

階層化ドロネー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

四之宮 潤^{†1} 寺西 裕一^{†2,†3} 春本 要^{†4}
竹内 亨^{†5} 西尾 章治郎^{†1}

本論文では、広域に大量かつ高密度でセンサが配置され、P2P ネットワークにより相互接続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ための効率的なデータ収集手法を提案する。離散的な観測点を持つセンサ情報の集合から指定領域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。しかし、地理的に近いセンサ観測値は類似する可能性があるため、対象領域に大量にセンサがある場合、空間補間のためにすべてのセンサ観測値を収集することは冗長である。また、精度を維持したうえで冗長性を排除する従来手法があるが、精度を保つためには非常に多くのセンサ観測値を収集してしまう可能性がある。そこで、本研究では、システムによって設定される収集センサ観測値数およびメッセージ数のシステム制約の範疇で要求に応じて等値線図を再現する方法を提案する。提案手法では、階層化ドロネーオーバーレイネットワーク (HDOV) を拡張し、観測値を階層的に集約したうえで、ユーザの要求に応じて収集すべきセンサ観測値数を含んだ検索メッセージを対象ノードに転送する。シミュレーション評価の結果、いくつかの特徴点がある分布において、提案手法はシステム制約の範疇で特徴点の把握に重きを置いた等値線図、特徴点を除いた等値線図、領域全体に対して正しい位置に等値線を引いた等値線図を再現できることを確認した。

A Sensor Data Collection Method on Hierarchical Delaunay Overlay Network Satisfying System Constraints

JUN SHINOMIYA,^{†1} YUUCHI TERANISHI,^{†2,†3}
KANAME HARUMOTO,^{†4} SUSUMU TAKEUCHI^{†5}
and SHOJIRO NISHIO^{†1}

In this paper, we propose an effective method to collect sensor data from

widely distributed and mutually connected peer-to-peer sensor network to enable reconstruction of a contour lines map with requested degree of the data granularity. In general, spatial interpolations are used to reconstruct sensor data distribution from sensors with dispersed observation points. In this case, when there are enormous number of sensors, it is redundant to collect all sensor data from wide area since geographically closed sensors sense similar data. When a contour lines map is reconstructed within some accuracy, a lot of sensor data may be collected. Therefore, we propose a sensor data collection method that forwards messages to the nodes which are suitable for user's requirements for the sensor data distribution by extending hierarchical Delaunay overlay network (HDOV). By our proposal method, the contour lines map can be reconstructed according to the requirements, satisfying specified system constraints. The simulation result shows that our proposal can reconstruct contour lines map which focused on characteristic points or omitted characteristic points or drawn contour lines in the right place for the whole area.

1. はじめに

携帯電話やサイネージ機器などの発達と普及により、コンテキストウェアサービス、ユビキタスサービスと呼ばれる情報サービスに対する重要性がますます高まっている。こうしたサービスでは、気象や交通渋滞などの実世界の観測から得られるリアルタイムの情報が必要となる。また、そのような観測から得られる情報は、地球温暖化や大気汚染などの環境問題対策のうえでも重要となる。こうした要求に対応するため、センサをいたるところに配備し、一定期間おきなど自動的に観測を行うことで、遅延が小さく現実に近いリアルタイムの状況を取得可能とするための世界規模のセンサネットワークを構築するプロジェクトが多く存在する。たとえば、Live E! プロジェクト⁴⁾では、個人や組織が自律的に設置・運営するデジタル百葉箱をインターネット経由で接続し、従来以上の密度と精度、リアルタイム性の

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{†2} 独立行政法人情報通信研究機構
National Institute of Information and Communications Technology

^{†3} 大阪大学サイバーメディアセンター
Cybermedia Center, Osaka University

^{†4} 大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University

^{†5} 日本電信電話株式会社未来ネットワーク研究所
NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation

ある情報を提供しようとしている。フィールドサーバプロジェクト⁵⁾では、センサなどの電子機器を搭載したサーバを農村や圃場などに配置し、屋外における環境モニタリングや、農林水産業のためのリモートセンシングを行う。サーバは気温、湿度、日射量、二酸化炭素濃度などのセンサデータを収集することで、分散してモニタリングを可能としている。GSN (Global Sensor Network) プロジェクト¹⁾では、それぞれ独自のシステムで稼働している異種センサネットワークを統合するためのプラットフォームを開発し、簡潔かつ柔軟にセンサネットワークやセンサデータにアクセス可能な枠組みを提供している。SENSEI プロジェクト¹³⁾では、世界規模で分散して配置される異種のセンサネットワーク、アクチュエータネットワークを統合することで、現実世界とデジタル世界を融合し、安全かつオープンなサービスを提供することを目指している。こうした環境をはじめとして、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。このような場合、世界中のいたるところに存在する大量のセンサデータを扱える必要があるが、すべてのセンサデータを1カ所に集約するコストは高い。たとえば、Live E! プロジェクトのセンサにおいて、1つのセンサが発生する1データエントリの大きさは約1.5kBである。日本国内の各世帯(5,000万世帯)にセンサが1つ設置されたとして、5,000万個のセンサから、5分おきにデータを収集したとすると、1年で約8ペタバイトのストレージが必要となる。このようなネットワークトラフィックに耐える設備やストレージを用意するコストは単体の組織が負担するには大きく、たとえば非営利のサービスとしては成立させにくい。また、1カ所に全データを集約することは単一障害点となり、故障による影響が大きいという問題もある。そこで本研究では、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システム構成を想定する。

広域にわたり配備されたセンサを活用するうえで、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。観測値とはセンサが観測した値であり、温度計センサであれば温度の値、CO₂センサであればCO₂濃度の値などを指す。また、観測値分布とは、どの地点でどのような観測値となっているかを示す空間的な分布である。観測値分布としては、同じ意味と見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うえで十分となる場合

が多い。等値線図において、等値線によって区切られ、同じ意味を持つと見なす観測値の範囲を区間と呼ぶ。また、区間に対応する観測値の範囲の大きさを区間幅と呼ぶ。たとえば、CO₂モニタリングにおいては、CO₂観測値の等値線図を、区間ごとに排出量を減少させる勧告を行うなどするための指標として利用できる。また、気象モニタリングにおいては、気圧の等値線図である等圧線図によって、各住民が自身の在住する位置の気圧が、全体においてどのような状況であるかを把握できる。このとき、指標となる観測値や、把握すべき変化の具合に応じて、等値線図において用いられるべき区間幅は変化すると考えられる。

よって、本研究では、アプリケーションが指定した区間幅に応じて、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。空間補間は、観測値情報(観測値、位置座標)の集合をもとに行う。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情報収集対象領域におけるすべ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くが無駄となる。一方、ユーザが取得する観測値分布に対する要求としては、対象領域における異常を把握するため、粒度の細かい特徴点を漏れなく把握したいという要求や、領域全体の分布の傾向を把握するため、粒度の細かい特徴点を排除したいという要求があると考えられる。前者については、センサ観測値数(空間補間のために収集する観測値の総数)を多くすることで要求を満たすことができるが、収集対象のピアを探索しデータを取得する際に発生するネットワーク遅延や、補間処理内容が複雑化することによる処理遅延が生じる。後者については、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レイネットワーク(HDOV⁸⁾)が提案されている。しかし、この方法は確率的にセンサ観測値を選択するため、粒度の細かい特徴点に対応するセンサ観測値も収集してしまう可能性がある。レスポンス時間やユーザピリティの観点では、収集するセンサ観測値数を一定以下に抑えたいうえで、観測値分布に対するこうした要求を満たすことができることが望ましい。

そこで、本研究では、検索領域から情報収集対象となるピアを選択する際に、システムの制限するセンサ観測値数をもとに、どの領域に対し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決定することで、システムの制約の範疇でユーザの要求に従ったセンサ観測値分布を再現する手法を提案する。提案手法では、複数の密度で地理的に一様に選択した上位階層ネットワークを構築可能なHDOVを拡張し、HDOV上で観測値を階層的に集約したうえで、ユーザのセンサ観測値分布の把握の仕方に基づいて、HDOVの上位階層からシ

システムの制限するセンサ観測値数を下位階層へ割り振る．このようにすることで，システムの制限の範囲内でユーザの要求に基づくセンサ観測値を収集し，ユーザの領域の把握の仕方に応じたセンサ観測値分布を再現することができる．

2. 関連研究

2.1 センサネットワークにおけるセンサ観測値収集手法

高密度にセンサが配置され，それらセンサが無線センサネットワークを構築している環境の下，再現されるセンサ観測値分布の精度を維持しつつ，消費電力を抑える手法に関する研究が多くなされている．

Backcasting¹⁷⁾では，センサ観測値分布を再現するために，2段階のステップを設けセンサ観測値を収集する．preview ステップでは，センサの部分集合からセンサ観測値分布の空間的相関性を把握し，指定される誤差を考慮し，さらに追加でセンサ観測値を収集すべき領域を推定する．refinement ステップでは，さらに情報を収集すべきと推定した領域に存在するセンサを稼働させ，精度の向上を図る．このように，センサ観測値分布に応じて適応的にセンサ観測値を収集することで精度を維持しつつネットワーク全体でやりとりされるトラヒックを抑えている．

BBQ³⁾では，観測値分布の相関性を表現する統計モデルを構築し，要求に対してモデルに基づく予測値を応答することでトラヒックを抑えている．統計モデルは，ネットワークの全ノードから一定期間データを収集することで基地局で構築される．要求にはユーザが求める信頼度が設定されており，基地局の統計モデルからその信頼度を満たした応答を得ることができる場合には，センサネットワークに通信は発生しない．

上記はいずれも無線センサネットワークを想定しているため，本研究で想定する広域にセンサが配置されるネットワークとは規模が異なる．Backcasting では反復的にセンサネットワークに対してメッセージを送る必要があり，ネットワークが大規模になると観測値分布の把握要求時からの遅延が問題になると考えられる．本研究の想定では，任意のピアが相互接続できる想定であるため，反復的にネットワークに対してメッセージを送る必要がない．また，BBQ では，統計モデルを構築するために全センサデータを収集しているが，領域における統計的性質が変化した際にはモデルを再構築する必要がある．したがって，本研究で想定する大規模なネットワークへの適用は難しい．

2.2 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

広域にわたって膨大な量のセンサが配置されている環境において，センサをピアとして構成

されるドローンオーバレイネットワーク¹²⁾を利用したセンサ観測値収集手法がいくつか提案されている．

ドローンオーバレイネットワークは，地理的に近接したノードどうしが相互接続するリンクを基本とするネットワークであり，センサネットワークの構成に適している．ドローンオーバレイネットワークでは，リンク構造が計算幾何学のドローン三角形分割となり，任意の3ピアが持つ座標を通る三角形の外接円内に他のピアの座標を含まないように各ピアのリンクが構築される．ドローン三角形分割は，平面上の任意の点を最も近い母点に属する領域として分割するポロノイ領域分割と双対な関係にある．ポロノイ領域分割では各点に対してポロノイ領域と呼ばれる領域を定義できる．ある点に対するポロノイ領域とは，その点と隣接した点を結んだ線分の垂直二等分線によって囲まれる領域である．図1にドローン三角形分割とポロノイ領域分割を示す．ここで，実線はドローン辺，破線はポロノイ境界を表している．ドローンオーバレイネットワークでは，リンク構造は各ピアの位置に基づいており，各ピアはドローンオーバレイネットワークに参加後，地理的に近いピアとリンクする．遠距離のピア探索はマルチホップ通信により行われ²⁾，範囲検索はgreedy routing¹⁶⁾やcompass routing⁹⁾により実現される．

2.2.1 境界応答手法

境界応答手法⁷⁾は，広域に大量に分布する各センサがドローンオーバレイネットワークを構築している環境の下，等値線の境界付近のピアのみが応答する手法である．

境界応答手法では，クエリ伝搬時にクエリを受信したピアが自身のセンサ観測値と隣接するピアのセンサ観測値をもとに区間の境界を検知し，区間の境界に位置すると判断したピアのみが応答を返すことで，区間内における冗長なピアの応答を削減しつつ観測値分布を把握することができる．しかし，等値線の境界付近のピアがすべて応答するため，指定する等値線幅が狭い場合には収集するセンサ観測値数が膨大になるなど，収集するセンサ観測値数を制限できないという問題がある．また，補間を行う場合など区間の境界に隣接するすべての観測値情報が必要でない場合には，冗長な情報を取得してしまう．

2.2.2 階層化ドローンオーバレイネットワーク

文献8)では，広域に大量に分布するセンサから地理的に一様にセンサ観測値を収集するための階層化ドローンオーバレイネットワーク(HDOV: Hierarchical Delaunay Overlay Network)の構築手法を提案している．HDOVは，指定した一定の地理的な粒度で観測値を収集することが目的であり，小さな特徴点がある分布の場合など，正しい等値線図を得るには，冗長となる場合がある．HDOVでは，周囲のピアの分布状況を調査することなく領

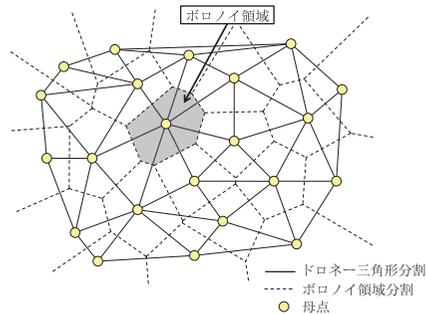


図 1 ドローン三角形分割とボロノイ領域分割

Fig. 1 Delaunay triangulation and Voronoi cell segmentation.

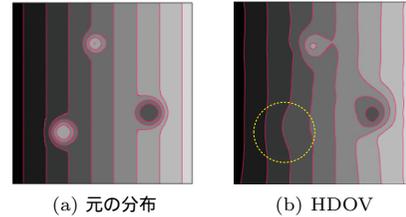


図 2 空間補間による等値線図

Fig. 2 Contour lines maps by spatial interpolation.

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レイネットワークを構築する。

HDOV では、上位階層のドローンオーバレイネットワークを構築する際に、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して、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する。要求されるピアの密度 ρ が与えられたとき、面積 S_{vor} のボロノイ領域内に存在すべきピア数 N_{req} は $S_{vor} \times \rho$ により求まる。一方、ボロノイ領域内の実際のピア数 N_{real} は 1 である。よって、上位階層に参加するピアの選択確率 Pr_{sel} は $Pr_{sel} = N_{req}/N_{real} = S_{vor} \times \rho$ と定義できる。各ピアが Pr_{sel} に基づき上位階層のドローンオーバレイネットワークに参加するかを決定することで、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レイネットワークを構築可能となっている。

HDOV は、特定の階層のオーバレイネットワークを利用すれば、地理的に一様な分布を持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、対応する観測値をとりこぼす場合がある。特徴点を把握するために HDOV の下位の階層のオーバ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。図 2 (b) は HDOV の特定の階層を利用して収集したセンサ観測値に対して空間補間を適用し取得した等値線図の例である。図 2 (a) の元の分布と比較すると、破線の丸で囲まれた領域において、空間における特徴を大きくとりこぼしていることが分かる。

2.2.3 HDA-SN

文献 14) では、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 (HDA-SN: Hierarchical Delaunay-based Aggregation w/ Segment Number) を提案している。HDA-SN では、HDOV を拡張し、HDOV 上で観測値を階層的に集約したうえで、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もと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。センサ観測値の集約は、HDOV の上位階層に属するピアが自身のボロノイ領域内に存在する下位階層のピアに対して行い、それぞれのピアが 1 段下位層の各ピアのボロノイ領域におけるセンサ観測値の最大値と最小値を集約する。ここで、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り、この領域内のセンサ観測値を収集することで、特徴点をとりこぼすことなく等値線図を再現することができる。HDA-SN では、クエリが発行されると、HDOV の上位階層から下位階層へクエリを転送していく。このとき、上位階層のピアは 1 段下位層のピアのボロノイ領域内のセンサ観測値の最大値と最小値を集約しており、これらの集約情報とクエリ中の等値線幅から求められる区間数がパラメータ S 以上であれば、ボロノイ領域内に特徴点が存在すると判断し、そのピアへクエリを転送する。このように、ボロノイ領域内に特徴点が存在すると判断されたピアへクエリを転送することで、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、特徴点をとりこぼすことなく等値線図を再現することができる。

しかし、HDA-SN では、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モクエリを転送し、冗長なセンサ観測値を収集する。一方、指定等値線幅が大きい場合に S を大きく設定すると、特徴点が存在しているにもかかわらず特徴点が存在しないと判断し、特徴点を把握できない可能性がある。したがって、指定等値線幅に応じて適切なパラメータ S を設定する必要がある。また、HDA-SN では、特徴点が存在すると判断した領域内のピアのセンサ観測値を収集するため、指定領域内に特徴点が多数存在する場合などには、際限なくセンサ観測値を収集してしまうため、センサ観測値数やネットワークトラフィックなどのシステムの制限を大幅に超える可能性がある。

これら既存手法では、センサ観測値分布を精度の観点から再現している場合が多く、収集するセンサ観測値数の上限を制限できない。本研究では、収集するセンサ観測値数を一定に

抑えたいのでセンサ観測値分布を再現することで、システムの負荷を一定に抑えることを目指す。

3. 提案手法

3.1 想定環境

本研究では、センサが世界規模で膨大かつ疎密のある分布を形成し、各ピアが相互に接続する P2P ネットワークを構築している環境を想定する。ここでは、各ピアは P2P ネットワークとして階層的な HDOV を構築することを前提とする。階層を構成する方法については、文献 8) に従う。本研究では、HDOV において、センサ観測値の集約、収集を行う方法を提案する。また、各ピアの観測するデータは正確であり誤差はないものとする。このような環境の下で想定するアプリケーションは、ユーザが指定する領域、等値線幅、観測値分布の把握の仕方に基づいて、指定領域に存在するピアを検索し、各ピアから得られるセンサ観測値から等値線図を取得する地理情報システムである。

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空間補間手法としては、IDW (Inverse Distance Weighted)、スプライン、クリギング¹⁰⁾ などがある。本提案では、収集したセンサ観測値に対していずれかの補間手法を適用し、等値線図を得ることを想定する。

本研究で想定するシステムでは、システム設計者がシステムに対する負荷やレスポンス時間などを考慮し、収集するセンサ観測値数に制限を設け、そのセンサ観測値数の範囲でネットワークトラフィックを抑えつつセンサ観測値を収集する。提案手法では、システムの制限するセンサ観測値数の範囲でユーザの要求に応じたセンサ観測値を収集するために、HDOV において階層間におけるリンク構築、センサ観測値の集約、センサ観測値の取得ができるようにする拡張を行う。以下では、それぞれについて説明する。

3.2 階層間におけるリンク構築

HDOV 構築時において上位階層のドローンオーバレイネットワークを構築するとき、階層間において新たにリンクを構築することで、HDOV を拡張する。以後、HDOV のレベル i の階層を L_i と定義する。すべてのピアから構成される HDOV の最下位の階層は L_0 であり、HDOV が H レベルある場合は、最上位の階層は L_{H-1} となる。リンクは L_i に属するピアのポロノイ領域に存在する L_{i-1} に属するピアに対して構築される (図 3)。 L_i に属するピアは L_{i-1} のドローンオーバレイネットワークを利用することで自身のポロノイ領域内に存在するピアを検索し、発見した L_{i-1} に属するピアとリンクを構築する。このリン

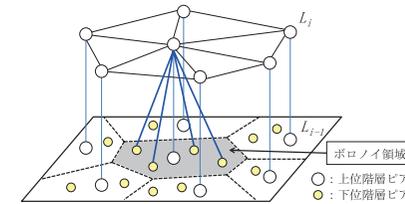


図 3 HDOV の階層間におけるリンク構築
Fig. 3 Construction of the links between the layers.

ク構築操作を HDOV におけるすべての階層間で行う。

3.3 センサ観測値の集約

HDOV の隣接する各階層間で新たに構築したリンクを利用しセンサ観測値を集約する。 L_i に属するピアは L_{i-1} に属するピアに対して構築したリンクを利用し、 L_{i-1} に属するピアのセンサ情報を集約する。

以下では、 $I(n)$ をピア n のセンサ情報、 $loc(n)$ を n の位置する座標、 $data(n)$ を n の観測値、 $num[i]$ を L_i における子ピアの数、 $center(P)$ をピアの集合 P の座標の重心、 $min(P)$ をピアの集合 P のうちの最小のセンサ観測値、 $max(P)$ をピアの集合 P のうちの最大のセンサ観測値、 $ave(P)$ をピアの集合 P のセンサ観測値の平均値、 $var(P)$ をピアの集合 P のセンサ観測値の地理的分散、 N_i を L_i に属するピアの集合、 $V_i(n)$ を L_i に属するピア n のポロノイ領域に存在する L_{i-1} に属するピアの集合とする。なお、地理的分散とは、ピア間の距離とセンサ観測値の差により求められる傾きの分散であり、 L_1 に属するピアは $V_i(n)$ との傾きを計算し地理的分散を集約する。地理的分散はセンサ観測値分布の周波数の高さを表し、地理的分散が大きいほどセンサ観測値分布が複雑な分布であることを意味する。

$\{I(n)|n \in N_i\}$ は次の 6 つの要素からなる。

- (1) $loc(n)$ and $data(n)$
- (2) $num[i-1]$
- (3) $center(P)$, where $P = V_i(n)$
- (4) $min(P)$ and $max(P)$, where $P = V_i(n)$
- (5) $ave(P)$, where $P = V_i(n)$
- (6) $var(P)$, where $P = V_i(n)$

したがって、各ピアは $\{loc(m), data(m), num[i-1], center(Q_m), min(Q_m), max(Q_m)$

$ave(Q_m), var(Q_m)$ の集合を集約する．ここで， $m \in V_i(n)$ ， $Q_m = V_{i-1}(m)$ である．すなわち，自身のボロノイ領域内に存在する 1 段下の階層のピアから，それぞれのピアのセンサ観測値と座標，各階層における子ピアの数，ボロノイ領域内のピアの座標の重心，ボロノイ領域内のセンサ観測値の最大値，最小値，平均，地理的分散を集約する．これら集約情報は，センサ観測値を収集する際に，システムの制限の範疇でユーザの要求に応じたセンサ観測値を収集するために用いる．

一般に，センサが観測する気象データは時間の経過とともに変化し，それとともに空間における特徴も変化する．HDOV では定常状態において，そのリンク構造を維持するためのメンテナンスメッセージを定期的にやりとりしているため，このメンテナンスメッセージに重畳し，センサ観測値の集約を行うことで定期的な集約情報の更新を行うものとする．したがって，センサ観測値の集約にかかる時間は，たかだかメンテナンスメッセージの間隔（10～20 秒程度）× 階層数である．集約とともにセンサ観測値は頻繁にやりとりされるが，分散処理が行われるため，各ノードはたかだか $|V_i(n)|$ 数の $I(n)$ を集約するのみでよい．

3.4 センサ観測値の収集

センサ観測値の収集をシステムの制限するセンサ観測値数（以下 M と定義）の範疇で行うために，HDOV の最上位の階層に存在するピアのうち，指定領域とボロノイ領域が交わるピア群に対して， M を割り振る．このとき，センサ観測値数の割り振りは，地理的に一様に収集するセンサ観測値数，および，ユーザの要求するセンサ観測値分布の把握の仕方に基づいて行う．さらに，収集すべきセンサ観測値数を割り振られたピア群が，自律分散的に下位階層のピアへ収集すべきセンサ観測値数を割り振ることで，最終的に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で収集する．

地理的に一様なセンサ観測値は空間における広域的な変動を把握するために必要である．ここで，収集するセンサ観測値数にはシステム側で制限を設けるため，その範囲内で地理的に一様に収集するセンサ観測値数を決定する．HDOV はピアの密度が指定された密度になるように上位階層ネットワークを構築するため，各階層のピアの密度は既知であり，上位階層になるにつれてその密度は疎となる．ユーザから指定領域を含むクエリが発行された場合，指定領域と地理的に一様に収集するセンサ観測値数から，指定領域における地理的に一様に収集すべきセンサ観測値の密度が定まる．この密度より密で，かつ，最も疎となる HDOV の階層に属するピアのボロノイ領域内のセンサ観測値を収集することで，空間補間に必要な地理的に一様なセンサ観測値を収集する．以降，地理的に一様にセンサ観測値を取

集する HDOV の階層を L_u とする． M から地理的に一様なセンサ観測値数を差し引いた残りのセンサ観測値数は，ユーザが要求するセンサ観測値分布の把握の仕方に基づいてセンサ観測値を収集するために利用する．

ピア n ($n \in N_i \cap i > u$) が $V_i(n)$ に対してセンサ観測値数を割り振る場合，まず，地理的に一様にセンサ観測値を収集するためにセンサ観測値数を割り振る．ピア n は集約情報として $V_i(n)$ の各階層における子ピアの数を保持しているため， $V_i(n)$ それぞれのピアに対して $num[L_u]$ のセンサ観測値数を割り振る．次に地理的に一様なセンサ観測値数を差し引いた残りのセンサ観測値数 $R_{i,n}$ を以下の式に基づいて割り振る．

$$R_{i-1,m} = R_{i,n} \times (area(m)var(Q)^{C/2}S(m)^C) / \sum_k (area(k)var(Q_k)^{C/2}S(k)^C)$$

m は割り振り対象のピアであり， $area(m)$ はピア m のボロノイ領域と指定領域の交わる面積である． $S(k)$ ($k \in V_i(n)$) はボロノイ領域内における区間数であり，ピア k のボロノイ領域におけるセンサ観測値の最大値，最小値，ユーザから指定される等値線幅 ($width_{seg}$) に基づいて求められ，次式で与えられる．

$$S(k) = floor(max(P)/width_{seg}) - floor(min(P)/width_{seg}) + 1$$

提案手法では，ユーザの要求するセンサ観測値分布の把握の仕方として C を指定可能とする． C が正の場合，区間数が多く地理的分散の大きい領域，つまり，観測値分布において，振幅が大きく周波数が高い領域へセンサ観測値数を多く割り振り， C の値が大きいほど，そのような領域に対してより多くのセンサ観測値数を割り振る． C が 0 に近いほど，面積に着目した割り振りとなるため，地理的に一様にセンサ観測値数を割り振る． C が負の場合，区間数が少なく地理的分散の小さい領域，つまり，なだらかな分布をしている領域に対してセンサ観測値数を多く割り振り， C の絶対値が大きいほど，そのような領域に対してより多くのセンサ観測値数を割り振る．ピア n ($n \in N_i \cap i \leq u$) が $V_i(n)$ に対してセンサ観測値数を割り振る場合，割り振るセンサ観測値数のすべてを $R_{i,n}$ とし，上式に基づいてセンサ観測値数を割り振る．

このようにセンサ観測値数を割り振るピア n ($n \in N_i$) は，集約情報に基づいて $V_i(n)$ に対してセンサ観測値数を割り振る．このとき，もしピア m ($m \in V_i(n)$) の割り振り後のセンサ観測値数が 1 より多ければピア m へメッセージを転送し，センサ観測値数が 1 であればピア n は集約情報に基づいて， $center(m)$ と $ave(Q)$ を返信する．ピア n ($n \in N_1$) がメッセージを受信した場合，割り振られたセンサ観測値数に応じて，各区間ごとにセンサ観測値を返信する．図 4 に，センサ観測値の収集時におけるメッセージの流れの様子を示す．

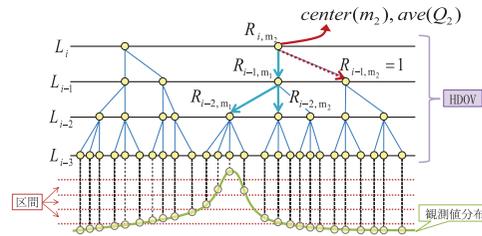


図 4 センサ観測値数の収集
Fig. 4 Collection of sensor data.

4. 性能評価

4.1 シミュレーション環境

提案手法の有効性を評価するためにシミュレーションを行った。シミュレーション環境を以下に示す。

センサのセンシング領域を 300×300 とする。各世帯に 1 つ程度の高密度でセンサが配置された環境を再現するため、センシング領域に対して 2,500 ピアを格子状に配置する。これは、5 キロ四方程度の領域において、1 キロ平方メートルに 100 個程度センサが配置された環境を 25 キロ平方メートル切り出した環境に相当する。観測対象は図 5 (a) に示す $300 [\text{pixel}] \times 300 [\text{pixel}]$ のグレースケール画像の各画素値 ($0 \sim 255$) に対応する値とする。ここでは、まず、図 5 (a) に示すように、提案手法の特性や精度を調べるためにノイズが少なく大きさの異なる複数の特徴点が含まれる典型的な分布を用いている。

空間補間手法としてはクリギングを用いる。クリギングは、地理的に距離の近いデータは類似性を持つという性質を利用し、データの共分散に二次定常性を仮定して距離の関数で表すことで、任意の地点に対して予測分散が最小となる予測を行う方法である。

シミュレーションにおいて、文献 12) において定義されているドローンオーバレイネットワークプロトコルを実装した PIAX¹⁵⁾ のエミュレータ機能を用いた。HDOV は 5 階層で構築され、全ピアから構成される L_0 は 2,500 ピアでドローンオーバレイネットワークを構築する。上位階層のネットワークについては、 L_1 は領域全体に対して 400 ピア、 L_2 は 100 ピア、 L_3 は 25 ピア、 L_4 は 4 ピアとなるように、それぞれ下位層のネットワークからピアを選択することで、ドローンオーバレイネットワークを構築する。HDOV の特徴上、これら上位階層ネットワークに参加しているピアは確率的に地理的に一様な分布を形成するが、

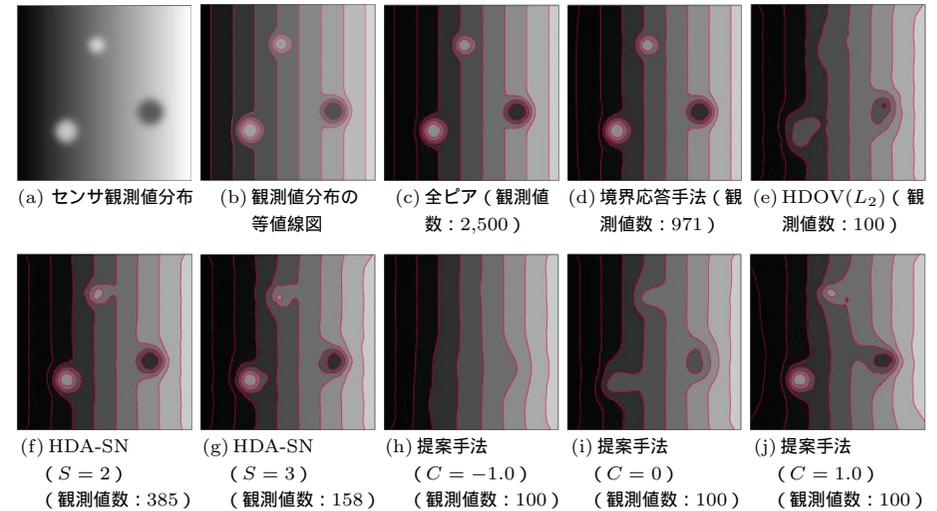


図 5 等値線図 (等値線幅 30)
Fig. 5 Reconstructed contour lines map.

確率による評価への影響を避けるため上位階層のピアの分布は格子状になるように選択する。ユーザから指定される領域はセンサのセンシング領域全体、つまり、 300×300 とし、指定される詳細度は $\{10, 30, 50\}$ の等値線幅とする。

提案手法については、 M を $\{50, 100, 150\}$ に設定し、それぞれ地理的に一様に収集するセンサ観測値数を $\{25, 25, 100\}$ とする。比較手法として、境界応答手法、HDOV の特定の階層を利用し得られる地理的に一様なセンサ観測値に対して空間補間を適用した場合、HDA-SN を用いる。平等にメッセージ数を評価するために、HDOV は 3.3 節で述べたセンサ観測値の集約を行っているとする。したがって、 L_i に属するピアのセンサ観測値を収集する場合、 L_{i+1} に属するピアに対してフラッディングによりメッセージを送信する。メッセージを受信したピアが $C(n)$ と $D(n)$ を返信することで、 L_i に属するピアのセンサ観測値が収集される。境界応答手法についても、センサ観測値の集約を行った HDOV を利用する。

4.2 評価結果

4.2.1 等値線図

図 5 は、各手法において指定等値線幅が 30 の場合に取得したセンサ観測値に対してクリギングを適用し再現した等値線図である。図 5 (b) は図 5 (a) のセンサ観測値分布に基づい

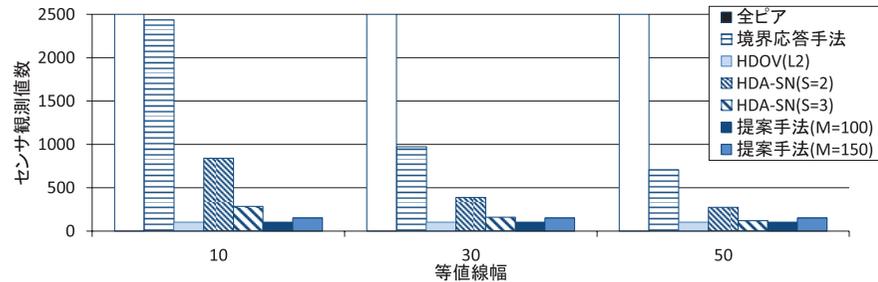


図 6 センサ観測値数

Fig. 6 The number of collected sensor data.

て等値線図を作成したものであり、図 5 (c) はすべてのピアのセンサ観測値を収集した場合、図 5 (d) は境界応答手法によりセンサ観測値を収集した場合、図 5 (e) は HDOV の L_2 に属するピアのセンサ観測値を収集した場合、図 5 (f)、図 5 (g) はそれぞれ HDA-SN において $S = 2$, $S = 3$ としてセンサ観測値を収集した場合、図 5 (h)、図 5 (i)、図 5 (j) はそれぞれ提案手法において $M = 100$, $C = -1.0$, $C = 0$, $C = 1.0$ としてセンサ観測値を収集した場合である。また、図 6 に、各指定等値線幅に対して等値線図を再現するために収集したセンサ観測値数を示す。

全ピア応答と境界応答手法は図 5 (b) のセンサ観測値分布の等値線図と比較して同様の等値線図であり精度が良いが、これらの手法はそれぞれ 2,500, 971 のセンサ観測値を取得しているため、システムの制約を大きく超えたセンサ観測値を収集している。HDOV の L_2 に属するピアからセンサ観測値を収集した場合については、取得したセンサ観測値数は 100 であるが、地理的に一様にセンサ観測値を収集しているため、空間における特徴を把握できていない。HDA-SN は $S = 3$, $S = 2$ とともに空間における特徴を把握できており、特に $S = 2$ の場合は精度が良い。しかし、 $S = 3$, $S = 2$ それぞれの場合について、収集したセンサ観測値数は 385, 158 であり、特にパラメータ S が小さい場合にはシステムの制約を大きく超えたセンサ観測値を収集する可能性がある。一方、提案手法ではあらかじめ収集するセンサ観測値数を 100 に設定しているため、システムの制約を超えるセンサ観測値を収集することはない。 $C = 0$ の場合は地理的に一様にセンサ観測値を収集するため HDOV の L_2 を利用する場合と同様の等値線図が再現される。 C が負の場合は、特徴点を退けるようにセンサ観測値を収集するため、特徴点を除いたセンサ観測値分布が再現されている。 C が正の場合は、地理的分散の大きい領域や特徴点の存在する領域のセンサ観測値を収集する

ため、センサ観測値分布における特徴点を把握可能な等値線図が再現されている。したがって、提案手法はシステムの制約するセンサ観測値数の下でユーザの要求に応じた等値線図を再現できている。

4.2.2 平均区間誤差とメッセージ数

図 7 に、センサ観測値分布から得られる等値線図と取得した等値線図において、各画素の区間の誤差を算出したときの誤差の平均値を示す。区間の誤差が 0 であればその画素は正しく再現されており、領域全体に対して等値線が正しい位置に引けていない場合や、特徴点を逃した場合には高い平均区間誤差を示す。なお、HDA-SN が特徴点を把握するという観点から、提案手法では特徴点を把握するために $C = 1.0$ の場合について評価し、また、 $M = 100, 150$ としている。

全ピアのセンサ観測値を収集する場合と境界応答手法については、すべての等値線幅において平均区間誤差が小さく、再現された等値線図の精度が良い。しかし、図 6 から分かるように、収集するセンサ観測値数が非常に多く、システムの制約を大きく超えているため、システムへの負荷が非常に大きいと考えられる。HDOV の L_2 の階層を利用する場合、地理的に一様にセンサ観測値を収集するため、特徴点を取りこぼす可能性があり、すべての等値線幅において高い平均区間誤差を示している。HDA-SN については、 $S = 2$, $S = 3$ のどちらについても HDOV の L_2 の階層を利用する場合よりも平均区間誤差が小さく、精度の良い等値線図が再現できている。しかし、特に等値線幅が小さく S が小さい場合には、多くのセンサ観測値を収集するため、HDA-SN がパラメータ S の設定によって、システムの制限を大きく超えたセンサ観測値を収集することが考えられる。また、等値線幅が大きく S が大きい場合には、特徴点を取りこぼす可能性があり、再現される等値線図の精度が低くなる可能性がある。したがって、HDA-SN ではセンサ観測値分布や指定される等値線幅に応じて適切なパラメータ S の設定が必要である。一方、提案手法では、あらかじめ設定されたセンサ観測値数でセンサ観測値を収集するため、システムの制限の範疇でセンサ観測値を収集することができる。HDOV の L_2 の階層を利用し 100 のセンサ観測値を収集した場合と提案手法において収集するセンサ観測値数を 100 に設定した場合について平均区間誤差を比較すると、いずれの等値線幅についても提案手法の精度が良いため、提案手法が効率良くセンサ観測値を収集できていることが分かる。また、等値線幅が 30 の場合について、提案手法と HDA-SN ($S = 3$) を比較すると、収集センサ観測値数、および、平均区間誤差が同程度であることから、提案手法がシステムの制約の範疇で特徴点を把握しつつセンサ観測値分布を再現できていると考えられる。

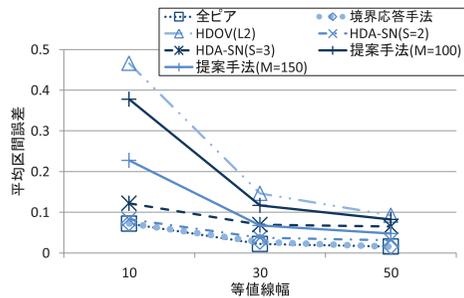


図 7 平均区間誤差

Fig. 7 The average of segment errors.

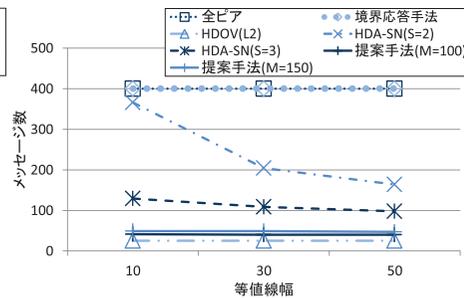


図 8 メッセージ数

Fig. 8 The number of messages.

図 8 にクエリ発行後、応答を返すべきピアへメッセージが転送されるまでに、ピア間でやりとりされる総メッセージ数の評価結果を示す．全ピアのセンサ観測値を収集する場合、境界応答手法、HDOV の L_2 を利用する場合については、提案手法におけるセンサ観測値の集約を行っていることを前提としているため、それぞれ対象となるピアの属する階層の 1 段上の階層に属するすべてのピアへメッセージをフラッディングし、集約情報に基づいてセンサ観測値を返信する．したがって、フラッディングすべき階層に属するピアの総数とメッセージ数が等しくなる．特に、 L_1 に属するすべてのピアへフラッディングする必要のある全ピアのセンサ観測値を収集する場合と境界応答手法は、多くのメッセージがやりとりされるため、システムの制約を考慮した場合適切でないと考えられる．HDA-SN では、メッセージ数は等値線図を再現するために収集したセンサ観測値数に比例する関係にあり、特に指定等値線幅が小さくパラメータ S が小さい場合に非常に多くのメッセージがやりとりされる．したがって、適切なパラメータ S を設定することで、センサ観測値数およびメッセージ数を抑える必要があると考えられる．一方、提案手法は HDA-SN よりもメッセージ数を抑えられており、提案手法が少ないメッセージ数でユーザの要求に応じたセンサ観測値を収集できていることが分かる．

4.2.3 解像度

提案手法の特性を明らかにするために、提案手法によって再現された等値線図の解像度を用いる．なお、解像度 R は次式のように定義する．

$$R = 10 \log_{10}(\max / MNE)$$

MNE (Mean to The N th power Error) は平均 N 乗区間誤差であり、次式で定義する．

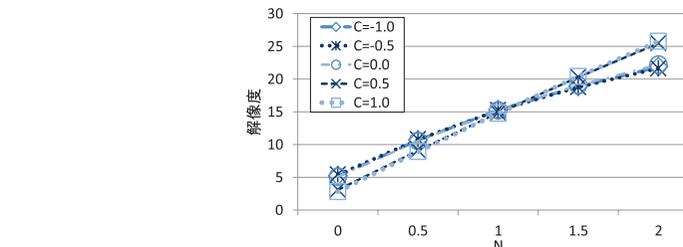


図 9 等値線図の解像度 ($M = 50$)

Fig. 9 The resolution of contour lines map ($M = 50$).

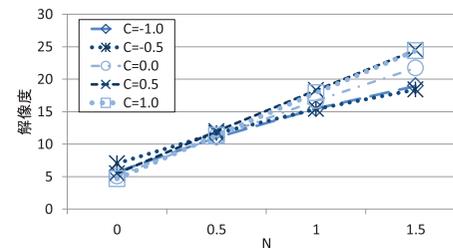


図 10 等値線図の解像度 ($M = 100$)

Fig. 10 The resolution of contour lines map ($M = 100$).

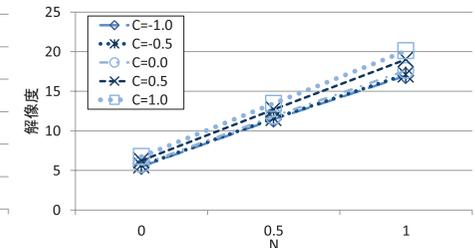


図 11 等値線図の解像度 ($M = 150$)

Fig. 11 The resolution of contour lines map ($M = 150$).

$$MNE = \sum |I_o - I_n|^N / \sum 1$$

\max は等値線図における区間値の最大値であり、 I_o は元の分布から再現された等値線図、 I_n は収集したセンサ観測値に対して空間補間を適用し再現した等値線図である．したがって、 MNE は元の等値線図と再現された等値線図における各画素の区間の誤差を N 乗し平均したものである． N が 0 に近いほど、領域全体に対して正しい位置に等値線が引けている場合に高い値を示し、 N が大きいほど、センサ観測値分布における特徴点を把握できている場合に高い値を示す．なお、 $N = 0$ の場合は、 I_o の区間値と I_n の区間値が等しければ $MNE = 0$ 、異なれば $MNE = 1$ とする．

図 9、図 10、図 11 に指定等値線幅が 10 の場合において提案手法によって再現された等値線図の解像度を示す．図 9、図 10、図 11 はそれぞれ $M = 50, 100, 150$ に設定した場合である．図 9、図 10 に示されるような M が少なく設定されている場合は、 C が負のと

きに N が小さい場合において高い値を示しており、 C が正のときは N が大きい場合に高い値を示している。したがって、 C が負の場合は正の場合と比較して領域全体に対して等値線が正しい位置に引けており、特徴点を退けて等値線図を再現できている。これはすなわち、特徴点を退けて等値線図を再現することで、領域全体の観測値分布の傾向を把握できていることを示している。また、 C が正の場合は特徴点をとりこぼさず等値線図を再現できているが、特徴点を把握可能なセンサ観測値を収集するため、 C が負の場合と比較して領域全体に対して正しい位置に等値線が引けていない。一方、図 11 に示されるような M が多い場合は、すべての N に対して C が正の場合に高い解像度を示している。これは、地理的に一様にセンサ観測値を収集する数が十分多く、特徴点を避けて領域全体に対して正しい位置に等値線を引くよりも、特徴点を把握するためにセンサ観測値を収集した方が、領域全体に対する等値線図の精度に影響を与えたためであると考えられる。以上のことから、特に M が少なく設定される場合は、特徴点の把握に重きを置くか、領域全体に対して正しい位置に等値線を引くかに応じて C の値を変化させることで、それぞれの要求に応じた等値線図が再現できると考えられる。また、 M が十分多く設定される場合は、 C を正に設定することで高精度で等値線図を再現でき、特徴点を避けて等値線図を把握したいという要求がある場合には、 C を負に設定することで対応できると考えらえる。

5. 考 察

提案手法では、システムの制限するセンサ観測値数の範疇で、メッセージ数を抑えつつそれぞれのセンサ観測値分布の把握の仕方に基づいた等値線図を再現可能としている。従来手法ではシステムの制約を超越したセンサ観測値数でセンサ観測値を収集するが、実際にシステムを稼働させるうえではシステムの制約の範疇で等値線図を再現できることは非常に重要であると考えられるため、提案手法の有効性は非常に高いと考えられる。また、 C を変動させることでユーザの観測値分布の把握の仕方に基づいたセンサ観測値を収集できるが、 C とユーザの観測値分布の把握の仕方の対応関係については厳密には議論できていないため、今後は、 C とユーザの観測値分布の把握の仕方の関係性について厳密にする必要がある。たとえば、 C の値が大きいたとしても、対象領域にスパイク点のような狭域の特徴点がある場合、上位階層ピアの集約情報として地理的分散が小さくなり、制約として設定されるセンサ観測値数によってはとりこぼす可能性がある。このようなとりこぼしが要求される解像度として許容されるかどうか等の検討も必要である。

提案手法では、HDOV をクエリの伝送とセンサ観測値の収集に用いた。HDOV は特定の

密度で地理的に一様に分布するピアに対してメッセージを送ることができるという点で提案手法に適しているが、他の地理的なオーバレイネットワークの中にもこの特徴を有するものがある。たとえば、LL-Net⁶⁾ は領域全体を 4 つの四角形の領域に区切っていくことで複数のレベルを持つ階層的なオーバレイネットワークを構築する。この階層構造を利用し、要求される階層レベルの各四角形のうち 1 ピアを選択することで、メッセージを指定領域において地理的に一様に配布する機能が実現できると考えられる。このような他の地理的なオーバレイネットワークへの適用も今後検討していきたいと考えている。

本研究のセンサ観測値の収集手法では 1 つの独立したクエリのみを扱っており、連続的に繰り返されるクエリについて考慮していない。気象観測 (Live E!では 1 分から 5 分の間隔で更新) や、交通観測 (VICS¹⁸⁾ では 5 分間隔で更新) のような比較的緩やかな更新間隔の場合は独立したクエリに対応可能であると考えられるが、よりリアルタイムな状況を把握するには観測値情報の更新はより頻繁に行う必要がある。短時間での計測が必要となる事例として、発達した雨域を観測してから 10 分程度で河川が急激に増水した事例¹¹⁾ が過去にあるが、本提案におけるセンサ観測値の集約においては、このような事象の検出には十分対応可能と考える。さらに、異常を検知した場合に、意図的に集約を行うことで、より短い時間での集約も可能と考えられる。また、このように頻繁に観測値情報が更新される環境下では、時間的な観測値の変化が緩やかな場合に冗長な情報を収集すると考えられるが、時間的な補間などを考慮することで冗長な情報を削減できると考えられる。

6. おわりに

本研究では、P2P センサ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を提案した。提案手法では、階層化ドローンオーバレイネットワーク (HDOV) を利用し、システムの制限の範疇でユーザの要求に応じてセンサ観測値を収集することで、収集するセンサ観測値数を一定とし、収集にかかるメッセージ数を抑えつつユーザの要求に適した等値線図を再現できる。また、いくつかの特徴点を持つセンサ観測値分布を用いて提案手法の有効性を評価した。その結果より、提案手法がシステムの制約の範囲でユーザのセンサ観測値分布の把握の仕方に応じて等値線図を再現できていることを確認した。

本論文の評価は典型的な環境におけるシミュレーションであり、実環境における複雑なセンサ観測値分布に対する評価を行っていない。したがって、実環境に即した様々なセンサ観測値分布のパターンにおいても評価を行い、提案手法が実環境におけるセンサ観測値分布に有効であることを示していく。また、センサ観測値分布の時系列変化を考慮したうえでデー

タ収集手法を改善していく。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金・特定領域研究(18049050)の研究助成、および、NICT・大阪大学共同研究「異種広域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) Aberer, K., Hauswirth, M. and Salehi, A.: Global sensor networks, Ecole Polytechnique Fdrale de Lausanne (EPFL), Technical Report LSIR-REPORT-2006-001 (2006).
- 2) Araújo, F. and Rodrigues, L.: GeoPeer: A location-aware peer-to-peer system, *Proc. 3rd IEEE Int. Symposium on Network Computing and Appl. (NCA 2004)*, pp.39–46 (2004).
- 3) Deshpande, A., Guestrin, C., Madden, S.R., Hellerstein, J.M. and Hong, W.: Model-driven data acquisition in sensor networks, *Proc. 30th Int. Conf. on VLDB*, pp.588–599 (2004).
- 4) 江崎 浩, 砂原秀樹, 相原玲二, 中山雅哉, 松本敏文: Live E!プロジェクト: デジタル百葉箱による自律的な気象データの共有, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, Vol.2006, No.2, pp.“S-31”–“S-32” (2006).
- 5) Fukatsu, T., Hirafuji, M. and Kiura, T.: Massively Distributed Monitoring System Application of Field Monitoring Servers Using XML and Java Technology, *Proc. 3rd Asian Conference for Information Technology in Agriculture*, pp.414–417 (2002).
- 6) 金子 雄, 春本 要, 福村真哉, 下條真司, 西尾章治郎: コビキタス環境における端末の位置情報に基づく P2P ネットワーク, 情報処理学会論文誌: データベース, Vol.46, No.SIG18, pp.1–15 (2005).
- 7) 小西佑治, 竹内 亨, 寺西裕一, 春本 要, 下條真司: P2P 環境におけるセンサ観測値の地理的分布を把握可能なデータ収集手法, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO'07) シンポジウム論文集, pp.165–172 (2007).
- 8) 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).
- 9) Liebeherr, J., Nahas, M. and Si, W.: Application-layer multicasting with Delaunay triangulation overlays, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.20, No.8, pp.1472–1488 (2002).
- 10) Lloyd, C.D.: *Local models for spatial analysis*, CRC Press (2006).
- 11) 中北英一, 山口弘誠, 山邊洋之: レーダ情報を用いたゲリラ豪雨の卵の解析, 京都大学防災研究所年報, Vol.52, No.B, pp.547–562 (2009).
- 12) 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).

- 13) Presser, M., Barnaghi, P.M., Eurich, M. and Villalonga, C.: The SENSEI project: Integrating the physical world with the digital world of the network of the future, *Communications Magazine*, Vol.47, No.4, pp.1–4, IEEE (2009).
- 14) 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, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2010), Vol.2010, No.1, pp.761–768 (2010).
- 15) Teranishi, Y.: PIAX: Toward a framework for sensor overlay network, *Proc. 6th Annual IEEE CCNC Workshop on Dependable and Sustainable Peer-to-Peer Systems*, pp.1–5 (2009).
- 16) Tsuboi, S., Oku, T., Ohnishi, M. and Ueshima, S.: Generating Skip Delaunay Network for P2P Geocasting, *Proc. 6th International Conf. on Creating, Connecting and Collaborating through Computing*, pp.179–186 (2008).
- 17) Willett, R., Martin, A. and Nowak, R.: Backcasting: Adaptive sampling for sensor networks, *Proc. 3rd international symposium on Information processing in sensor networks*, pp.124–133 (2004).
- 18) Yamada, S.: The Strategy and Deployment Plan for VICS, *IEEE Communications Magazine*, Vol.34, No.10, pp.94–97 (1996).

(平成 23 年 4 月 11 日受付)

(平成 23 年 9 月 12 日採録)



四之宮 潤

平成 22 年大阪大学工学部電子情報工学科卒業。現在、同大学院情報科学研究科博士前期課程在学中。P2P ネットワークに関する研究に従事。日本データベース学会の学生会員。



寺西 裕一（正会員）

平成 5 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 7 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。平成 17 年大阪大学サイバーメディアセンター講師，平成 19 年同大学院情報科学研究科准教授，平成 20 年より情報通信研究機構専攻研究員，招へい専門員を兼任，平成 23 年より情報通信研究機構研究マネージャおよび大阪大学サイバーメディアセンター招へい准教授，現在に至る。博士（工学）（平成 16 年 3 月，大阪大学）。マルチメディア情報システム，ユビキタス応用システム等の研究開発に従事。本会論文賞を受賞。IEEE 会員。



春本 要（正会員）

平成 4 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 6 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻助手。平成 11 年大阪大学大型計算機センター講師，平成 12 年同大学サイバーメディアセンター講師を経て，平成 16 年同大学大学院工学研究科助教授（平成 19 年より准教授）となり，現在に至る。博士（工学）（平成 10 年 2 月，大阪大学）。データベースシステム，マルチメディア情報システム等の研究に従事。本会論文賞を受賞。電子情報通信学会，IEEE 各会員。



竹内 亨（正会員）

平成 13 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。平成 15 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。平成 18 年同大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士（情報科学）（平成 18 年 3 月，大阪大学）。同年同研究科マルチメディア工学専攻助手，平成 19 年同助教，平成 21 年情報通信研究機構専攻研究員を経て，平成 23 年日本電信電話株式会社未来ねっと研究所研究主任となり，現在に至る。ソーシャルネットワークおよびオーバーレイネットワークを活用した情報システムの研究開発・展開活動に従事。本会論文賞を受賞。IEEE 会員。



西尾章治郎（フェロー）

昭和 50 年京都大学工学部数理工学科卒業。昭和 55 年同大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。京都大学工学部助手，大阪大学基礎工学部および情報処理教育センター助教授，大阪大学大学院工学研究科教授を経て，平成 14 年より大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻教授となり，現在に至る。平成 12 年より大阪大学サイバーメディアセンター長，平成 15 年より大阪大学大学院情報科学研究科長，平成 19 年より平成 23 年まで大阪大学理事・副学長を歴任。この間，カナダ・ウォータールー大学，ビクトリア大学客員。データベース，マルチメディアシステムの研究に従事。現在，Data & Knowledge Engineering 等の論文誌編集委員。本会では理事を歴任し，論文賞，功績賞を受賞。電子情報通信学会フェローを含め，ACM，IEEE 等 8 学会の各会員。