

センサネットワーク向け協調ストレージシステムにおける データ管理方式

横田 裕介[†] 陶山 優一^{††} 大久保英嗣[†]

[†] 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

^{††} 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

E-mail: [†]{yyokota@cs.ritsumei.ac.jp, okubo@is.ritsumei.ac.jp}, ^{††}suyama@sol.cs.ritsumei.ac.jp

あらまし センサネットワークの制御およびセンサネットワークによって収集されたデータの管理を行う，P2P ネットワークを用いた協調ストレージシステムのデータ管理手法について述べる．屋外においてセンサネットワークを用いてセンシングを行う場合，既設の有線ネットワークが存在せず，インターネット等の外部ネットワークへの接続が断続的になる場合がある．また，天候等の要因によって機器が故障する確率も高くなる．このような制約の厳しい環境下で，広範囲にセンシングを行い，できる限りセンサデータを失うことなく，また効率的に外部アプリケーションに対してデータを提供することを可能にするためのメタデータ管理および問い合わせ処理について述べる．

キーワード センサネットワーク，P2P，レプリケーション，問い合わせ処理，メタデータ

A Data Management Method of a Cooperative Storage System for Sensor Networks

Yusuke YOKOTA[†], Yuichi SUYAMA^{††}, and Eiji OKUBO[†]

[†] College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University 1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga 525-8577 Japan

^{††} Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University 1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga 525-8577 Japan

E-mail: [†]{yyokota@cs.ritsumei.ac.jp, okubo@is.ritsumei.ac.jp}, ^{††}suyama@sol.cs.ritsumei.ac.jp

Abstract In this paper, we will describe a data management method of a cooperative storage system using a P2P network mechanism that controls sensor networks and manages collected sensor data. When we collect sensor data outside using sensor networks, there is often no existing wired network, only intermittent connections to external networks such as Internet exist, or failure rates of devices become high because of weather conditions. A meta data management and query processing to provide external applications with data effectively, realize wide range sensing, and avoid data loss under such severe conditions are described.

Key words sensor network, P2P, replication, query processing, meta data

1. はじめに

小型無線センサノードによるセンサネットワークを用いたシステムは，近年試験的な利用から実際の利用へとその利用の場面を移しつつある．センサネットワークの適用が期待される分野の一つとして，屋外環境で運用される防災システムが挙げられる．従来の防災システムでは，センサを有線でロガーに接続し，このロガーに保存されたセンシングデータを定期的人間が回収するといった運用形態が多く取られてきた．このような環境に無線センサネットワークを導入することにより，設置の

容易さ，システム構成の柔軟性，耐障害性，高いメンテナンス性，無人化などを実現し，さらに計算機システムと連携させた高度な分析や予測が可能になる．そのためには，単に無線センサネットワークを導入するだけではなく，センサネットワークから収集したデータを保存・管理し，外部システムに対して提供するためのストレージシステムが重要な役割を持つ．

現在我々は，P2P データポットと呼ぶ，協調ストレージシステムの開発を進めている [1], [2]．これは，複数台のデータポット（マイクロストレージサーバ）間で無線 LAN によるアドホック接続を行い，この上に P2P ネットワークを構築し，複数の

ストレージが協調してセンシングデータを管理するシステムである。1 台のデータポットは基本的に 1 つのセンサネットワークと接続され、収集したデータをリレーショナルデータとしてローカルストレージに保管し、また必要に応じて他のデータポットとの間でレプリケーションを行う。

P2P データポットは屋内・屋外のいずれの環境においても利用可能なシステムを目指しており、屋外において既設の有線ネットワークが存在しないような状況においても、自律的にネットワークを構成して動作する。また、インターネット等の外部ネットワークとの接続が断続的な状況においても、過去のセンシングデータを失うことのないようデータ管理を行う。さらに、屋外での運用時は機器の故障の確率が高くなるが、そのような場合を想定したレプリケーションを行うことによって、データの耐障害性を高めている。

P2P データポットは、P2P ネットワーク上でストリームデータとしてのセンシングデータと、リレーショナルデータとしてのセンシングデータとを統合して管理するシステムということができる。また、利用者に対しては、P2P ネットワーク全体を一つのデータベースと見なし、システム内部の状態を意識することなく、統一的な問い合わせによって、適切なデータを提供することを目的としている。

本稿では、このようなシステムを実現するためのメタデータ管理および問い合わせ処理について述べる。

以降、2 章で P2P データポットシステムの構成について述べ、3 章ではセンサネットワークに対する問い合わせにおける課題について検討する。4 章では P2P ネットワーク上での問い合わせ処理を支援するために必要となるメタデータについて述べる。5 章ではこれまでの内容をふまえた上で P2P データポットにおける問い合わせ処理について述べる。6 章ではいくつかの関連研究について述べ、最後に 7 章で本稿のまとめを行う。

2. P2P データポットのシステム構成

2.1 概要

P2P データポットシステムの概要を図 1 に示す。各データポットは無線 LAN を用いてアドホックネットワークを構成するため、設置時のネットワーク設定作業は不要である。また、アドホックネットワーク上に自動的に P2P ネットワークを構築し、メタデータの共有を開始する。このメタデータによって、どのデータポットがどのようなデータを管理するかを知ることができる。外部アプリケーションは任意のデータポットに接続し、P2P データポットシステム全体を仮想的な一つのデータベースと見なし問い合わせを発行する。外部アプリケーションからの問い合わせを受け取ったデータポットは、以後その問い合わせに対する結果をすべて外部アプリケーションに送信し終わるまで、この問い合わせの処理に関する責任を持ち、問い合わせの分解や最適化、結果の統合等の処理を行う。分解された問い合わせは対象となるセンサネットワークを管理する各データポットへ転送される。転送された問い合わせを受け取ったデータポットは、自身が管理するセンサネットワークの仕様に合わせて問い合わせを適切に変換し、発行する。センサネットワー

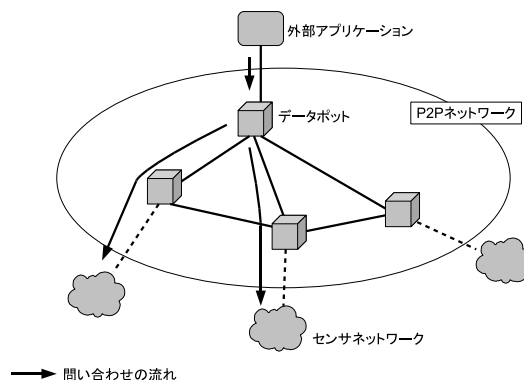


図 1 P2P データポットシステム

Fig. 1 P2P Data Pot System

クから受け取った結果は、問い合わせ発行元のデータポットへ送信する。

2.2 P2P ネットワークによる可用性の向上

屋外においてセンサネットワークを用いた環境観測システムを構築する場合、運用面に関して考慮すべき事項として、導入の容易さ、故障発生時の可用性の確保、動的なシステムの構成変化への対応が挙げられる。P2P ネットワークの仕組みを導入することによって、P2P データポットはこれらの要求に対処している。以下、各項目の対処法について述べる。

a) 導入の容易さ

屋外環境下でシステムの設置を行う場合、導入が容易であることは非常に重要である。現場において、ネットワーク設定などの複雑な作業を行うことは難しいことが多い。また、システムの導入を行う者が、情報システムの専門家ではなく、センサネットワークを利用する応用分野の専門家であることも多い。そのため、導入作業としては、機器を設置し、電源を投入するだけで動作を開始し、自律的に近隣のデータポットとの間でネットワークを構築することが望ましい。これは、運用中に発生するメンテナンス作業の場面でも同様である。

b) 故障発生時の可用性の確保

屋外でシステムを運用する場合、機器の故障の発生は避けられないものと考えられる。システムを構成するデータポットの一部が故障した場合においても、残りのデータポットによって、システムを停止することなくサービスの質の低下を最小限に抑えることが望ましい。そこで、P2P データポットでは、各データポットが持つ役割を等しくし、どのデータポットも外部からのサービス要求を受け入れ、その要求を適切なデータポットに回送するようにしている。これによって、あるデータポットが故障した場合、そのデータポットに接続されたセンサネットワークからのデータ取得が停止する以外は、システム全体が停止することなく継続的にサービスを提供することを可能にしている。また、後述するレプリケーションによって、データ取得が停止したセンサネットワークに関しても、過去のデータの取得はできるようにしている。また、運用中に故障の発生によってネットワークの構成要素の増減が発生した場合も動的にネットワークトポロジを再構成するようにしている。

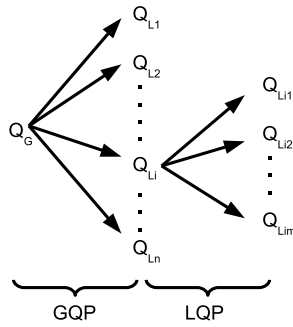


図 2 問い合わせの階層
Fig. 2 Hierarchy of Queries

c) 動的なシステムの構成変化への対応

運用計画の変更や、観測区域の追加・減少などの要求によって、現在稼働中のセンサネットワークシステムの構成変更が必要となる場面は多い。このような場合においても継続的な観測を行うために、システムを停止することなく柔軟に構成を変更することが要求される。このためには、ネットワークボロジを自律的に再構成する機能のほか、新たに追加されたデータポットおよびそれに接続されたセンサネットワークに関する情報（メタデータ）を他のデータポットにアナウンスし、共有する機能が必要となる。

2.3 問い合わせ処理機構

P2P データポットにおける問い合わせ処理機構は、Global Query Processor(GQP) と Local Query Processor(LQP) の 2 種類に分けられる [4]。前者はシステム全体を一つのデータベースと見なした問い合わせを処理し、後者は一つのセンサネットワークに対する問い合わせを処理する。

a) GQP

利用者からの問い合わせを受け取り、問い合わせ内容を適切に分解・変形し、対象となるセンサネットワークを管理するデータポット群に送信する。また、各データポットから返ってきた結果を、元の問い合わせに合わせて統合した上で利用者に返す。また、現在実行中の問い合わせ群の管理を行い、複数の問い合わせが実行される場合、問い合わせ間での最適化処理を行う。

b) LQP

GQP から受け取った問い合わせをセンサネットワークに発行し、返ってきた結果を GQP に送信する。また、同一センサネットワークに対して複数の問い合わせが発行された場合は、最適化を行う。

このように問い合わせが階層的に処理されるため、利用者から発行された問い合わせ (Q_G)、GQP により分解・変形・共有された問い合わせ (Q_{Li})、LQP により分解・変形・共有された問い合わせ (Q_{Lij}) は図 2 のように依存関係を持った階層を構成する。GQP, LQP による問い合わせの最適化処理は現在実行中の問い合わせを含めて行われるため、この階層構造はシステム実行期間中、常に書き換え続けられる。また、実行中の問い合わせを停止する場合、他の実行中の問い合わせに影響が出ないよう、階層構造の末端より順に停止操作を行う必要がある。

2.4 レプリケーション

屋外環境下でセンサネットワークシステムを運用する場合、室内での運用の場合と比較して、機器の故障の確率が飛躍的に高くなる。防災システムへの応用を考えた場合、予測の対象である災害そのものによって機器が故障する可能性もある。そのため、負荷分散だけでなく、システムの耐障害性を高める上でも、センシングデータのレプリケーションの実施が重要となる。P2P データポットにおいては、収集されたセンシングデータからデータポット自身の危険性を算出し、同時に故障する確率が最も低いと考えられるデータポットをレプリケーション先として選出する方式を提供する [3]。

3. センサネットワークに対する問い合わせ

本章では、センサネットワークのための問い合わせ機構の設計課題について検討を行う。

3.1 ストリーム情報源としてのセンサネットワーク

ストリーム情報源としてのセンサネットワークは、次のような特徴を持つ。

- センシング動作・データ送信動作の制御が可能

センサネットワークを構成するセンサノードは動作の制御を行うことが可能である。したがって、必要なときのみセンシング動作を行い、それ以外の時は休止させることができる。また、ノードが複数種類のセンサを持つ場合、必要なセンサのみを用いるように指定したり、サンプリング間隔を状況に応じて動的に変化させることもできる。

- 省電力の重要性

バッテリー動作するセンサノードは、できる限り動作時間を長くするため、電力の消費を抑えることが極めて重要な課題となる。したがって、状況に応じたセンサノードの動作制御を積極的に行うことによって省電力化を図る必要がある。

これらの特徴は、一般的なストリーム情報源のモデルにおいてはあまり検討されてきていない。センサネットワークに対する問い合わせ機構を設計する場合、問い合わせ発行によってデータ取得とセンサノードの動作制御という二種類の要求を実現する必要がある。

3.2 複数の問い合わせに対する最適化

ストリームデータ処理に関する研究では、到着したデータに対する処理に着目した最適化に関する議論が主に行われてきたが、センサネットワークを対象とする場合はセンサノードの制御に着目した最適化も含めて検討する必要がある。例えば、センサノードが仕様上同時に一つの問い合わせ要求しか受け付けられない場合は、複数の問い合わせ要求を事前に合成し、一つの問い合わせにまとめてからセンサノードに対して発行する必要がある。また、現在実行中の問い合わせとこれから実行する問い合わせの内容や実行対象範囲に包含関係や共通部分が存在する場合、問い合わせの合成による最適化が必要となる。

このような問い合わせの合成を行った場合、問い合わせの結果を適切に分解し、それぞれの問い合わせ発行元に送信する仕組みも必要となる。

3.3 異種センサ混在型センサネットワーク

従来のセンサネットワークシステムでは、一つのセンサネットワークを構成するセンサノードは均質、すなわち同じセンシング能力を持つことを前提としている場合が多く、この前提に基づく様々な省電力化手法が検討されてきている。しかし、実際の応用の場面においては、一つのセンサネットワーク内に複数種類の異なるセンサを持つノードを混在させて観測を行いたいという要求がある場合が多い。このような状況下では、従来検討されてきた、センサノードの均質性を前提とした省電力化手法の有効性が下がる反面、ノードごとの役割分担による、より高度なセンシングを行うことが可能になる。このような異種センサ混在型センサネットワークに対しては、全ノードに同一の問い合わせを送るだけではなく、特定の種類のセンサを持つノードにのみ問い合わせを送信するような、より粒度の細かい問い合わせを記述できるようにする必要がある。

4. メタデータ管理

P2P データポットでは、利用者から発行された問い合わせを適切に解釈し、対象となるデータポットへ送信するためにいくつかのメタデータを管理する必要がある。以下に述べるメタデータ情報は、P2P ネットワーク上で検索可能な情報として共有される。これらの情報を用いて、各データポットは問い合わせ送信対象となるデータポットの決定、および問い合わせの共有や最適化処理を行う。

4.1 センサネットワークの管理

一つのセンサネットワークのデータは一つのテーブルに格納されるものとする。したがって、各データポットには少なくとも一つ、自身に接続されたセンサネットワークのデータを格納するためのテーブルが存在する。あるセンサネットワークへの問い合わせを行うということは、そのセンサネットワークから直接データを受け取ることか、もしくはそのセンサネットワークの過去のセンシングデータを記録しているテーブルのデータを受け取ることのいずれかに相当する。

各センサネットワークには、識別のための固有の ID (SID) が付けられる。このセンサネットワークを直接管理するデータポットの ID を PID とする。また、利用者がセンサネットワークを識別する際に用いるための固有の識別名 (SN)、およびいくつかのセンサネットワークをグループ化するためのグループ名 (GN_i) を付けることができる。このほか、位置情報に基づいた問い合わせを行うための、センサネットワークの位置情報 (緯度 LOC_{lat} ・経度 LOC_{lng}) を持たせることができる。さらに、このセンサネットワークのデータのレプリケーションを行っているデータポットの ID を $RPID_i$ とすると、一つのセンサネットワークに関する情報は下記のように記述される。

$$(SID, PID, SN, GN_1, GN_2, \dots, GN_n, LOC_{lat}, LOC_{lng}, RPID_1, RPID_2, \dots, RPID_m)$$

この情報を P2P ネットワーク上で検索することによって、GQP は問い合わせを送信する適切なデータポットを特定することができる。利用者は、問い合わせ対象の指定方法として、

センサネットワークに付けられた固有な・グループ名・センサネットワークの位置情報のいずれかを利用することができる。GQP では、問い合わせ対象となるデータポットを特定したあと、必要に応じて実際の問い合わせ送信先をそのレプリケーションに変更することができる。

4.2 問い合わせの管理

LQP における問い合わせ処理は、当該データポット上で閉じたものになる。すなわち、あるデータポット上の LQP で処理される問い合わせは、他のデータポット上の LQP で処理される問い合わせに対して影響を与えない。

一方、GQP で処理される問い合わせについては、メタデータとしてシステム全体で情報を共有する必要がある。これは、あるデータポット上の GQP での問い合わせの処理や最適化が、他のデータポット上の GQP で実行中の問い合わせに影響する場合があるためである。簡単な例としては、すでに他のデータポット上の GQP で実行されている問い合わせと全く同じ内容の問い合わせの要求を受けた場合、問い合わせの結果を共有すればよいという状況が挙げられる。

共有対象となる問い合わせ情報は、2.3 で述べた問い合わせのうち、利用者から発行された問い合わせ (Q_G) と GQP により分解・変形・共有された問い合わせ (Q_{Li}) の 2 種類となる。問い合わせに関する情報は下記のように記述される。

$$(QID, PID, Q_{dscr}, PQID, Q_{type})$$

QID は各問い合わせに対して与えられるシステム全体で固有の ID である。また、 PID はその問い合わせを処理する GQP を持つデータポットの ID、 Q_{dscr} は問い合わせの具体的な記述内容、 $PQID$ は問い合わせの依存関係グラフ (図 2) において、この問い合わせの親となる問い合わせの ID であり、問い合わせが Q_G の場合は省略される。 Q_{type} は次の章で述べる、問い合わせの種類を示す。GQP は問い合わせを処理する際に、この情報を検索し、問い合わせの共有や最適化を行う。

5. 問い合わせ処理

本章では、これまで述べたシステムの構成およびメタデータ管理方式をふまえた上で、P2P データポットにおける問い合わせ処理の方法について述べる。

5.1 問い合わせの種類

P2P データポットでは、センシングに関わる問い合わせとして次の 3 種類のものがある。4.2 で挙げた Q_{type} には、これらの問い合わせの種別を記述する。

a) 長期クエリ

センサネットワークに対しセンシング方法を指示し、また、その結果を対応するデータポットのストレージに記録することを指示する。問い合わせを発行した利用者には直接データは返ってこない。長期にわたる観測を開始する際にセンシングデータをすぐに処理する必要がない場合や、すぐには結果が得られないことが分かっている場合などに用いる。通常、次の集計クエリと合わせて利用する。

b) 集計クエリ

長期クエリによってデータポット上に記録されたセンシングデータを取得する．センサネットワークに対する制御は行わないため、センサネットワークの動作に対しては全く影響を与えない．

c) 直接クエリ

センサネットワークに対しセンシング方法を指示し、その結果をストリームデータとして直接受け取る．データポットのストレージへの記録は行わない．

このほか、長期クエリと直接クエリを合成した問い合わせが存在する．

長期クエリはセンサネットワークに対する制御のみを行い、結果が返ってこない問い合わせ、集計クエリは通常の関係データベースにおける問い合わせと同じもの、直接クエリはセンサネットワークに対する制御を行い、ストリームデータをリアルタイムに受け取るための問い合わせと分類することができる．したがって、センサネットワークの制御の最適化、およびストリームデータ取得の最適化を検討する場合は、長期クエリと直接クエリのみがその対象となる．

5.2 問い合わせの分解と共有

長期クエリと直接クエリは、その処理の過程において、分解と共有が行われる．利用者は、SQL に基づいた文法を用いて問い合わせを記述することができる．利用者が発行した問い合わせは、GQP において個々のデータポットに対する複数の問い合わせに分解され、各データポット上の LQP に送信される．LQP においても同様に、必要に応じて問い合わせの分解を行った上で、センサネットワークに対し問い合わせを発行する．

問い合わせ対象を指定する方法としては、緯度・経度を用いた範囲指定、センサネットワークの名称の指定、センサネットワークグループの名称の指定、センサ種別の指定が挙げられる．最初の三つについては、GQP が 4.1 で述べたメタデータを取得することにより、対象となるデータポット群を特定することができる．これによって GQP は問い合わせを個々のデータポット用の問い合わせに分解する．次にこの分解した問い合わせを 4.2 で述べたメタデータを用いて現在実行中の他の問い合わせと比較することにより、必要に応じて問い合わせの共有を行う．

最後のセンサ種別については、GQP では処理を行わず、そのままセンサ種別指定記述を含めて LQP に渡す．これは、個々のセンサネットワークの内部の仕様や構成情報についてはそのセンサネットワークを管理するデータポットのみが把握すればよいものとし、システム全体で共有する管理情報量の増大を抑制するためである．すなわち、センサネットワークの構成情報を知っているのは LQP のみで、GQP は関知しないことになる．

5.3 結果の統合

ストリームデータを取得する直接クエリにおいては、階層構造に沿った問い合わせ結果の統合処理が必要になる．

直接クエリの結果は、センサネットワークから LQP へ、LQP から GQP へ、GQP から外部アプリケーション、すなわち利用者へと送信される．個々の結果は特定の問い合わせに対応し

ているので、図 2 に示される問い合わせの階層に基づき、末端の問い合わせから根となる問い合わせまで、順に結果を統合しながら送信を行う．

5.4 問い合わせのルーティング

集計クエリはデータポットの関係データベース上に記録されたセンシングデータを取得する．直接クエリの場合と異なり、レプリケーションによって同じ結果を保持する情報源が複数存在する可能性がある．そのため、4.1 で述べたメタデータを用いて対象となるセンサネットワークを特定した後、そのセンサネットワークのデータを保持するデータポット群 (マスタおよびレプリカ) を求める必要がある．複数の問い合わせ候補が求められた場合、それぞれについて以下の項目に関して評価を行い、最も適したデータポットに対して問い合わせを送信する．

- (1) 候補となるデータポットが稼働しているか否か
- (2) 候補データポットの負荷
- (3) 候補データポットまでのネットワーク上の距離

6. 関連研究

本章では、いくつかの関連研究について述べる．

TinyDB [7] は、センサネットワークを一つのテーブルとみなし、ホストから問い合わせを発行することでセンサノードの制御およびセンシングデータの収集を行うシステムである．本研究におけるセンサネットワークに対する問い合わせ、すなわち LQP から発行される問い合わせは TinyDB で提案されたモデルに基づくことを想定している．一方、本研究における GQP で扱われる、複数のセンサネットワークを対象とした問い合わせ処理については、TinyDB では取り扱う対象とはしていない．

Harmonica [6] は、ストリームデータと通常のリレーショナルデータを統合して扱うシステムであり、この点では本研究と同じ目的を持っている．Harmonica において想定するストリーム情報源は一般的な情報源であり、基本的にあらかじめ決まったパターンでストリームデータが送信されてくることを想定しているが、本研究においては、情報源であるセンサネットワークは問い合わせを発行して初めてストリームデータを発行し始めるという特徴があり、問い合わせ対象の絞り込みやセンサノードの制御なども問い合わせ処理において考慮する事項となっている点でシステムが持つ最終的な目標に大きな違いが出てきている．

GSN [8] は、複数のセンサネットワークを P2P ネットワーク上で統合するシステムであり、本研究のシステム構成と類似している．GSN は Virtual Sensor と呼ばれる抽象化機構を一番の特徴としており、様々な異なる種類のセンサを統一的に扱うための手法を提供している．本研究では屋外環境での運用に対応するために、分散管理によって耐障害性を持たせているが、GSN ではそのような場面を想定したアーキテクチャとはなっていない．

7. ま と め

本稿では、センサネットワークを実際に屋外で応用システムに適用する場面を想定し、既存の設備が少なく、また外的要因

による故障の可能性が高い環境下での安定した運用を実現するための、センシングデータ向け協調ストレージシステムである P2P データポットについて述べた。P2P データポットは無線アドホックネットワーク上に P2P ネットワークを構築し、各データポットが保持する関係データベースを協調して管理するシステムである。本稿では特に、センサネットワークに対する問い合わせにおける課題、P2P ネットワーク上での問い合わせ処理を支援するためのメタデータ管理、および階層構造に基づく問い合わせ処理手法について述べた。P2P データポットは、現在 JXTA と PostgreSQL を用いて実装したプロトタイプシステムが稼働している。今後は、このプロトタイプシステムに本稿で述べた問い合わせ処理機構を追加し、動作の検証を行う予定である。

文 献

- [1] 藤崎 友樹, 鈴木 和久, 横田 裕介, 大久保 英嗣: P2P データポット: センサ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, 電子情報通信学会 第 18 回データ工学ワークショップ, DEWS2007 D1-1 (2007)
- [2] 藤崎 友樹, 鈴木 和久, 横田 裕介, 大久保 英嗣: 無線アドホック通信を利用したセンサネットワーク向け協調ストレージシステム, 情報処理学会研究報告, 2008-MBL-44/2008-UBI-17, pp. 149-156 (2008).
- [3] 陶山優一, 藤崎友樹, 鈴木和久, 横田裕介, 大久保英嗣: 斜面防災システムにおける耐障害性を考慮した P2P レプリケーション手法, 情報処理学会第 70 回全国大会, 第 3 分冊, 3T-1, 2008 年 3 月.
- [4] 横田 裕介, 大久保 英嗣: 広域に分散したセンサネットワーク群に対する問い合わせ処理機構, 情報処理学会第 70 回全国大会, 第 3 分冊, 3E-1, 2008 年 3 月.
- [5] Reiss, F. and Hellerstein, J. M. Declarative Network Monitoring with an Underprovisioned Query Processor. In Proceedings of the 22nd international Conference on Data Engineering (ICDE'06), 2006.
- [6] 山田真一, 渡辺陽介, 北川博之, 天笠俊之, 「データストリーム管理システム Harmonica の設計と実装」情報処理学会論文誌: データベース, Vol.48, No.SIG14 (TOD35), pp. 91-106, 2007 年 9 月.
- [7] 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.
- [8] Aberer, K., Hauswirth, M. and Salehi, A.: Infrastructure for data processing in large-scale interconnected sensor networks, Mobile Data Management (MDM), Germany (2007).