

P2P データポット: センサーネットワーク向け分散型マイクロストレージ アーキテクチャ

藤崎 友樹[†] 鈴木 和久[†] 横田 裕介^{††} 大久保英嗣^{††}

[†] 立命館大学大学院理工学研究科 〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

^{††} 立命館大学情報理工学部 〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

E-mail: [†]{fujisaki,ksuzuki}@sol.cs.ritsumeai.ac.jp, ^{††}{yyokota,okubo}@cs.ritsumeai.ac.jp

あらまし 現在,我々は,斜面防災システムにおいて必要となる,広範囲の観測を可能とするセンサーネットワークの基盤システムの開発を進めている.本システムでは,センサーネットワークによって取得された広範囲のセンシングデータを,拠点ごとに設置されたマイクロストレージである P2P データポットに蓄積する.P2P データポットは,センシングデータの蓄積を行うと同時に,JXTA を利用した動的なアドホックネットワークを構成する.これにより,山の斜面のような広範囲センシング環境における外部からの統一的な問合せ処理および柔軟なデータの回収を可能とする.本稿では,P2P データポットの構成と実装について述べる.

キーワード P2P, センサーネットワーク, クエリ処理

P2P Data Pot: A Distributed Micro Storage Architecture for Sensor Networks

Yuki FUJISAKI[†], Kazuhisa SUZUKI[†], Yusuke YOKOTA^{††}, and Eiji OKUBO^{††}

[†] Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University
1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

^{††} College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University
1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

E-mail: [†]{fujisaki,ksuzuki}@sol.cs.ritsumeai.ac.jp, ^{††}{yyokota,okubo}@cs.ritsumeai.ac.jp

Abstract We have been developing a platform for sensor networks that enables observation of wide areas of slopes for disaster reservation systems. Our system collects sensing data from sensor nodes and sends them to P2P data pots. The P2P data pot is installed on each of observation points, and has a storage, a micro-processor, and a wireless device. The pots store sensing data and construct a dynamic ad-hoc network utilizing JXTA technology. Our approach achieves that users can issue queries in a uniform style and collect stored data in a flexible manner. In this paper, the structure and the implementation of the P2P data pot are described.

Key words P2P, Sensor Network, Query Processing

1. はじめに

近年,センサー技術の発展により,さまざまな環境にセンサーを適用することが可能となった.計算能力,ストレージ,無線通信機能を持つ小型のデバイスをノードとしてセンサーとともに観測対象地点に直接設置し,センシングデータの分散処理を行うことによって,従来に比べ,より複雑なセンシングデータの処理が実現されつつある.現在,我々は,このようなセンサーネットワーク技術のより高度な応用を目標とした研究を進めている.一つはセンサーネットワークを利用した新しい

斜面防災システム,もう一つは移動体センシングによるパーソナルセンシングシステムである.

斜面防災システムにおいては,広範囲の観測,長期にわたる運用,さまざまな種類のセンサを併用した観測,運用中における動的なセンサの追加,状況の変化に応じた観測の詳細度の柔軟な変更などが求められる.これらの要求は,センサーネットワークの導入によるセンサーノードを用いた観測,およびセンサーネットワークのゲートウェイとなるマイクロサーバの導入によって対応することが可能になると考えられる.

また,移動体によるセンシングは,広範囲な空間において高

解像度の位置情報とともに環境情報を収集可能とする技術である。従来、センサーによる計測は、センサーを固定配置する定点センシングが主流であった。しかし定点センシングにおいては、センサーを固定することによる拡張性と柔軟性の欠如、センサーを稠密的に配置するための設備コスト、環境による配置制約が問題となる。これらの問題を解決するためには、固定配置したセンサーによる定点センシングではなく、移動体によるセンシングを考える必要があり、これを我々はパーソナルセンシングと呼んでいる。従来のセンサーネットワークが、人間の有無に関わらず、単純にその場の環境情報を取得するパッシブな方法である一方、パーソナルセンシングは、人間とともに移動するセンサーが付加された端末を介して環境情報をセンシングするアクティブな方法である。したがって、従来のセンサーネットワークのようにセンサーを稠密に配置することなく、安価にかつ精度よく、広範囲にわたって人間の周辺環境情報を常に取得することが可能であり、また、適用可能範囲を拡大することが可能となる。これらを実現するには、自律的かつ適応的に測位・測距を行う自己位置推定技術と、センサーによって取得されたデータをアプリケーションに対し位置透過かつリアルタイムに検索・配信を行う適応的 P2P ストレージネットワーク構成技術が必要であると考えられる。

以上の背景により、現在、我々は、無線アドホックネットワーク上での P2P 技術を利用したマイクロストレージネットワークの研究を行っている。マイクロストレージネットワークは、センサーネットワークとアプリケーションの間に位置し、収集された情報をその場のストレージに保存し、アプリケーションに対して位置透過かつリアルタイムに検索・配信する P2P ネットワーク技術である。このセンサーとアプリケーションの間に位置するマイクロストレージサーバを P2P データポットと呼ぶ。マイクロストレージネットワークは、複数の P2P データポットから構成され、次に示す特徴を持っている。

位置透過性: アプリケーションは、付近の P2P データポットに対して要求を行うだけで、マイクロストレージネットワークを意識することなく、センシングに必要な機能を楽しむことができる。要求を受けた P2P データポットは、アプリケーションとのゲートウェイとなり、要求の解釈と他の P2P データポットとの協調動作を行うことで要求を実行し、結果を返す。

リアルタイム性: センシングによって収集されたデータは、データポット上でリアルタイムに集計および収集することができる。これまで必要であったデータの回収作業が不要となり、センシングデータを迅速に処理することが可能である。

スケーラビリティ: マイクロストレージネットワークは、P2P によるアドホックなネットワークの構築が可能であり、インフラ構築に複雑なネットワーク設計および設定を必要としない。さらに、動的な拡張も可能である。

これらの特徴を利用し、移動体によるセンシング技術、高精度な位置測位技術と組み合わせることにより、安価かつ高精度・広範囲のセンシングが可能な移動センシングプラットフォームが実現可能となる。また、提案するマイクロストレージネットワーク技術は、斜面防災システムのような高度な利用を要求するセンサーネットワークアプリケーションにも適用することが

できる。多くのセンサーネットワークアプリケーションにおいて、センサーネットワークによって収集されたデータやイベントは、センサーのレシーバが接続されたストレージへ蓄積される。本システムを適用することにより、センシングによって収集されたデータの可搬性が向上し、蓄積されたデータの回収に掛かるコストの低減およびセンサーネットワークの適用範囲の拡大が可能となる。

以下、本稿では、2. 章でシステムの概要について述べ、3. 章では提案システムにおいて中心的な役割を果たす P2P データポットの設計について、クエリの処理手法を中心として述べる。4. 章ではシステムの実装について、ハードウェア、ソフトウェアの両面から述べる。5. 章において本システムの実際の適用例について述べた後、6. 章で関連研究について述べる。最後に、7. 章で本研究に関するまとめと今後の課題について述べる。

2. システムの概要

本章では、提案システムが解決する課題とその構成、想定している要求の分類、および本システムが提供する P2P データポットのシステム内での役割について述べる。

2.1 広範囲センシングの課題と要求

広範囲のセンシングにおいては、センサーネットワークの構築に際し次の課題を解決する必要がある。まず、センサーネットワークは、要求や結果の送受信とネットワークを維持するための通信を必要とし、広範囲におよぶ環境をセンシングする場合、通信に掛かる電力消費が規模にしたがって増大するという問題が発生する。このため、単純に巨大なセンサーネットワークを構築するのみでは、広範囲の環境センシングは実現することができない。また、山の斜面などの野外環境の場合、地形によっては、センサーネットワークの設置や設置面上での作業が困難となる場合がある。このため、センサーネットワークに対する要求は、対象となる斜面まで接近せずとも、外部から位置透過的に発行可能であることが要求される。さらに、センシング対象となる環境は、常に固定であるとは限らず、観測の実行中においても、センサーネットワークを動的に追加および削除することが可能であるなど、環境変化にも柔軟に対応可能であることが要求され、同時に、一部の環境が破損した場合も他の環境のセンシングは継続可能となるような耐障害性も要求される。

これらの課題を解決するため、本システムでは、アプリケーションとセンサーネットワークの間に、複数のセンサーネットワークを取りまとめる新たな層を構成する。この層は、複数のセンサーネットワークにおけるデータフローを適切に管理し、アプリケーションがセンサーネットワーク全体に対する操作を発行するための統一的なインタフェースを提供する。本システムを適用することで、広範囲のセンシングにおいても、センサーネットワークを分割することにより、個々のセンサーネットワークにおける消費電力を低減することが可能となる。また、ゲートウェイ機構を用意し、アプリケーションからの要求を透過的に発行可能とすることで、複数のセンサーネットワークを論理的な 1 つの巨大なセンサーネットワークとして扱うことを可能とする。これにより、アプリケーションは、目的のセン

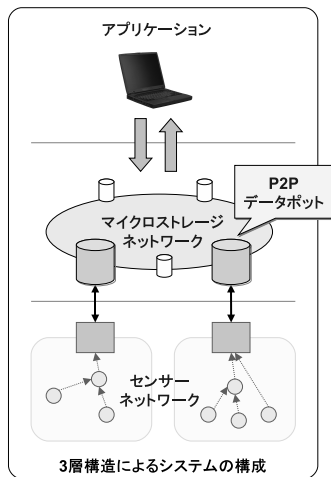


図 1 3層構造による提案システムの構成

Fig. 1 The three-tier structure of the proposed system

センサーネットワークまでの接続を意識することなく、要求を発行することができる。さらに、ネットワークを P2P で構成することにより、動的な環境変化に柔軟に対応し、蓄積データの分散を行うことで耐障害性も実現する。機器の故障やセンシング環境の変更が発生した場合も、稼働中のセンサーネットワークに影響を及ぼさずに必要箇所のみの変更が可能となる。

2.2 3層構造による提案システムの構成

前節の背景より、本システムは、センサーネットワーク、マイクロストレージネットワーク、アプリケーションの3層によって構成される。本システムの構成を図1に示す。

センサーネットワークは、無線通信によるセンサーネットワークを構成する。各センサーノードは、バッテリーによって電力が供給され、センサーのほか小規模のCPUとメモリを持ち、IEEE802.15.4による無線通信機能を用いてマルチホップ通信を行う。センサーネットワークは、数週間から数ヶ月といった長期に渡る運用を可能とするため、一般的に消費電力の低減を主とした設計が行われている。特に、無線通信における電力消費が大きい場合、通信量は少ないことが望ましい。

マイクロストレージネットワークは、複数の P2P データポットから構成される。P2P データポットは、外部より電力が供給され、十分な CPU、メモリ、ストレージ領域を持ち、無線 LAN による無線通信機能を用いてアドホックに P2P ネットワークを構成する。また同時にセンサーネットワークとの通信を行い、センサーネットワークのベースステーションとして動作する。P2P データポットは、これらの2つのネットワークの間に位置し、アプリケーションとセンサーネットワーク間のゲートウェイとして動作する。また、P2P データポット間で協調動作を行うことによりスケラビリティを実現する。

アプリケーションは、センサーネットワークに対する要求を任意の P2P データポットに対して行う。いずれの P2P データポットも、アプリケーションからの要求を受け付けるためのゲートウェイ機構を持つ。

2.3 想定される要求

アプリケーションは、P2P データポットに対し要求を行う。このとき、アプリケーションが発行する要求としては、次のも

のが考えられる。

- 数日から数ヶ月といった長期的なセンシング要求とセンシングによって得られた結果を回収するための要求
- 現在の状態を連続的に観測するためのセンシング要求
- 蓄積されたセンシング結果やネットワーク状態の監視を行うためのシステム全体に対する要求

本システムでは、これらの要求に対応する次の4種類のクエリを定義する。ゲートウェイは、必要に応じて自身以外のデータポットと通信を行い協調動作を行う。

長期クエリ：長期クエリは、環境情報を長期に渡って観測する場合など、結果をすぐに得られないクエリに使用する。センシングによって取得されたデータは、各データポットのストレージに逐次蓄積される。

集計クエリ：集計クエリは、前述の長期クエリによって蓄積されたデータを回収する場合に使用する。集計クエリは、各データポットのストレージに蓄積された結果に対して発行され、長期クエリの実行中であっても発行が可能である。

直接クエリ：直接クエリは、クエリを発行した瞬間の状況を取得する場合、およびある瞬間以降の状況の変化を連続的に取得したい場合など、センサーネットワークから直接センシング値を取得するクエリに使用する。直接クエリによって取得された結果は、P2P データポットのストレージには蓄積されず、アプリケーションへ直接送信される。

管理クエリ：管理クエリは、マイクロストレージネットワークおよびセンサーネットワークの状態取得、実行中のクエリの一覧とクエリの停止、ストレージに蓄積された結果の一覧取得および結果の消去などの管理を行うためのクエリである。

2.4 P2P データポットの機能

P2P データポットは、前節で述べたアプリケーションからの要求を処理し、センサーネットワークに対し要求を発行する。P2P データポットとセンサーネットワークは、1:1 に対応し、センサーネットワークからのデータは、そのセンサーネットワークの基地局が接続された P2P データポットに蓄積される。また、P2P データポットは、これらの処理に必要な十分な CPU、メモリ、ストレージ資源を持っている。

P2P データポットは、アプリケーションに対しゲートウェイ機能を提供する。このゲートウェイ機能により、アプリケーションは、マイクロストレージネットワークを一つの論理的なセンサーネットワークとして扱うことができる。アプリケーションは、特定の P2P データポットに要求を発行するだけで、最終的にマイクロストレージネットワーク上のすべての P2P データポットを対象とした要求を行うことが可能であり、P2P データポットをローカルな場所に配置するだけで、それぞれの場所における人間や物の位置情報と環境情報を、インターネットを介して様々なアプリケーションから利用することが可能となる。

P2P データポットは、無線 LAN によってアドホックに相互通信し自律的にネットワーク構成を行う。また、マイクロストレージネットワーク稼働中の動的な追加と削除が可能である。現時点では、データのキャッシュや多重化は考慮していないため、不測の事態における P2P データポットの故障による当該データポットのデータ補償を行うことはできないが、そのよう

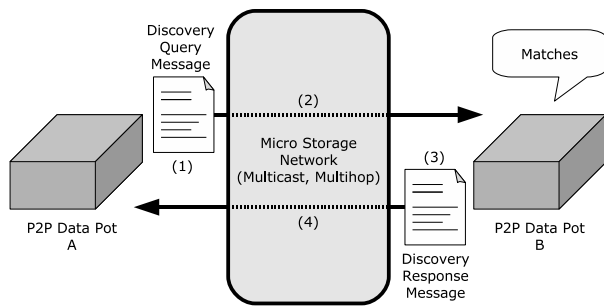


図 2 P2P データポットの探索処理

Fig.2 P2P data pot discovery process

な場合もシステム全体の動作には影響を及ぼさない。

3. P2P データポットの設計

P2P データポットは、アプリケーションが発行した要求に従い他の P2P データポットと協調動作を行う。また、それぞれの P2P データポットは、メタデータとしてネットワーク情報を保持し、要求の処理に利用する。本章ではクエリの発行、各 P2P データポットが保持するメタデータ、要求の処理について述べる。

3.1 クエリの発行

P2P データポットは、クエリを P2P ネットワーク上にアドバタイズメントとして広告する。アドバタイズメントには、クエリと対象となる P2P データポットの情報が記述されており、P2P ネットワーク上をマルチホップに伝播することで、最終的にアドバタイズメントが対象としている各ノードへと到達する。

3.1.1 P2P データポットの探索

P2P データポットの探索は、P2P ネットワーク上でのピア探索機構を利用して行う。探索の流れを図 2 に示す。まず、探索元の P2P データポット上で探索照会メッセージが生成され、P2P ネットワーク上を伝播する。探索照会メッセージには、対象となる P2P データポットを特定するための条件が含まれ、これによりデータポットの ID や位置情報などのメタデータを使用した対象の絞り込みが可能となる。探索照会メッセージを受信した P2P データポットは、その照会メッセージの要求に自身が該当する場合あるいは該当するアドバタイズメントをローカルのアドバタイズメントキャッシュに見つけた場合、該当する P2P データポットに関するピアアドバタイズメントを含む探索応答メッセージを生成し、探索元へ送信する。ピアアドバタイズメントは、P2P ネットワーク上においてピアを一意に特定するための情報を含むアドバタイズメントであり、ネットワーク上において一意的なピア ID (PID) や位置情報 (L) が含まれる。

3.1.2 アプリケーションとの通信

アプリケーションは、クエリを発行する際に既知の固定データポット (3.4 節参照) が存在しない場合、前節で述べた P2P データポットの探索を行い、発見した P2P データポットに対して接続を試みる。このとき P2P データポットは、アプリケーションとマイクロストレージネットワーク間を接続するゲートウェイとして動作する。P2P データポットをゲートウェイとして使用した場合の要求の処理を図 3 に示す。ゲートウェイと

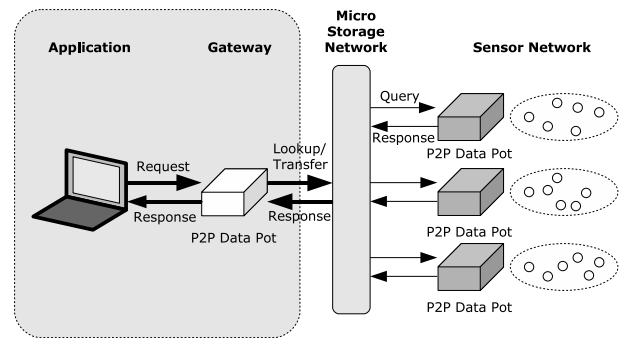


図 3 ゲートウェイ機構を使用した要求処理

Fig.3 Processing requests through a gateway mechanism

なった P2P データポットは、そのセッションが終了するまでの間、アプリケーションからの要求を処理し、マイクロストレージネットワークからの応答をアプリケーションに送信する。

3.1.3 P2P データポット間の通信

P2P データポットが他の P2P データポットに対し要求を行う場合は、アドバタイズメントとして要求を発行する。これには、不特定多数の P2P データポットを対象とする問合せを発行する場合にも、P2P ネットワーク基盤によるアドバタイズメントの転送機構を用いることができるため一括での要求伝達を容易に行えるといった利点がある。

3.2 メタデータ

P2P データポットでは、アドホック通信によって確認したネットワーク上の他の P2P データポット、自身が管理しているセンサーネットワーク上に存在するセンサーノード、各データポット上で実行されているクエリおよび蓄積されたデータに関するメタデータが必要となる。これらのメタデータは、クエリ操作において必要なデータポットおよびセンサーノードの特定、クエリの一貫性の確保、位置透過性の実現のために使用する。各データポットは以下の 3 種類のメタデータを管理する。

3.2.1 データポットテーブル

データポットテーブルは、各データポットにおいて自身および他のデータポットのメタ情報を保持するテーブルである。データポットテーブルには、データポットのピア ID ($DPID$)、位置情報 (L)、管理するセンサーノードの数 (N)、最後に応答を受信した時間 (T_{last}) が格納される。これらの情報は、クエリ発行時に対象となるデータポットを特定するために使用される。自身以外のデータポットの情報は、クエリ発行時の P2P データポット探索時およびピア情報のアドバタイズメントを受信した際に取得した情報をキャッシュとして保持する。

現時点では、データポット自身での位置測位を行っていないため、それぞれのデータポットの位置情報は文字列として保持し、管理クエリを用いてアプリケーションから設定を行う。

3.2.2 センサーノードテーブル

センサーノードテーブルは、それぞれの P2P データポットが管理するセンサーネットワークに関する情報を保持するテーブルである。センサーノードテーブルには、ノード ID (NID) とその位置情報 (L)、搭載しているセンサーの種類 (K)、最後に応答を受信した時間 (T_{last}) の対応が格納される。これらの

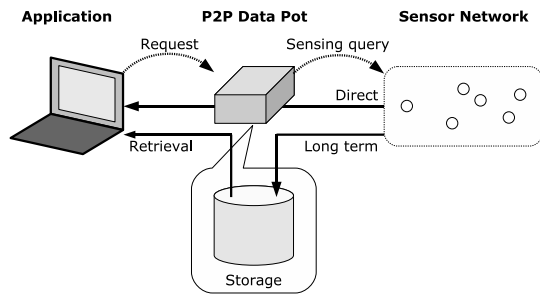


図 4 クエリの種類ごとのセンシング結果の流れ
Fig. 4 Data flow of sensing results of each query type

情報は、長期クエリや直接クエリを発行する際に、対象となるセンサーをデータポットではなくセンサーの位置情報を指定して特定する場合や位置情報を基に集約を行う場合に使用する。

3.2.3 クエリテーブル

クエリテーブルは、それぞれの P2P データポット上でこれまでに発行および蓄積された長期クエリに関する情報を保持するテーブルである。クエリテーブルには、クエリのユニーク ID (UID)、ピアグループ ID ($PGID$)、アプリケーションによって発行された長期クエリ (Q_L)、センサーネットワークに対し発行されたクエリ (Q'_L)、センサーネットワークにおけるクエリ ID (QID)、クエリの現在の状態を示すフラグ (S)、クエリを発行した時刻 (T_{start}) が格納される。これらの情報は、長期クエリが発行されるごとに追加され、それぞれのクエリの状態に従って更新される。集計クエリは、クエリテーブルから要求されたクエリを探索することにより結果テーブルを発見し、要求された問合せの実行を行う。不要となったクエリは、管理クエリによって結果テーブルとともに削除する。

3.3 クエリ処理

次に、2.3 節で挙げたクエリの種類ごとに、その処理方法について述べる。長期クエリ、集計クエリ、直接クエリのそれぞれにおけるセンサーネットワークからアプリケーションへのデータの流れを図 4 に示す。クエリの種類は、アプリケーションによって明示的に指定する。

3.3.1 長期クエリ

図 4 における Long term の流れに示される長期クエリはセンサーネットワークに対して発行するクエリであり、クエリを発行して即座に結果を得られないクエリ、もしくは結果をストレージに蓄積する必要があるクエリである。クエリの結果は、原則としてストリームデータとして連続的に対象センサーネットワークからデータポットへ送信し続けられ、明示的に期間を指定しない限り停止要求を発行するまで実行を続ける。

ゲートウェイは、アプリケーションから長期クエリ Q_L を受信すると、そのクエリを識別するためのユニーク ID である UID を生成する。また、 Q_L で特定の P2P データポットが指定されない場合および複数の P2P データポットを対象とする要求の場合、ゲートウェイは、その要求におけるユニークなピアグループ G を生成し対象をグループ化することで範囲を確定する。 G は、一意に識別可能なピアグループ ID として $PGID$ を持ち、さらに属性として UID を持つ。このため、

UID を使用して G を発見することも可能である。対象となる P2P データポットは、もし、 Q_L が位置情報などのメタデータを含む抽出条件を使用している場合、まず、その抽出条件を基に 3.1.1 節で述べた探索処理を行う。その後、データポットテーブルから検索を行い対象となる P2P データポットのピア ID (PID) を特定する。次に、対象となる P2P データポットに対し要求アダプタイズメントを送信する。要求アダプタイズメントには、 Q_L, UID, G への参加に必要な情報を含む G のアダプタイズメントが含まれる。要求アダプタイズメントを受信した P2P データポットは、ピアグループ G への参加を行う。

P2P データポットは、 Q_L からセンサーネットワークに対するクエリ Q'_L への変換を行う。その後、対象となる P2P データポットの探索を行う。もし、 Q_L がノードのメタデータを抽出条件として使用している場合、まず、ノードテーブル上でその条件を使用して検索を行い、対象となるセンサーノードのノード ID (NID) を特定する。その後、 Q_L におけるメタデータを使用した抽出条件を、 NID を指定した条件へと置換えることで、 Q'_L を生成する。さらに、センサーネットワーク上でのクエリの識別子として QID を生成し、 Q'_L に付加する。P2P データポットは、結果を蓄積するためのテーブルのスキーマを生成し、ローカルデータベース上にクエリの結果を格納する結果テーブル T の生成を行う。このとき、一つの T は必ず一つの QID に対応する。クエリの対象が複数のセンサーネットワークとなる場合、それぞれに対応するデータポット上で同様に結果テーブルが生成される。

その後、センサーネットワークに対し Q'_L を発行する。センサーネットワークは、クエリに基づいたセンシング結果を QID と共に返す。P2P データポットは、センサーネットワークからセンシング値を受信すると、その値を QID に対応する結果テーブル T に挿入する。

センサーネットワークへのクエリ発行の完了後、P2P データポットは、発行したクエリのメタ情報をクエリテーブルに保存する。このとき、クエリの実行状態を示すフラグ S と、実行開始時間 T_{start} を付加する。保存される行を R_Q とすると、 $R_Q = \langle UID, PGID, Q_L, Q'_L, QID, S, T_{start} \rangle$ となる。

要求の発行が完了するとゲートウェイは、長期クエリ発行後の返り値として UID を返す。アプリケーションは、 UID を使用することで、後に集計クエリを使用した結果の取得および管理クエリを使用した取得結果表の削除を行うことができる。

3.3.2 集計クエリ

図 4 の Retrieval の流れに示される集計クエリは、前述の長期クエリによって蓄積されたデータを集計および回収する場合に使用する。集計クエリは、各データポットのストレージに蓄積された結果に対して発行される。

ゲートウェイは、アプリケーションから受信した集計クエリ Q_R において指定された UID を持つピアグループを探索し、発見したピアグループに対し、 Q_R を送信する。ピアグループの探索は、まずローカルのクエリテーブルを UID により参照し、該当する R_Q が発見できた場合はその $PGID$ を用いる。長期クエリと集計クエリを発行したデータポットが異なる場合など、ローカルのクエリテーブルに該当する R_Q が存在しない

場合は、ピアグループ探索機構を用いて UID を属性として持つピアグループの探索を行う。

要求を受け取った P2P データポットは、それぞれの P2P データポット上のクエリテーブルから該当する R_Q を取得し、 QID から対応する結果テーブル T を特定した後、 T に対し Q_R を発行し、結果をゲートウェイへ送信する。ゲートウェイは、各 P2P データポットから受信した結果の結合を行い、アプリケーションに返す。

3.3.3 直接クエリ

直接クエリは、クエリをセンサーネットワークに対し直接送信し、その結果を P2P データポット上に蓄積せずアプリケーションに対し直接送信するクエリである。直接クエリは、瞬間的な状況を取得するためのクエリと、連続的な状況の変化を観測するためのストリームデータを取得するためのクエリに分類される。また、ストレージ機能を使用せず、単純に複数のセンサーネットワークと相互通信を行うためのゲートウェイとして使用する場合も直接クエリを使用する。

直接クエリにおけるクエリの発行は、長期クエリと同様の手続きで行われる。長期クエリと異なるのは、クエリに対応するピアグループを生成しない、センシング結果を格納する結果テーブルの生成を行わない、センサーネットワークからの応答がアプリケーションに対して直接送信される点である。P2P データポットは、センサーネットワークから応答が返されるごとに、応答をアダプタイズメントに変換し、ゲートウェイへ送信する。ゲートウェイは、応答アダプタイズメントを受け取ると結果を取り出しアプリケーションへ返す。

3.3.4 管理クエリ

管理クエリは、マイクロストレージネットワークおよびセンサーネットワークに関する動作状態の取得や、蓄積された結果の操作を行うためのクエリである。これらは、P2P データポット上に存在するメタデータへの問合せと P2P データポットおよびセンサーネットワークの制御によって実行される。管理クエリの結果は、アプリケーションに直接送信され、P2P データポット上に蓄積しない。以下に代表的な管理クエリを示す。

現在実行中のクエリ一覧の取得: P2P データポット上で現在実行中の長期クエリの一覧を取得する問合せである。このクエリは、ローカルのデータポット上でのみ実行される場合とネットワークに存在するすべての P2P データポットを対象とする場合がある。後者の場合、最初にゲートウェイからすべての P2P データポットにクエリが転送される。次に、それぞれの P2P データポット上に存在するクエリテーブルからクエリ一覧を取得し、結果を返す。この問合せにより、長期クエリの発行を行ったクライアントと集計クエリの発行を行うアプリケーションが異なる場合など、長期クエリで発行された UID が不明である場合にも既存のクエリの一覧から該当するクエリを探し、結果を取得することが可能となる。

クエリの実行を行っている P2P データポット一覧の取得: 長期クエリの UID からその問合せが実行されている P2P データポットの一覧を取得する問合せである。指定された UID がローカルのクエリテーブルに存在しない場合、最初にピアグループ探索要求を発行し、 UID を属性として持つピアグループ

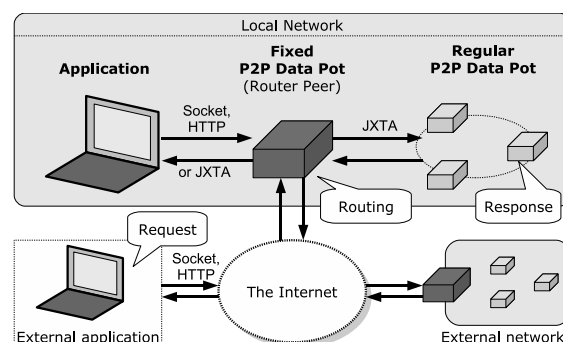


図 5 固定データポットによるネットワークルーティング
Fig.5 The fixed P2P data pot provides the network routing mechanism

ブを探索する。その後、ピア探索要求を発行し、ピアグループ内のピア一覧を取得し、結果をアプリケーションへ返す。

長期クエリの停止および結果テーブルの削除: P2P データポット上で実行中の長期クエリを停止する。対象となる P2P データポットに接続されたセンサーネットワークに対し当該クエリである QID のセンシングを停止する命令が送信され、P2P データポットにおけるセンシングデータの蓄積も停止する。このとき、当該クエリの状態フラグ S は、停止状態とマークされる。停止後も蓄積されたテーブル T とクエリテーブル上の R_Q は存在しており、この状態でも集計クエリによりデータの回収を行うことが可能である。これらの情報が不要となった場合、削除クエリを発行することでデータの削除を行いストレージ上の領域を解放することができる。削除クエリは、不要となった結果テーブル T およびクエリテーブル上の R_Q の削除を行うクエリである。

P2P データポットの状態の取得: マイクロストレージネットワークおよび P2P データポットの現在の状態を取得する。現在の状態には、P2P データポットのストレージの残容量、実行中の長期クエリ数、結果テーブル数、システムの稼働時間、最後に応答を受信した時間などの情報が含まれる。これらの情報は、データポットテーブルに対する問合せで取得するほか、必要に応じて他のクエリと同様にゲートウェイが他の P2P データポットに対して問合せを行うことで取得する。

3.4 固定データポット

P2P データポットは、相互にアドホック通信を行うことにより、柔軟なネットワーク構成および動的なデータポットの追加と削除を可能にする。しかし、ネットワークセグメントを超えて P2P データポットを利用する場合やインターネット経由で利用する場合、ネットワークアドレスを固定した P2P データポットが存在することで利便性が高まると考えられる。固定データポットを用いた通信の概要を図 5 に示す。

固定データポットは、外部ネットワークとルーティング機構を持ち、外部ネットワークからの本システムの利用を可能とする。アプリケーションと固定データポット間の通信は、ソケットあるいは HTTP で行う。

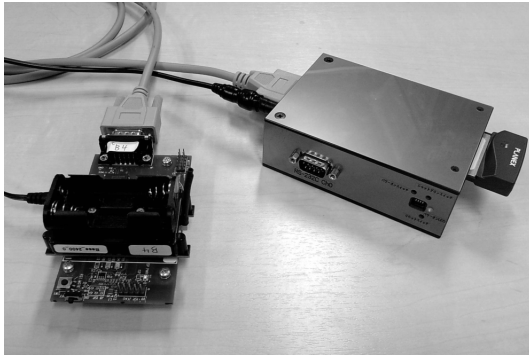


図 6 プロトタイプ実装に使用するハードウェア

Fig. 6 Hardware devices for the implementation of the prototype system

4. P2P データポットの実装

現在、本システムのプロトタイプとして、斜面防災システムでの使用を目的とした P2P データポットの実装を行っている。斜面防災システムにおいては、斜面上にセンサーネットワークを数箇所から十数箇所程度設置し、それぞれのセンサーネットワークにはそれぞれ 7 個前後のセンサーノードが設置される。本章では、現在、実装を行っているプロトタイプにおける、P2P データポットのハードウェアおよびソフトウェアについて述べる。

4.1 ハードウェア

図 6 に本システムのプロトタイプの実装対象であるマイクロサーバ (右側) とセンサーネットワークの基地局 (左側) を示す。現在、三菱電機インフォメーションテクノロジー社製のマイクロサーバ (ユビキタスコントローラ) の試作機を使用し、P2P データポットの実装を行っている。マイクロサーバは、CPU に SH4(SH7751R) 240MHz を搭載し、32MB のメインメモリと 8MB の MTD フラッシュメモリを搭載する。また、RS-232C シリアルポートとコンパクトフラッシュスロットをそれぞれ 2 基ずつ搭載する。OS は、CE Linux (kernel 2.4.20) がフラッシュメモリ上に搭載されている。ネットワーク接続は、CF 無線 LAN カードによる無線 LAN が利用可能であり、アドホックモードを用いてマイクロサーバ間の接続を行う。

P2P データポットは、センサーネットワークとマイクロストレージネットワークの 2 種類のネットワークに対し入出力を行う。センサーネットワークとの通信は、RS-232C 接続された基地局を経由して行う。基地局は IEEE802.15.4 による無線通信を用いてセンサーノード集合との通信を行う。また、P2P データポット間およびデータポットとアプリケーション間の通信は IEEE802.11b による無線 LAN アドホック接続によって行う。

4.2 ソフトウェア

本プロトタイプシステムは、Linux 上で構成し、実装を簡潔に行うため既存のソフトウェア (JXTA, PostgreSQL, TASK Server, TinyDB) を利用している。

プロトタイプシステムの構成を図 7 に示す。P2P Data Pot Core が本研究において開発を行っているコンポーネントであり、これまでに述べた P2P データポットの機能を提供してい

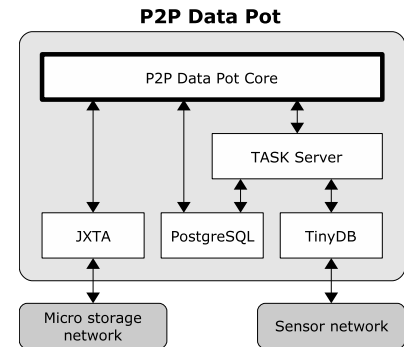


図 7 プロトタイプのソフトウェア構成

Fig. 7 Software structure of the prototype system

る。P2P 通信、データベース、センサーネットワークに対する問い合わせ機構については既存のソフトウェアを利用し、システム全体を構成している。

本プロトタイプで利用するソフトウェアは、すべて Linux 上で動作する。また、ネットワーク層に IPv6 を使用し、アドホック通信の初期化段階において Stateless address autoconfiguration [6] を使用したアドレスの自動設定を行う。

本システムでは、マイクロストレージネットワークにおける P2P ネットワーク基盤を JXTA [5] を用いて構成する。JXTA では、ピア間でのメッセージ通信をアドバタイズメントと呼ばれる XML 文書を相互に送信することによって実現している。ピアの探索要求とその応答、ピア情報、通信を行うためのパイプ情報などは、すべてアドバタイズメントとして広告され JXTA ネットワーク上を伝播する。

JXTA では、目的に応じてピアグループを定義することにより、複数のピアをグループ化することができる。本システムでは、各種クエリにおいて対象となる P2P データポットを特定する必要がある場合、適宜ピアグループの作成を行うことで対象となる P2P データポットの範囲を定義している。

JXTA では、ルータピアおよびランデブーピアを経由することで、ネットワークを越えたピア探索およびメッセージの送受信が可能である。ランデブーピアは、ネットワーク上のアドバタイズメントをキャッシュし、さらにネットワーク上の他のランデブーピアと連携することで、ピアに対してネットワーク構成に必要な情報の提供と効率化を担う。ルータピアは、マルチキャストでは到達不可能な外部のネットワークセグメントとの接続機構を提供する。本システムにおける固定データポットは、これらの機能を用いて実現している。

P2P データポットは、長期クエリによるセンシング結果と 3.2 節で述べたメタ情報を格納するストレージとして、一般的なリレーショナルデータベースの実装の PostgreSQL を用いる。

センサーネットワークにおける問合せ処理およびセンシング結果の蓄積処理は、TinyDB [3] および Tiny Application Sensor Kit (TASK) [4] を用いる。P2P データポットは、センシングを伴う要求を TASK サーバが提供するインタフェースを通じて発行する。TASK サーバは、問合せを解釈し PostgreSQL データベース上に問合せ結果を格納するためのテーブルとスキーマを生成したのち、センサーネットワークに対する要求を

TinyDB を通じて発行する．センサーネットワークから結果を受信すると，その値を生成した結果テーブルに蓄積する．

5. 斜面防災における長期観測への適用例

本章では，本システムを実装ターゲットである斜面防災システムへ適用した場合の使用例について述べる．斜面防災システムは，対象となる斜面の長期観測を行い，その結果を解析し斜面の変状を多角的に調査することで災害発生条件の解析を行い，土砂災害を予防することを目的としている．

5.1 システムの設置

斜面観測においては，まず，観測対象の斜面上に必要な数のセンサーノードと基地局が接続された P2P データポットを配置し，センサーネットワークを構成する．斜面が大きく一つのセンサーネットワークでは不足する場合，あるいは，観測対象として複数の斜面が存在する場合は，それぞれに対し同様にセンサーノード，基地局，P2P データポットを配置する．このとき，各 P2P データポット間の距離が無線 LAN における電波到達範囲（最大約 100m）を超過しないようにする．これ以上の距離が必要な場合は，市販の無線ブリッジを使用することで，電波到達範囲を拡大することができる．センサーノード，基地局，P2P データポットは，すべて無線通信を行うため通信のための配線は不要である．

5.2 システムの運用

設置後，P2P データポットは，アドホック通信により自動的にネットワークの構成を行い，設置された複数の P2P データポットによるマイクロストレージネットワークが構成される．山の麓付近にインターネットに接続されたネットワークが存在する場合，固定データポットを配置することで，インターネットからの要求も可能となる．

斜面の長期観測は，いずれかの P2P データポット（ゲートウェイ）に対し長期クエリを発行することで開始する．要求は，ゲートウェイからマイクロストレージネットワーク上に伝播し，それぞれ P2P データポットに送信される．その後，P2P データポットと接続された基地局からセンサーネットワークに対し問合せが発行され，各センサーノードは，センシングを開始する．センシングの結果は，それぞれの基地局に接続された P2P データポットに蓄積される．長期クエリの実行中も，任意の時刻に集計クエリを発行することで，途中経過を取得することが可能である．また，管理クエリによって P2P データポットの稼動状態を取得することも可能である．クエリ発行時に設定した観測期間が終了しセンシングデータの回収を行う際も，いずれかの P2P データポットに集計クエリを発行することで，すべての結果を取得することができる．

6. 関連研究

TSAR [1] はデータの 2 層構造による管理手法を提案しており，ローカルに保持するセンサーデータと分散管理を行うメタデータとを分離して管理している．メタデータの分散インデックス構造は値による問い合わせおよび時空間問い合わせの双方を効率よく実現している．TSAR ではセンシングデータ自体は各センサーノード上に格納され，そのメタデータのみがプロキ

シとして動作するサーバ群に分散して格納される．これに対し，本研究ではマイクロサーバである P2P データポットにセンシングデータを格納するアーキテクチャを採用しており，データポット上に格納されたデータのキャッシングやレプリケーションを行うことによって耐障害性の向上が可能であると考えている．

GSN [2] は様々なセンサーネットワークプラットフォーム間の違いを吸収し抽象化・仮想化するミドルウェアを提供することによってセンサーネットワークシステム構築を容易にすることを目的としている．機能としては分散問い合わせ，フィルタリング，センサーデータの統合，運用中の動的なシステム構成の変更などを提供する．GSN では異種センサーの抽象化・仮想化の手法を主に議論している．一方，本研究では主にセンサーネットワーク，P2P データポット，クライアントアプリケーション間での問い合わせの処理の手法について議論しており，取り扱うセンサー数がより大きくなった場合のスケーラビリティの実現の面により重点を置いている．

7. おわりに

本論文では，センサーネットワーク向け分散型マイクロストレージである P2P データポットの構成とプロトタイプの実装および斜面防災システムへの適用例について述べた．P2P データポットは，無線アドホック通信上での P2P による自律的なネットワーク構成とアプリケーションに対するゲートウェイ機構の実装により，位置透過性，リアルタイム性，スケーラビリティを実現し，センシングデータの可搬性の向上と回収コストの低減により，センサーネットワークの適用範囲の拡大が期待される．今後は，実装中のプロトタイプの完成後，動作についての評価を行う予定である．また，蓄積データのキャッシングおよび冗長化についても検討と実装を行っていく予定である．さらに，移動体センシングにおいて，P2P データポット自体が移動する場合の検討も行っていく．

文 献

- [1] Desnoyers, P., Ganesan, D., and Shenoy, P.: TSAR: A Two Tier Sensor Storage Architecture Using Interval Skip Graphs. In Proceedings of the 3rd international Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '05), pp.39-50, Nov. 2005.
- [2] Aberer, K., Hauswirth, M., and Salehi, A. 2006.: A Middleware for Fast and Flexible Sensor Network Deployment. In Proceedings of the 32nd international Conference on Very Large Data Bases (VLDB2006), pp.1199-1202, Sep. 2006.
- [3] Madden, S.R., Franklin, M.J., Hellerstein, J.M., Hong, W.: TinyDB: an acquisitional query processing system for sensor networks, ACM Transactions on Database Systems (TODS), 2005.
- [4] P. Buonadonna, D. Gay, J. M. Hellerstein, W. Hong, and S. Madden. TASK: Sensor Network in a Box. In Proceedings of the Second IEEE European Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, pp. 133-144, 2005.
- [5] Gong, L.: JXTA: A Network Programming Environment, IEEE Internet Computing, 2001.
- [6] Thomson, S. and Narten, T.: IPv6 stateless address auto-configuration. RFC 2462, IETF, Dec. 1998.