。また、性能測定結果を表 2 にまとめて示す。

5.2 性能測定ならびに評価

5.2.1 広告の広報

実装した ExtendedDiscoveryService の性能を測定するため、データ生成 PC を用いて、10,000 個の Particle が P2PBridge3 の配下に仮想的に存在する環境を生成し、図 7 に示す広告の広報処理における以下の時刻を測定した。

- t1 P2PBridge3 が広告を RDV3 に送信した時刻
- t2 RDV3 が広告を受信した時刻
- t3 RDV3 が広告のロケータを、該当する他の RDV0 ~ 10 のいずれかに送信した時刻
- t4 他の RDV がロケータを受信した時刻
- t5 他の RDV がロケータを記録した時刻

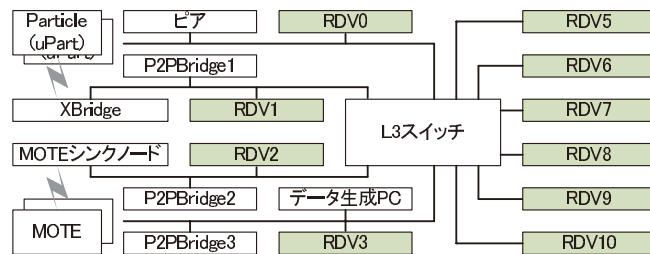


図 6 測定環境
Fig. 6 Testbed.

結果、P2PBridge3 が広告を送信してから、RDV でロケータが記録されるまでに最大で 8,000 ms 程度を要した ($t_5 - t_1$)。そのうち、広告ならびにロケータのメッセージをピア間で送受するのに要した時間は 10 ~ 20 ms 程度あった ($t_2 - t_1, t_4 - t_3$)。なお、5.2.3 項で示すように、PipeService におけるピア間の接続には 200 ms 程度かかる。したがって、RDV3

表 2 性能測定結果
Table 2 Results of performance measurement.

時間	処理内容	測定結果 [ms]
広告の広報		
$t_2 - t_1$	広告：ピア → RDV3	10 ~ 20
$t_3 - t_2$	ロケータの送信先を決定	約 7,000
$t_4 - t_3$	ロケータ：RDV3 → 他の RDV	10 ~ 20
$t_5 - t_4$	他の RDV がロケータを記録	約 1,000
$t_5 - t_1$	合計	約 8,000
広告の検索・発見		
$t_7 - t_6$	クエリ：ピア → RDV3	10 ~ 20
$t_8 - t_7$	クエリの送信先を決定	100 ~ 300
$t_9 - t_8$	クエリ：RDV3 → 他の RDV	10 ~ 20
$t_{10} - t_9$	該当するロケータを検索	約 100
$t_{11} - t_{10}$	クエリ：RDV → P2PBridge	10 ~ 20
$t_{12} - t_{11}$	該当する広告を検索	100 ~ 300
$t_{13} - t_{12}$	応答：P2PBridge → ピア	約 30
$t_{13} - t_6$	合計	約 800
センシングデータの転送		
$t_{15} - t_{14}$	ピアが P2PBridge に接続	約 200
$t_{17} - t_{16}$	メッセージの生成	約 5
$t_{18} - t_{17}$	メッセージ：P2PBridge → ピア	約 10
センシングサービスの利用		
$t_{22} - t_{21}$	センシングサービス 1 の処理	約 10
$t_{22} - t_{21}$	センシングサービス 2 の処理	約 50
$t_{22} - t_{19}$	合計	約 1,300



図 7 広告の広報
Fig. 7 Publish of advertisement.

が初めて通信する RDV にロケータを転送する場合、さらにこの接続時間が加わっていた。また、RDV3 自身が広告のロケータを保持する RDV となる場合には、ロケータの送信処理 ($t4 - t3$) は発生しない。

RDV3 が広告を受信してからロケータを他の RDV へ送信するまでに 7,000 ms を要した ($t3 - t2$)。これは、RDV3 が広告をキャッシュする時間が主な要因である。具体的には、JXTA では広告のキャッシュに XML データベース¹⁵⁾ を用いており、そこでファイルシステムに情報を書き込むのに時間を要している。なお、RDV3 が広告の属性情報からロケータを配信すべき他の RDV の決定に要した時間は 100 ~ 300 ms 程度であった。このことから、広告を広告のキャッシュする前に、ロケータの配信先を決定し、配信を行うように RDV の動作を変更すれば、より早く広告の広報が可能と考えられる。EDGE から受信した広告はメモリ上にも記録されるため、ファイルシステムへの書き込みを待たなくても、キャッシュの検索は可能である。

また、他の RDV がロケータを記録するのに 1,000 ms 程度かかった ($t5 - t4$)。これは、RDV3 の広告をキャッシュ処理と同じく、XML データベースによるファイルシステムへの書き込み処理が主な要因である。なお、ロケータはメモリ上にも記録されるため、ファイルシステムへの書き込みを待たなくても、ロケータの検索は可能である。

5.2.2 広告の検索・発見

次に、ExtendedDiscoveryService の範囲検索ならびに多項目検索にかかる時間を測定するため、特定の緯度、経度に存在するセンサノードを検索し、応答として 50 個の広告がピアに提供される場合において、以下の時刻を測定した (図 8 参照)。

t6 ピアがクエリを送信した時刻

t7 RDV0 がクエリを受信した時刻

t8 RDV0 がクエリに該当する他の RDV0 ~ 10 にクエリを送信した時刻

t9 他の RDV がクエリを受信した時刻

t10 他の RDV がクエリに該当する広告を広報した P2PBridge1 ~ 3 にクエリを送信した時刻

t11 P2PBridge がクエリを受信した時刻

t12 P2PBridge がクエリに該当する広告を応答としてピアに送信した時刻

t13 ピアが応答を受信した時刻

結果、ピアがクエリを送信してから応答を受信するまでに平均 800 ms 程度を要した ($t13 - t6$)。そのうち、クエリのメッセージをピアならびに RDV 間で送受するのに要した

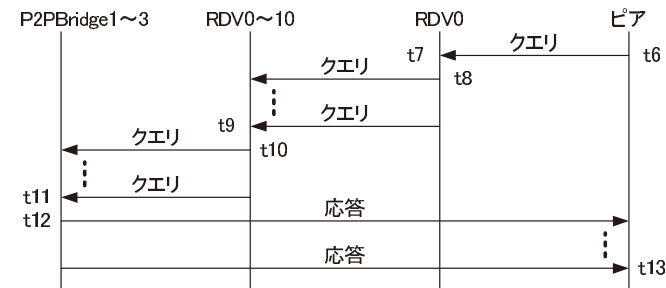


図 8 広告の発見

Fig. 8 Discovery of advertisement.

時間は、広告ならびにロケータの場合と同様に、10 ~ 20 ms 程度あった ($t7 - t6$, $t9 - t8$, $t11 - t10$)。なお、RDV0 自身が広告のロケータを保持する RDV である場合には、 $t9 - t8$ の処理時間は発生しない。また、初めて通信する RDV 間やピア間でクエリや応答を転送する場合には、200 ms 程度の PipeService の接続時間が付加されていた。

P2PBridge が応答を送信してからピアで受信するまでの時間 ($t13 - t12$) は、応答となる広告のメッセージサイズがクエリなどに比べて大きいため、30 ms 程度かかった。

RDV0 がクエリをリレーすべき RDV を決定し、クエリを送信するまでに 100 ~ 300 ms 程度を要した ($t8 - t7$)。また、クエリを受信した他の RDV が該当するロケータを検索し、クエリを P2PBridge に中継するまでに 100 ms 程度 ($t10 - t9$)、クエリを受信した P2PBridge が該当する広告を検索し、ピアへ送信するまでに 100 ~ 300 ms 程度を要した ($t12 - t11$)。

以上の結果を別途測定した従来の JXTA の DiscoveryService と比較する。実装した ExtendedDiscoveryService では、ロケータやクエリを送信すべき RDV が複数決定されることから DiscoveryService に比べ、それらの送信にかかる時間だけ処理時間が増加したが、複数の送信処理が並行して行われるため数 ms 程度の差しか生じなかった。また、ロケータやクエリを送信すべき RDV の決定や、RDV においてクエリに該当するロケータや広告を検索するのに要する時間についても、DiscoveryService に比べ数 ms 程度の差しか生じなかった。

5.2.3 センシングデータの転送

P2PBridge によるセンシングデータの転送時間に関する性能を評価するため、以下の時刻の測定を行った (図 9 参照)。

t14 ピアが P2PBridge に接続要求を送信した時刻

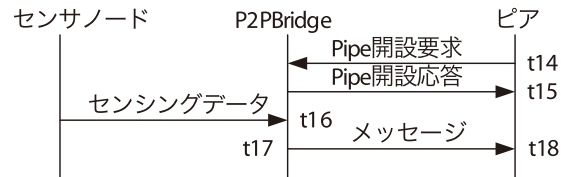


図 9 センシングデータの転送
Fig. 9 Forwarding sensing data.

- t15 ピアが P2PBridge からの接続応答を受信した時刻
- t16 P2PBridge がセンサノードからセンシングデータを受信した時刻
- t17 P2PBridge がピアへセンシングデータを送信した時刻
- t18 ピアが P2PBridge からセンシングデータを受信した時刻

結果、ピアが P2PBridge に接続するまでにかかった時間 ($t15 - t14$) は平均 200 ms であった。これは、JxtaBiDiPipe の双方向の通信路を開設する際に生じる処理遅延と考えられる。

P2PBridge が Particle からセンシングデータを受信後、ピアに転送を開始するまでの時間 ($t17 - t16$) は平均 5 ms であった。これは、センシングデータを XML 文書に変換するのに要する時間である。

P2PBridge の転送したセンシングデータがピアで受信されるまでの時間 ($t18 - t17$) は平均 10 ms であった。これは本測定環境におけるネットワーク遅延に該当するが、メッセージに XML を用いていることからメッセージサイズが増加するため、センシングデータそのまま送信する場合よりもメッセージ遅延が増加することを確認した。

次に、P2PBridge からピアへのセンシングデータの転送のスループットについて評価するため、データ生成 PC から擬似的なセンシングデータを連続的に P2PBridge に送信した。結果、毎秒 180 個のセンシングデータを P2PBridge からピアに転送可能であった。収容する WSN のセンシングデータの発生率やセンシングデータの転送を要求するピアの数によってはスループットが不足する可能性があるが、センシングデータを XML に変換する処理にかかる時間 ($t17 - t16$) が主な律速要因と考えられ、この処理を効率化することでより高いスループットが得られると予想される。

5.2.4 センシングサービスの利用

P2PBridge で提供されるセンシングサービスをピアが発見するまでの時間は、Extended-

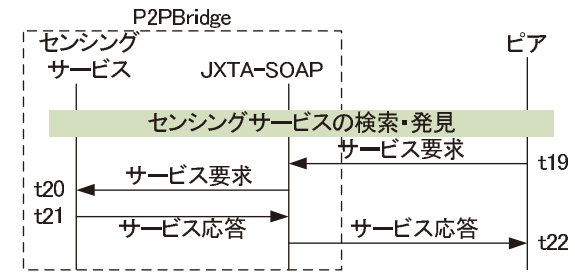


図 10 JXTA における WEB サービスの利用
Fig. 10 Utilization of Web service on JXTA.

DiscoveryService によってセンサノードや WSN の広告の検索と同じ処理が行われるため、5.2.2 項と同様の結果となった。

次に、ピアがセンシングサービス 1, 2 を利用する際の各処理の時刻を以下のとおり測定した (図 10 参照)。

- t19 ピアが P2PBridge にセンシングサービスを要求した時刻
- t20 P2PBridge にてセンシングサービスの処理が開始された時刻
- t21 P2PBridge にてセンシングサービスの処理が完了した時刻
- t22 センシングサービスの応答が P2PBridge からピアに到着した時刻

測定の結果、ピアがセンシングサービスを要求してから、その応答を得るまでに平均 1,300 ms 程度かかった ($t22 - t19$)。センシングサービス 1 ならびに 2 の処理時間 ($t22 - t21$) はそれぞれ平均 10 ms, 50 ms 程度であったことや、本環境のネットワーク遅延は 10 ms 程度であることから、P2PBridge におけるセンシングサービスのインスタンス生成、XML 文書の解析ならびに生成処理、メッセージを伝送するための PipeService の開設処理などが主な要因と考えられる。

次に、P2PBridge のセンシングサービスの単位時間あたりの処理可能数を評価するため、ピアから要求メッセージを連続的に送信し、毎秒何個の応答が得られるか測定したところ毎秒 7 個程度の応答を得られた。センシングサービスを最初に利用する場合のみ 1,300 ms の時間がかかるが ($t22 - t19$)、それ以降はインスタンス生成などの初期化処理が省かれるため、150 ms 程度で応答を得られていた。

この結果から、センシングサービスを利用形態やピアの数によっては性能が不足する可能性があるため、SOAP の要求メッセージの解析ならびに応答メッセージの生成処理などの

P2PBridge における処理効率を改善し、センシングサービスの単位時間あたりの処理可能数を向上させる必要があると考えられる。また、P2PBridge はセンシングサービスの提供以外にも、センサノードからのセンシングデータの受信やピアへのセンシングデータの転送などの処理を行っており、それらの処理が互いの性能に影響を与える関係にある。したがって、各処理をどの程度の割合で行うか事前に設計することが、P2PBridge の安定的な運用に必要と考えられる。

5.2.5 利用するネットワークの影響

インターネットなどの実際のネットワークではピア間の通信遅延や帯域が、メッセージの送受信にかかる時間により影響をあたえるため、本測定環境における結果と比べると広告の広報や検索・発見、センシングデータの転送、センシングサービスの提供にかかる処理時間は増大する傾向にあると考えられる。その一方で、センシングデータの転送のスループット可能数やセンシングサービスの単位時間あたりの処理可能数などは、P2PBridge やピアの性能に依存するため、実環境においてもあまり変化しないと考えられる。

6. 関連研究

P2P 技術を用いて複数の WSN を収容する取り組みとして文献 16)、17) などがある。これらでは、P2P ネットワークを介してセンシングデータを取得するとともに、その経路上にセンシングデータのフィルタやバッファリングなどの処理を行うピアを動的に挿入していくことで、P2P ネットワークにおけるセンシングデータの加工処理を行うことに焦点を当てている。一方、提案方式では、センシングサービスのサービス記述を広告として提供することで、ピアが発見したセンシングサービスのメッセージ仕様をあらかじめ知らなくても利用することを可能にしている。また、センシングデータを共通的なフォーマットに変換することで、種類の異なる WSN の収容を可能にしている。また、これらの取り組みではシミュレーションによる評価を行っているが、本論文では P2P を用いて種類の異なるセンサノード、WSN を収容可能なシステムを実装し、評価を行っている。

サーバに複数の WSN を収容するアプローチとしては、文献 18)、19) などがある。文献 18) では、WEB サービスを用いて WSN のサーバに属性情報やセンシングデータを登録し、それらをインターネット上の地図検索サービス²⁰⁾と連動したユーザインタフェースを用いて検索、取得することができる。このような方式では収容する WSN の数が増えるに従い、サーバの運用者がシステムの規模を拡張していく必要がある。また、提案方式においても、地図検索サービスと連動したユーザインタから入力された条件を基に、統合通信基盤を

通じて希望のセンサノードや WSN を検索・発見するセンシングアプリケーションを作成することは可能と考えられる。文献 19) は、複数のサーバを用いた階層的なデータベースにセンサの属性情報を蓄積し、XML Path Language (XPath) を用いた検索を行う。これにより多数のセンサを収容可能とするとともに、住所などの属性情報の階層関係を利用した検索が可能である。しかしながら、データベースの階層関係の構築ならびに更新に運用コストが発生するという問題がある。また、P2P ネットワークにおいて XPath を用いたリソース発見を実現する取り組みも行われており²¹⁾、これらを導入することで、統合通信基盤において階層関係を利用した検索を実現することもできよう。

DHT を用いた範囲検索については多数の研究がなされている²²⁾⁻²⁴⁾。これらでは範囲検索を実現するため、本提案方式でも行っているように、ハッシュ関数を使わずにロケータをピアに配信することで、属性値の連続性を保持している。しかしながら、検索範囲内のすべてのピアへクエリを中継する必要があり、完全一致の検索に比べ、検索時間が増大すると考えられる。本論文では JXTA の DiscoveryService を拡張したため、1 ホップでクエリを RDV へ送信可能であり、範囲検索を行ってもほとんど検索時間は変化しない。

また、ハッシュ関数を使わずにロケータをピアに配信するため、ロケータが一部のピアに偏って配信される可能性がある。これについて、文献 22) ではロケータが集中している位置にピアを再配置することで負荷を分散させたり、文献 23) ではロケータが集中する場合にオフセット値を設定することで、ロケータの集中していないピアへ配信を行ったりしている。提案方式では、属性情報の値域に応じて属性値をピア ID 空間に射影するため、属性情報の値域がピア ID のものに比べて小さい場合にも均等にロケータを配信することができる。しかしながら、同じ値域を持つ属性情報において属性値が偏っている場合には、やはり一部のピアにロケータが多く配信されてしまうため、文献 22)、23) のような対処が必要となろう。

DHT を用いた多項目検索について文献 22) では各検索条件についてクエリを送信し、得られた応答から項目間の論理式を満たすものを抽出することで実現しているが、提案方式では各検索条件についてクエリを送信すべきピアの中から項目間の論理式を満たすピアのみクエリを送信することで、クエリならびに応答の送受信数を低減させている。

異なる種類のセンサノードのセンシングデータを等しく扱うためには、センシングデータのフォーマットの標準化を待つ必要がある。また、センサノードや WSN の広告を記述するためにも、標準的な記述方式が必要である。文献 26) は XML によるセンサシステムの記述を可能としているが、高機能であるためそのままでは文書量が非常に多く、本論文で想定している環境でそのまま利用した場合にはピアの処理負荷の増大、センシングデータの

送信遅延の増加を招く可能性があり、必要となる部分を取捨選択する必要がある。本実装ではセンサの種類、値、スケール、単位を最小限の情報として記述する XML 文書を共通的なフォーマットとして使用することで通信量を削減している。また、センシングデータの測定誤差ならびに解像度などの付加情報は必要に応じて付加することとした。また、Internet Engineering Task Force (IETF) においてセンサのための Management Information Base (MIB) が標準化されているが²⁵⁾、MIB は Basic Encoding Rule (BER) によってエンコードされるため、人間が読むにはデコーダが必要となり、可読性に乏しいという問題がある。

JXTA における DiscoveryService や PipeService の性能は文献 27) などで評価されており、本論文で実装した ExtendedDiscoveryService は、従来の DiscoveryService とほぼ同じ処理時間で範囲検索や多項目検索が可能となっている。しかしながら、範囲検索や多項目検索ではクエリやロケータが複数の RDV に送信される場合があるため、ネットワークの帯域や RDV の記憶領域をより多く消費する傾向があると考えられる。また、DiscoveryService や ExtendedDiscoveryService は RDV の数が増加した場合のスケラビリティに問題があり、システムの規模によっては他の DHT 手法を応用する必要がある。

7. おわりに

本論文では、複数のワイヤレスセンサネットワーク（以下、WSN）が広域に分散する環境において、WSN の設置位置や種類に依存せず、センシングデータを統一的な方法で取得、利用することを目的とした統合通信基盤の提案を行った。これにより、WSN の地理的なカバー範囲を拡大したり、異なる WSN のセンシングデータを組み合わせることによる新たな利用方法を創出したりすることが期待される。

提案方式では Peer to Peer (P2P) のリソース発見機能を利用して、センサの種類や設置位置などの属性情報に基づいてセンサノードならびに WSN を検索・発見を可能にするとともに、センシングデータを取得する方法として、P2P ネットワークを通じたセンシングデータの転送ならびに要求応答に基づくセンシングサービスを提供する。

また、提案方式に基づき、P2P ミドルウェアに JXTA を適用したシステムの実装を行い、種類の異なるセンサノードの例として Particle コンピュータならびに MOTE を用いた WSN を収容する測定環境を構築した。そのうえで、センサノードの発見、センシングデータの転送ならびにセンシングサービスの提供について性能を測定、評価した。結果、現在の実装ではセンシングデータの転送スループットやセンシングサービスの単位時間あたりの処理回数に制限があるものの、用途によっては十分に適用できることが分かった。また、従来

の JXTA のリソース発見機能とほぼ同じ処理時間で範囲検索や多項目検索が可能となっていることを確認した。

今後、標準化されたセンサノードやセンシングデータの記述フォーマットの適用、実環境で利用した場合の評価、性能向上を行うことが考えられる。

謝辞 最後に、ご協力いただいた Braunschweig 大学 Michael Beigl 教授、Karlsruhe 大学 Telecooperation Office のメンバならびに日頃ご指導いただく（株）KDDI 研究所秋葉所長、鈴木執行委員に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) Heidemann, J. and Govindan, R.: An Overview of Embedded Sensor Networks, Technical Report ISI-TR-2004-594, USC/Information Sciences Institute (2004).
- 2) Isomura, M., Riedel, T., Decker, C., Beigl, M. and Horiuchi, H.: Sharing Sensor Networks, *Proc. IWSAWC 2006*, p.61 (2006).
- 3) Project JXTA (online). available from <https://jxta.dev.java.net/> (accessed 2008-02-12).
- 4) TecO Particle Home (online). available from <http://particle.teco.edu> (accessed 2008-02-12).
- 5) CrossBow Technologies (online). available from <http://www.xbow.com> (accessed 2008-02-12).
- 6) BTnodes - A Distributed Environment for Prototyping Ad Hoc Networks (online). available from <http://www.btnode.ethz.ch> (accessed 2008-02-12).
- 7) Hill, J., Bounadonna, P. and Culler, D.: Active Message Communication for Tiny Network Sensors (online). available from <http://www.tinyos.net/papers/ammote.pdf> (accessed 2008-02-12).
- 8) Beigl, M., Krohn, A., Zimmer, T., Decker, C. and Robinson, P.: AwareCon: Situation Aware Context Communication, *Proc. Ubicomp 2003*, pp.132-139 (2003).
- 9) Stoica, I., Morris, R., Karger, D., Kaashoek, F. and Balakrishnan, H.: Chord: A Scalable Peer-to-peer Lookup Service for Internet Applications, *Proc. ACM SIGCOMM 2001*, pp.149-160 (2001).
- 10) Ratnasamy, S., Francis, P., Handley, M., Karp, R. and Shenker, S.: A Scalable Content-Addressable Network, *Proc. ACM SIGCOMM 2001*, pp.161-172 (2001).
- 11) Rowstron, A. and Druschel, P.: Pastry: Scalable, distributed object location and routing for large-scale peer-to-peer systems, *Proc. IFIP/ACM Middleware 2001*, pp.329-350 (2001).
- 12) Simple Object Access Protocol (SOAP) (online). available from <http://www.w3.org/TR/soap/> (accessed 2008-02-12).

- 13) Web Services Description Language (WSDL) (online). available from <http://www.w3.org/TR/wsdl> (accessed 2008-02-12).
- 14) JXTA-SOAP (online). available from <https://soap.jxta.dev.java.net/> (accessed 2008-02-12).
- 15) Apache Xindice (online). available from <http://xml.apache.org/xindice/> (accessed 2008-02-12).
- 16) Chen, G., Li, M. and Kotz, D.: Design and Implementatio of a Large-Scale Context Fusion Network, *Proc. MobiQuitous 2004*, pp.246–255 (2004).
- 17) Shneidman, J., Pietzuch, P., Ledlie, J., Roussopoulos, M., Seltzer, M. and Welsh, M.: Hourglass: An Infrastructure for Connecting Sensor Networks and Applications, Harvard Technical Report TR-21-04 (2004).
- 18) Kansal, A., Nath, S., Liu, J. and Zhao, F.: SenseWeb: An Infrastructure for Shared Sensing, *IEEE Multimedia*, Vol.14, No.4, pp.8–13 (Oct.–Dec. 2007).
- 19) Gibbons, P., Karp, B., Ke, Y., Nath, S. and Seshan, S.: IrisNet: An Architecture for a World-Wide Sensor Web, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.2, No.4, pp.22–33 (Oct.–Dec. 2003).
- 20) Windows Live Local (online). available from <http://maps.live.com/> (accessed 2008-02-12).
- 21) Bonifati, A., Matrangolo, U., Cuzzocrea, A. and Jain, M.: XPath Lookup Queries in P2P Networks, *Proc. ACM WIDM 2004*, pp.48–55 (2004).
- 22) Bharambe, A., Agrawal, M. and Seshan, S.: Mercury: Supporting Scalable Multi-Attribute Range Queries, *Proc. ACM SIGCOMM 2004*, pp.353–366 (2004).
- 23) Pitoura, T., Ntarmos, N. and Triantafillou, P.: Replication, Load Balancing and Efficient Range Processig in DHTs, *Proc. EDBT 2006*, pp.131–148 (2006).
- 24) Harvey, N., Jones, M., Saroiu, S., Theimer, M. and Wolman, A.: Skipnet: A scalable overlay network with practical locality properties, *Proc. USENIX USITS 2003*, p.9 (2003).
- 25) Bierman, A., Romaschanu, D. and Norseth, K.: Entity Sensor Management Information Base, IETF RFC3433 (2002).
- 26) Sensor Model Language (SensorML) (online). availabel from <http://www.opengeospatial.org/standards/sensorml> (accessed 2008-02-12).
- 27) Halepovic, E., Deters, R. and Traversat, B.: Performance Evaluation of JXTA Rendezvous, *Proc. DOA 2004*, pp.1125–1142 (2004).

(平成 19 年 9 月 7 日受付)

(平成 20 年 2 月 5 日採録)



磯村 学

平成 7 年名古屋工業大学電気情報工学科卒業。平成 9 年名古屋工業大学大学院工学研究科電気情報工学専攻修士課程修了。同年日本高速通信(株)(現 KDDI(株))入社。現在,(株)KDDI 研究所コピキタスネットワークグループ所属。この間,ネットワーク管理,ネットワークプロトコル,モバイルネットワークング,ITS(高度道路交通システム)の研究開発に従事。電子情報通信学会平成 14 年度学術奨励賞を受賞。電子情報通信学会会員。



井戸上 彰(正会員)

昭和 59 年神戸大学工学部電子工学科卒業。昭和 61 年神戸大学大学院工学研究科修士課程修了。同年国際電信電話(株)(現 KDDI(株))入社。平成 19 年電気通信大学大学院情報システム学研究科博士後期課程修了。現在,(株)KDDI 研究所コピキタスネットワークグループ・グループリーダ。工学博士。この間,ネットワークアーキテクチャ/プロトコル,モバイルネットワークの研究に従事。平成 5 年情報処理学会大会奨励賞,平成 10 年情報処理学会大会優秀賞受賞。電子情報通信学会会員。



堀内 浩規(正会員)

昭和 58 年名古屋大学工学部電気工学科卒業。昭和 60 年名古屋大学大学院情報工学専攻修士課程修了。同年国際電信電話(株)(現 KDDI(株))入社。現在,(株)KDDI 研究所執行役員。工学博士。この間,ネットワークアーキテクチャ,通信プロトコルの形式記述,ネットワーク管理,分散処理,ITS(高度道路交通システム)の研究開発に従事。電子情報通信学会平成 4 年度学術奨励賞,情報処理学会平成 8 年度ならびに平成 12 年度全国大会優秀賞を各受賞。電子情報通信学会会員。