

広域大規模センサネットワークにおける センサ観測値可視化システムの提案

四之宮 潤^{†1} 石 芳正^{†1} 寺西 裕一^{†2,†1}
春本 要^{†1} 西尾 章治郎^{†1}

広域に大量かつ高密度でセンサが配置されている環境において、センサから得られる観測値情報に基づいて、指定した等値線幅で等値線図を取得する地理情報システムを提案する。想定する環境では、非常に高密度でセンサが配置されるため、等値線図を再現するために全てのセンサ観測値を収集した場合、ストレージコスト面およびネットワークトラフィック面から見て現実的でない。そこで、提案するシステムでは、各センサを P2P ネットワークによって相互接続し、P2P ネットワーク上で空間補間に適したセンサ観測値のみを収集することで、効率的に等値線図再現に必要なセンサ観測値を収集する。また、情報収集対象となるセンサ観測値を収集する際に生じるピア間のメッセージ通信状況を把握するために、メッセージ通信を可視化して表示する。

A Proposal of Visualization System for Sensor Data on Widely Distributed Sensor Network

JUN SHINOMIYA,^{†1} YOSHIMASA ISHI,^{†1}
YUUCHI TERANISHI,^{†2,†1} KANAME HARUMOTO^{†1}
and SHOJIRO NISHIO^{†1}

We propose a visualization system that enable to reconstruct a contour lines map with requested contour interval in the environment where a huge amount of sensors are deployed with high density. In the assumed environment, it isn't realistic in the viewpoint of storage costs and network traffic to collect all sensor data for reconstructing contour lines maps since sensors are densely distributed. So, in the proposed system, sensors are mutually connected by peer-to-peer network and sensor data are collected efficiently by collecting only sensor data which suitable for spatial interpolation. And it visualizes communication messages between peers for the purpose of grasping the situation of communication messages which come about in collecting target sensor data.

1. はじめに

近年、実世界のリアルタイムの状況を観測可能とするセンサを至る所に配備し、世界規模のセンサネットワークを構築することで、コンテキストウェアサービスやユビキタスサービスなどの情報サービスを実現させようとする動きが活発になっている。こうした環境では、各種機関により組織的に設置されるセンサ、個人が設置するセンサ、情報家電に内蔵されるセンサなど、膨大な数のセンサが広域にわたって設置されることが考えられ、これらセンサからデータを収集し活用することができれば、従来以上の詳細な情報を利用可能となる。しかし、既存するプロジェクトやサービスの多くは、サーバベースで集中的にセンサデータを管理しているため、膨大な数のセンサが広域にわたって設置される場合、スケラビリティの観点から全てのセンサデータを一カ所に集約するコストは非常に高い。また、通常センサから発生するデータは、時間的に連続したストリームデータであり、利用価値があるか分からないデータを含め、全てを一つのサーバやサーバサイトに集約することは無駄なネットワークトラフィックとなりかねない。そこで、提案するシステムでは、こうした問題に対処するために、センサやセンサデータを蓄積した端末（ピア）を相互接続し、協調してデータの共有や検索ができる P2P アーキテクチャによりセンサ情報を分散管理する。

広域にわたり配備されたセンサを活用する上では、センサが観測対象とする実世界の事象の正確な空間的分布を得られる必要がある。すなわち、センサ観測値に基づく地理的な観測値分布を得られる必要がある。観測値分布としては、同じ意味とみなす観測値の範囲を等値線によって区切った等値線図が得られれば、目的に応じた空間的な領域の分類や、値の変化の状況の把握をする上では十分となる場合が多い。よって、本提案システムでは、アプリケーションが指定した等値線幅に応じて、正確に等値線図を再現できることを目指す。一般に、離散的な観測点を持つセンサ情報の集合から観測領域全体の観測値分布を再現するには空間補間手法が用いられる。センサが膨大かつ密に配備された環境では、観測値分布を得るために単純に対象領域における全てのセンサからデータを収集すると、地理的な観測値の変化がゆるやかな場合には、空間補間に必要となる観測値情報は少ないため得られる情報の多

^{†1} 大阪大学

Osaka University

^{†2} 独立行政法人 情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications Technology

くが無駄となる。収集するセンサ観測値を確率的に選択することで地理的に一様にセンサ観測値を収集する階層化ドローンオーバーレイネットワーク (HDOV)¹⁾が提案されているが、この方法は確率的にセンサ観測値を選択するため、空間における特徴点を取りこぼす可能性がある。そこで我々はこれまで、HDOVを拡張することで、空間補間に必要なセンサ観測値を収集することで特徴点を取りこぼすことなく把握可能なHDA-SN³⁾、システムの制約の範疇でユーザの要求に応じたセンサ観測値を収集可能なHDA-RC⁴⁾を提案してきた。

提案システムでは、構造化オーバーレイネットワークとエージェント機構を組み込んだフレームワークであるPIAX⁵⁾を用いてシステムを構築する。PIAX Overlay NetworkとしてHDOVを構築した上でHDA-SNおよびHDA-RCを実装し、地図上にセンサデータを補間して表示するサービスおよびピア間の通信を可視化するサービスを構築した。通信の可視化は、システム管理者向けインターフェースとして必要な機能であり、ピア間の通信を可視化することで、ネットワーク内で発生するメッセージ発生箇所およびメッセージ量を容易に把握することができる。また、提案するセンサ観測値収集手法がネットワークトラヒックの抑制の面でどの程度有効かを示す。本システムの実装に当たっては、利用者とのインターフェースにはWebブラウザを利用し、Google Maps APIによる地図描画に加えて、Canvasによる通信の可視化、WebSocketによるWebサーバからWebブラウザへのリアルタイム通知をJavaScriptを用いて記述している。

2. 広域センサネットワークにおけるセンサ観測値収集手法

提案システムではPIAX Overlay NetworkとしてHDOVを構築する。その上で、センサ観測値収集手法として、HDA-SN、HDA-RCを実装する。以下では、それぞれのセンサ観測値収集手法について説明する。

2.1 HDOV

階層化ドローンオーバーレイネットワーク (HDOV: Hierarchical Delaunay Overlay Network) は、広域に大量に分布するセンサから複数の粒度で地理的に一様にセンサ観測値を収集可能としている。HDOVでは、周囲のピアの分布状況を調査することなく領域全体においてピアの分布が地理的に一様で、かつ、指定される粒度で複数に階層化されたドローンオーバーレイネットワーク²⁾を構築する。ドローンオーバーレイネットワークは、リンク構造が計算幾何学のドローン三角形分割となる。ドローン三角形分割は、ボロノイ領域分割と双対な関係にあり、各ピアの縄張り領域としてボロノイ領域と呼ばれる領域を定義できる。HDOVは、各ピアが隣接ピアの情報のみから求まるボロノイ領域の面積を指標とすること

で、自律的に上位階層のネットワークに参加するかを確率的に決定し、領域全体においてピアの分布が地理的に一様なドローンオーバーレイネットワークを構築する。

HDOVは、特定の階層のオーバーレイネットワークを利用すれば、地理的に一様な分布をもつピアの集合を得ることができるため、領域全体の観測値の傾向を把握できればよい場合には有効である。しかし、降雨分布における局所的な集中豪雨地域など、地理的に狭い領域で急激に観測値が変化する特徴点がある場合に、対応する観測値を取りこぼす場合がある。また、特徴点を把握するためにHDOVの下位の階層のオーバーレイネットワークを利用すると、特徴点以外の領域で多くの冗長なセンサ観測値を収集してしまう。

2.2 HDA-SN

HDA-SN (Hierarchical Delaunay-based Aggregation w/ Segment Number) は、等値線図を再現するためにセンサ観測値を収集する際に、冗長な情報を削減しつつ特徴点を再現可能な手法である。HDA-SNでは、HDOVを拡張し、HDOV上で観測値を階層的に集約した上で、特徴点に存在するノードへ検索メッセージを転送しセンサ観測値を収集する。

HDA-SNでは、HDOVの特定の階層を利用することで収集できる地理的に一様なセンサ観測値と、HDOV上で階層的に集約された情報を元に収集される特徴点を再現可能なセンサ観測値に対して空間補間を適用することで等値線図を再現する。等値線図における特徴点とは、等値線と等値線で囲まれる領域である区間数が局所的に多い領域である。HDA-SNでは、HDOVの上位階層に属するピアが各子ピアのボロノイ領域内に特徴点が存在するかどうか判断する。上位階層のピアは指定等値線幅と集約情報から求められる子ピアのボロノイ領域内の区間数がパラメータ S 以上ある場合に、その領域内に特徴点があると判断しメッセージを転送する。このように、ボロノイ領域内に特徴点があると判断されたピアにメッセージを転送していくことで、特徴点を再現可能なセンサ観測値を収集することができる。

2.3 HDA-RC

HDA-SNは、指定等値線幅が小さい場合に S を小さく設定すると、特徴点が存在しない領域に対してもクエリを転送し、冗長なセンサ観測値を収集する。さらに、指定領域に特徴点が多数存在する場合には、際限なくセンサ観測値を収集するため、収集するセンサ観測値数を制限できない。レスポンス時間やユーザビリティの観点では、収集するセンサ観測値数を一定に抑えた上でセンサ観測値分布を再現できることが望ましい。

そこで、収集するセンサ観測値数を一定に抑えた上で、ユーザの要求に応じたセンサ観測値を収集可能な手法としてHDA-RC (Hierarchical Delaunay-based Aggregation w/

Resolution of Characteristic) を提案した。HDA-RC では、HDOV を拡張し、HDOV 上で観測値を階層的に集約した上で、ユーザの要求に応じてどの領域においてどの程度の数のセンサ観測値を収集すべきかを決定する。

HDA-RC では、ユーザが特徴点を把握する度合いであるパラメータ C を設定することができる。HDOV の上位階層に属するピアは集約情報および C に基づいて、各子ピアのボロノイ領域においてどの程度の収集すべきセンサ観測値数を割り振るかを判断する。このように、上位階層から下位階層へ収集すべきセンサ観測値数を割り振ることで、ユーザの要求に見合ったセンサ観測値をシステムの制限するセンサ観測値数の範囲で収集することができる。

3. システム構成

PIAX によるセンサデータ補間アプリケーションとして、地図上に補間画像をオーバーライド表示するセンサデータ概要把握アプリケーションを実装した。本アプリケーションでは、分散して配備されたセンサ群から提案手法により集約した観測値を元に、地理的な補間処理を行い、その結果を Web ブラウザ上の地図を用いて俯瞰参照することができる。また、サービスとしての運用を想定し、管理者向けインタフェースに必要な機能のひとつとして、観測値の収集時に生じる通信を地図上に表示することで可視化を行っている。利用者とのインタフェースには Web ブラウザを利用し、Google Maps API による地図描画に加えて、Canvas による通信の可視化、WebSocket による Web サーバから Web ブラウザへのリアルタイム通知を JavaScript を用いて記述している。

本アプリケーションシステムの構成を図 1 に示す。SensorAgent は、センサと 1 対 1 に対応し、センサから得られた観測値を保持するとともに、提案手法に従った PIAX Overlay Network を構成する要素となっている。保持している観測値は、PIAX Overlay Network を介した他のサービスからの要求に応じて要求元に応答する。本実装では、センサ観測値の集約に用いる PIAX Overlay Network は、提案手法の実装が比較的容易であることから、PIAX がネイティブサポートするオーバーレイプラグインの形式ではなく、エージェント間通信機能を用いた実験的な実装としている。データ補間サービスは、PIAX Overlay Network を介して SensorAgent から観測値を収集し、補間画像を作成する。ユーザは Web ブラウザでデータ補間サービスに接続することで、任意の範囲のセンサ観測値の概要を参照することができる。通信可視化サービスは、データ補間サービスによる観測値収集時に SensorAgent 間で生じるメッセージ通信を Web ブラウザを介してリアルタイムに可視化する。

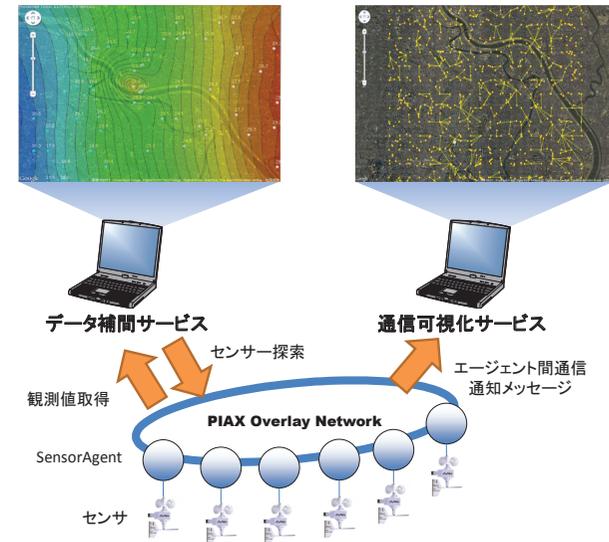


図 1 システム構成
Fig. 1 The system architecture

図 2 はデータ補間サービスの構成を示している。データ補間サービスはクライアントサイドとサーバサイドの 2 要素から構成されている。クライアントサイドは HTML/JavaScript により実装され、Web アプリケーションとしてユーザインタフェースを提供する。ユーザの操作に応じて Google Maps の表示範囲の変更、観測値集約手法の変更を行い、表示中の補間画像を更新する必要がある場合は、サーバサイドに新たな補間画像を要求する。サーバサイドは Java により実装している。クライアントサイド側の Web インタフェースを提供するため、Servlet コンテナ “Jetty7” を使用している。また、PIAX Overlay Network との通信には PIAX 2.2 をカスタマイズして使用している。クライアントサイドとサーバサイド間の通信は全て同期・非同期 HTTP を使用している。

ユーザが Web ブラウザでサーバサイドに接続すると、クライアントサイドを構成する HTML/JavaScript が Web ブラウザに返され、Web ブラウザ上でクライアントサイドが動作を始める。クライアントサイドは初期設定に従い Google Maps を表示し、その範囲に合わせた補間画像をサーバサイドに要求する。サーバサイドでは受け取った要求に応じて、PIAX Overlay Network を通してセンサを探索し、それらの観測値を取得する。得ら

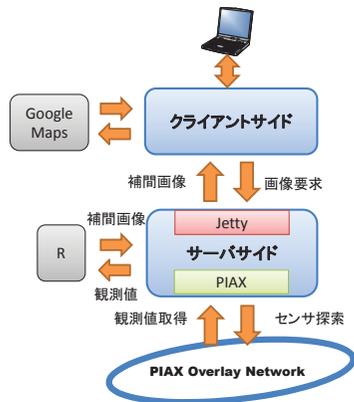


図2 センサデータ補間サービスの構成
Fig. 2 The structure for the sensor data interpolating service

れた観測値から補間画像（等値線図）を生成し、その画像を要求に対する応答としてクライアントサイドに返す。クライアントサイドでは、得られた補間画像をオーバーレイによりGoogle Maps 上に表示している。本アプリケーションでは補間画像の生成に統計解析ソフトウェア“R”を用いたが、この補間画像の生成処理を他の可視化モジュールに差し替えることで補間に限らない可視化が可能である。

通信可視化サービスの構成を図3に示す。通信可視化サービスの基本的な構成はデータ補間サービスと同じ形態で、HTML/JavaScriptによるクライアントサイドと、Javaによるサーバサイドの2要素構成としている。通信可視化サービスでは、PIAX Overlay Networkから通知されるSensorAgent間の通信状況をリアルタイムにWebブラウザ上に可視化する必要がある。このためには、エージェント間通信通知メッセージをリアルタイムにWebブラウザ上のクライアントサイドに通知しなければならない。今日の一般的なWebでは、WebサーバからWebブラウザにイベント通知を行うには、短周期PollingやLong PollingといったReverse Ajax技術が使用される場合が多いが、本アプリケーションではWebサーバとWebブラウザ間の双方向通信を実現するWebSocketを使用し、PIAX Overlay Networkから通知されたエージェント間通信通知メッセージは、サーバサイドによるフォーマット変換によるオーバーヘッドを除き、即座にクライアントサイドに通知可能としている。また、クライアントサイドにおける可視化処理においては、本アプリケーションでは描画する

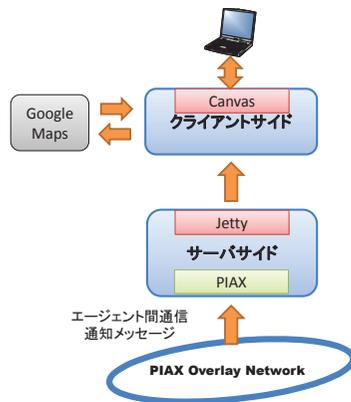


図3 通信可視化サービスの構成
Fig. 3 The structure for the communication visualizing service

要素数が数千個になるため、Google Maps API で用意されている図形描画 API ではメモリ消費が大きく、描画速度も不十分であった。このため、通信状況の描画にはHTML5で新設されたCanvas要素を用いた。これにより、メモリ消費と描画速度の問題は解消し、250ms周期で通信状況を描画することが可能となった。アプリケーション上では、このCanvas要素をGoogle Maps上にオーバーレイ表示することで実際のセンサ配置と合わせた可視化を実現している。

4. おわりに

本研究では、広域大規模センサネットワークにおけるセンサ観測値可視化システムを提案した。広域に大規模に分散するセンサから効率良くセンサ観測値を収集する手法として、HDA-SN および HDA-RC を紹介した。提案システムでは、PIAX 上で階層化ドローンオーバーレイネットワーク (HDOV) を構築し、センサ観測値収集手法として HDA-SN および HDA-RC を実装し、地図上にセンサデータを補間して表示するシステムおよびピア間の通信を可視化するシステムを構築した。

謝辞 本研究の一部は、NICT・大阪大学共同研究「異種センサーネットワークの統合管理技術の研究開発および検証」による成果である。

参考文献

- 1) 小西佑治, 寺西裕一, 竹内 亨, 春本 要, 下條真司, 西尾章治郎: センサ観測値分布の概要把握を可能とする階層化ドローンオーバーレイネットワーク構築手法, 情報処理学会論文誌, Vol.51, No.2, pp.624-634 (2010).
- 2) 大西真晶, 源元佑太, 江口隆之, 加藤宏章, 西出 亮, 上島紳一: ノード位置を用いたP2Pモデルのためのドローン図の自律分散生成アルゴリズム, 情報処理学会論文誌: データベース, Vol.47, No.4, pp.51-64 (2006).
- 3) 四之宮潤, 寺西裕一, 春本 要, 竹内亨, 西尾章治郎: 階層化ドローンオーバーレイネットワークを用いた空間補間のためのセンサ観測値収集手法, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2010) シンポジウム論文集, Vol.2010, No.1, pp.761-768 (2010).
- 4) 四之宮潤, 寺西裕一, 春本 要, 竹内亨, 西尾章治郎: 階層化ドローンオーバーレイネットワークにおけるシステムの制約設定に基づくセンサ観測値収集手法の検討, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2011) シンポジウム論文集, Vol.2011, No.1, pp.787-796 (2011).
- 5) Teranishi, Y.: PIAX: Toward a framework for sensor overlay network, *Proc. of International IEEE CCNC Workshop on Dependable and Sustainable Peer-to-Peer Systems*, pp.1-5, 2009.