

階層化ドローンオーバレイネットワークにおける システム制約と特徴点の粒度に基づくセンサ観測値収集手法

四之宮 潤^{†1} 寺西 裕一^{†2,†1}
春本 要^{†1} 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。類似した地理的に近いセンサ観測値は空間補間可能であり、全てのセンサ観測値を収集することは冗長となる。また、精度を維持した上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の制約のもとユーザの要求する粒度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、階層化ドローンオーバレイネットワーク (HDOV) を拡張し、観測値を階層的に集約した上で、要求される粒度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、システム制約の範疇で要求される特徴点の粒度に従った等値線図を再現できることを確認した。

A Sensor Data Collection Method Based on a System Constraint and Granularity of Characteristic Points Using Hierarchical Delaney Overlay Network

JUN SHINOMIYA,^{†1} YUUCHI TERANISHI,^{†2,†1}
KANAME HARUMOTO^{†1} 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. Geographically closed sensor data can be interpolated and it is redundant to collect all sensor data. Although there are methods to reconstruct a contour lines map within some accuracy, they have a possibility to collect

lots of sensor data. Therefore, we propose a sensor data collection method that collects sensor data meeting the requested granularity of characteristic points within a certain number of collected sensor data. In our proposal, messages include the number of collected sensor data are forwarded to the nodes which are suitable for user's requirements by extending hierarchical Delaney overlay network (HDOV). As a result of evaluation, we confirmed that our proposal can reconstruct the contour lines map satisfying the requested granularity of the characteristic point within the system constraint.

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上でも重要となる。こうした要求に対応するため、センサを至る所に配備し、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。例えば、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。Live E! プロジェクト³⁾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、リアルタイム性のある情報を提供しようとしている。こうした環境では、世界中の至る所に存在する大量のセンサデータを扱える必要があるため、全てのセンサデータを1箇所に集約することはストレージコストが大きい。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がねない。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

^{†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

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上では、地理的な観測値分布を把握することが重要となる。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。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。このとき、必要な観測値分布の詳細さはアプリケーションによって異なるため、再現すべき区間幅はアプリケーションから指定されるものとする。区間とは地理的に連続しており同じ意味とみなす観測値の範囲に属する領域である。等値線図において、等値線幅が区間幅に相当する。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情報収集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、得られる情報の多くが無駄となる。また、精度を維持した上で冗長性を排除する従来手法^{4),9)}があるが、精度を保つために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。すなわち、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大きくなる可能性がある。リアルタイム性やユーザビリティの観点では、収集センサ観測値数を一定以下に抑えた上で観測値分布を再現できることが望ましい。しかし、収集センサ観測値数と再現される観測値分布の精度にはトレードオフの関係があり、一定のセンサ観測値数の範囲では観測値分布の精度にも上限が存在し、観測値分布における広域の変動と局所の変動の両者を高い精度で再現することが困難な場合がある。ここで、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に領域全体の分布の傾向よりも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、観測値分布の広域の変動を把握するために粒度の細かい特徴点を排除することで領域全体に対する分布の傾向をできるだけ正しく捉えたいという要求があると考えられる。限られたセンサ観測値数の範囲では、このようなユーザの要求のそれぞれに適した観測値分布を再現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、システムが制限するセンサ観測値数およびユーザが指定する特徴点の粒度をもとに、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囲でユーザの要求を満たすセンサ観測値分布を再現する手法 (HDA-GC: Hierarchical Delaunay-based Aggregation w/ Granularity of Characteristic) 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上で、ユーザが指定する特徴点の粒度に基づいて、HDOV の上位階層から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 階層化ドロネーオーバーレイネットワーク

文献 5) 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ネーオーバーレイネットワーク (HDOV : Hierarchical Delaunay Overlay Network) の構築手法を提案している。HDOV 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ネーオーバーレイネットワーク⁸⁾を構築する。

ドロネー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ネー三角形分割となるオーバーレイネットワークであり、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を構築する。ドロネー三角形分割は、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ボロノイ領域分割と双対な関係にある。ボロノイ領域分割では各点に対してボロノイ領域と呼ばれる領域を定義できる。ある点に対するボロノイ領域とは、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 にドロネー三角形分割とボロノイ領域分割を示す。ここで、実線はドロネー辺、破線はボロノイ境界を表している。ドロネーオーバー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、各ピアはドロネーオーバー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 routing¹²⁾ や compass routing⁶⁾ により実現される。

HDOV では、上位階層のドロネーオーバー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 が与えられた時、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ネーオーバー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

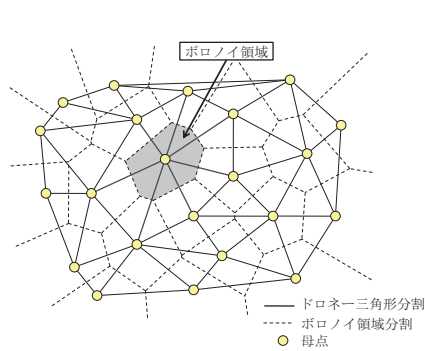


図1 ドローネー三角形分割とボロノイ領域分割

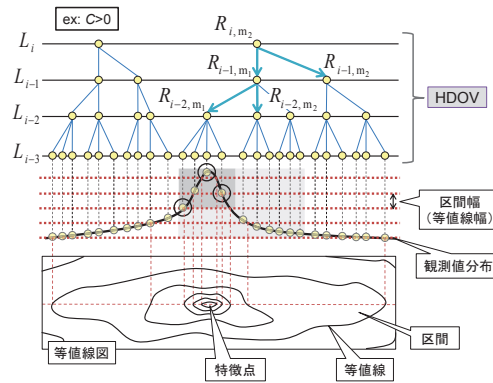


図2 HDA-RCにおけるメッセージフォワード

の分布が地理的に一様なドローネーオーバー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。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-RC

文献10)では、システムが制限するセンサ観測値数の範囲でユーザの要求を満たす等値線図を再現可能な手法(HDA-RC: Hierarchical Delaunay-based Aggregation w/ Resolution of Characteristic)を提案している。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、ユーザの要求に基づいてどの領域にどの程度のセンサ観測値数を割り振るかを決定することで、システム制約の範囲でセンサ観測値を収集する。

HDA-RCでは、HDOVの最上位の階層に存在するピアの内、指定領域とボロノイ領域が交わるピア群に対してシステムが制限するセンサ観測値数を割り振る。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。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。地理的に一様なセンサ観測値は、観測値分布の広域的変動を把握するために収集し、HDOVの階層構造を利用することで収集できる。HDOVのレベル*i*の階層に属するピア*n*は、HDOVの階層構造に沿って集約した情報を利用し、下位階層のピアへユーザの要求するセンサ観測値分布の把握の仕方によって収集するセンサ観測値数 $R_{i,n}$ を以下の式に基づいて割り振る(図2)。

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

m は割り振り対象のピア、 $\text{area}(m)$ はピア*m*のボロノイ領域と指定領域の交わる面積、 $\text{var}(Q)$ はボロノイ領域内におけるピア間のセンサ観測値の傾きの分散、 $S(m)$ はピア*m*のボロノイ領域内における区間数である。 $S(m)$ は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から求められる。HDA-RC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*を指定する。*C*が正の場合、区間数が多く分散の大きい領域、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る。*C*が0に近いほど、面積に依存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る。このように、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、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センサ観測値数の範囲で収集することができる。

しかし、HDA-RCでは特徴点の粒度に関係なく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広域的変動を把握するために粒度の細かい特徴点を排除するなどといった要求に柔軟に対応することができない。したがって、アプリケーションとしては不要な粒度の特徴点に対応する観測値を収集してしまう可能性がある。限られたセンサ観測値数の範囲では、センサ観測値分布の広域的変動および局所的変動の両者を同時に正確に把握することが困難な場合があるため、特徴点の粒度に応じてセンサ観測値の収集ができることが望ましい。また、HDA-RCでは、パラメータ*C*を変化させることで特徴点への割り振りの重みを変化させるが、*C*と再現される観測値分布の関係性を明確にすることが困難である。

3. 提案手法 (HDA-GC)

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、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し、階層を構成する方法については文献 5) 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。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、特徴点の粒度に基づいて、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⁷⁾ 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。このとき、ユーザが指定する粒度未満の特徴点を再現しないために、そのような粒度の特徴点に対応するセンサ観測値の収集を避ける。提案手法では、制限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、センサ観測値の収集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ネーオーバーレイネットワークを構築する時に、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。全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 に属するピアのボ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。 L_i に属するピアは L_{i-1} のドロネーオーバーレイネットワークを利用することで自身のボ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。このリンク構築操作を HDOV における全ての階層間で行う。

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、 $vor(n)$ をピア n のボロノイ領域、 $num(n)$ をピア n の総ピア数、 $min(P)$ をピアの集合 P 内の最小のセンサ観測値、 $max(P)$ をピ

アの集合 P 内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、 $center(P)$ をピアの集合 P の座標の重心、 $f_n[i]$ を L_i に属するピア n から見た $L_j (j \leq i)$ の粒度までの特徴量、 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 のボ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。

$\{I(n)|n \in N_i\}$ は次の要素からなる。

- $vor(n)$
- $num(n)$
- $min(P)$ and $max(P)$, where $P = V_i(n)$
- $ave(P)$ and $center(P)$, where $P = V_i(n)$
- $f_n[i]$

したがって、各ピアは $\{vor(m), num(m), min(Q_m), max(Q_m), ave(Q_m), center(Q_m), f_m[i-1]\}$ 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、ボロノイ領域、総ピア数、ボロノイ領域内のセンサ観測値の最小値、最大値、平均値、ボロノイ領域内のピアの座標の重心、ピアの属する階層からある階層までの粒度の特徴量を集約する。なお、 $f_n[i]$ は $V_i(n)$ から集約する $f_m[i-1]$ を利用し次のように算出する。 L_1 に属するピアは、 $f_n[0] = max(m) - min(m)$ とする。 $L_i (i > 1)$ に属するピア n は、自身のボロノイ領域のセンサ観測値の最大値、最小値を保持しており、 L_i から見た L_{i-1} のセンサ観測値分布の一樣成分を $r_n = (max(m) - min(m)) / (\sqrt{vor(m)} / \sqrt{vor(n)})$ とみなす。この値と $r_m = f_m[i-2]$ を比較し、もし r_m が r_n よりも大きければ L_i から見た L_{i-1} の特徴量として $f_n[i-2] += r_m - r_n$ とする。また、 r_m が r_n よりも小さければ L_{i-1} 以下の粒度の特徴量を無視した一樣成分として $f_n[i-1] += r_m$ とする。このとき、 r_m が r_n よりも大きい場合には、 $f_n[i-1]$ に r_m が r_n よりも小さい場合の r_m の平均値を加える。このようにして L_i の階層から見た L_{i-1} の粒度の特徴量と L_{i-1} 以下の粒度の特徴量を無視した一樣成分を抽出する。さらに、ピア n は L_i から $L_j (1 \leq j \leq i-2)$ の粒度まで見た特徴量を保持するために、それぞれの j について $f_n[j-1] += f_m[j-1]$ のように各階層の粒度までの特徴量を足し、先に求めた $f_n[i-2]$ を足し合わせる。以上の手続きで、 L_i に属するピア n は、自身の階層から見た $L_j (j \leq i)$ の粒度までの特徴量、すなわち、 L_j 未満の特徴点を無視したセンサ観測値分布の複雑さを保持することができる。

図 3 にセンサ観測値の集約の疑似コードを示す。getSensorInfo() は各ピアが持つセンサ観測値の集約手続きであり各ピアが自律分散的に動作する。getSensorInfo() は最上位レベルの

```

verticalLinkTable : 各階層間におけるリンクテーブル
peerSensorInfo : 各レベルにおけるセンサ情報
find_node(id) : id に該当するピアを発見する処理
getSensorInfo() : センサ観測値の集約処理
01 SensorInfo getSensorInfo(level) {
02   if (level = 0)
03     s = sensorData();
04   return new SensorInfo(voronoi(level), 1, s, s, location(), null)
05   else
06     for id in verticalLinkTable[level]
07       r = find_node(id);
08       peerSensorInfo[level][id] = r.getSensorInfo(level - 1);
09       minData = min(peerSensorInfo[level][id].minData, minData);
10       maxData = max(peerSensorInfo[level][id].maxData, maxData);
11       num += peerSensorInfo[level][id].num;
12       average += peerSensorInfo[level][id].num *
13         peerSensorInfo[level][id].average;
13     longitude += peerSensorInfo[level][id].num *
14       peerSensorInfo[level][id].center.getX();
14     latitude += peerSensorInfo[level][id].num *
15       peerSensorInfo[level][id].center.getY();
15     average /= num;
16     center = position(longitude / num, latitude / num);
17   if (level = 1)
18     features[0] = maxData - minData;
19   else
20     for id in verticalLinkTable[level]
21       parentRange = (maxData - minData) *
22         sqrt(peerSensorInfo[level][id].voronoi) / sqrt(voronoi(level));
23       childRange = peerSensorInfo[level][id].features[level-2];
24       if (childRange - parentRange > 0)
25         features[level-2] += childRange - parentRange;
26         cnt++;
27       else
28         features[level-1] += childRange;
29         rangeAverage += childRange;
30       rangeAverage /= (verticalLinkTable.length() - cnt);
31       if (features[level-1] = 0)
32         rangeAverage = parentRange;
33       features[level-1] += cnt * rangeAverage;
34       for (i = level-3; i >= 0; i--)
35         for id in verticalLinkTable[level]
36           features[i] += peerSensorInfo[level][id].features[i];
36         features[i] += features[level-2];
37       return new SensorInfo(voronoi(level), num,
38         minData, maxData, average, center, features);
38 }
    
```

図 3 センサ観測値の集約の擬似コード

全ピアからの関数呼び出しにより実行され、手続きの実行指示は、HDOV の最上位レベルに属するいずれかのピアを起点としたフラッディングにより通知する。各ピアは *peerSensorInfo* という構造に各レベルにおけるセンサ情報を保持しており、*new SensorInfo(voronoi(level), num, minData, maxData, average, center, features)* により、自身のボロノイ領域に存在する 1 段下位層のピアについて、ボロノイ領域 (*voronoi(level)*)、総子ピア数 (*num*)、ボロノイ領域におけるセンサ観測値の最大値 (*minData*)、最小値 (*maxData*)、平均値 (*average*)、ピアの座標の重心 (*center*)、ピアの属する階層からある階層までの粒度の特徴量 (*features*) を集約する。なお、 L_0 では *minData*, *maxData*, *average* が *sensorData()* に等しく、*center* が *location()* に等しい。

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、それに伴い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行っているため、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、高々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。集約に伴いセンサ観測値は頻繁にやり取りされるが、分散処理が行われるため、各ノードは高々 $|V_i(n)|$ 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内、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が指定する特徴点の粒度に基づいて行う。さらに、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の変動を把握するために収集する。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 (num_u) 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。ここで L_i の密度を D_i とする。ユーザから指定領域 (S_{req}) を含むクエリが発行された場合、 $L_i(i : D_i \leq num_u/S_{req})$ の内、最も密な階層 (L_u) を起点として地理的に一様なセンサ観測値を収集する。 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 $n(n \in N_i \cap i > u + 1)$ が $V_i(n)$ に対してセンサ観測値数を割り振る場合、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 $R_{i,n}$ を次式に基づいて割り振る。

$$R_{i-1,m} = R_{i,n} \times \frac{area(m)f_m[g-1]S(m)}{\sum_k area(k)f_k[g-1]S(k)}$$

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。 $S(m)$ はピア m のボロノイ領域における区間数であり、 $min(m)$, $max(m)$ および指定等値線幅から求められる。 g はユーザが指定する特徴点の粒度であり、 L_g の粒度以上の特徴点に対応するセンサ観測値を収集する。ここで、ピア m の属する階層 L_{i-1} が L_g より小さい場合、上式の割り振りは $area(m)$ のみに基づく割り振りとする。なお、ピア n は $V_i(n)$ それぞれの $f_m[g-1]$ を 0 から 1 に正規化した値を用いる。ピア $n(n \in N_i \cap i = u + 1)$ が $V_i(n)$ に対してセンサ観測値数を割り振る場合、 $R_{i,n}$ の割り振りに加えて地理的に一様な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 $num_u/(D_u \times S_{req})$ の商を $V_i(n)$ に割り振る。剰余がある場合には、 $num_u \% (D_u \times S_{req}) / (D_u \times S_{req})$ の確率で $V_i(n)$ に割り振るセンサ観測値数に 1 を足す。ピア $n(n \in N_i \cap i < u + 1)$ が $V_i(n)$ 対

してセンサ観測値数を割り振る場合、地理的に一様にセンサ観測値を収集するために割り振られたセンサ観測値数が1より多ければ、子ピアに対して一様にセンサ観測値数を割り振り、地理的に一様に収集するセンサ観測値数が1になれば、 $R_{i,n}$ に1を足し同様に上式に基づいて割り振る。

このように、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 $m(m \in V_i(n) \cap i \leq u+1)$ 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 $ave(V_{i-1}(m))$ 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 L_0 のピアのセンサ観測値を返信する。

4. 性能評価

4.1 シミュレーション環境

提案手法 (HDA-GC) 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 とし、2500 ピアを格子状に配置する。観測対象は図 4(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 (0~255) に対応する値とする。ここでは、まず、図 4(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 8) 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 PIAX¹¹⁾ 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 2500 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、それぞれ下位階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、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。比較手法として、1 段下の階層の子ピアのセンサ観測値と座標を集約した HDOV および HDA-RC を用いる。

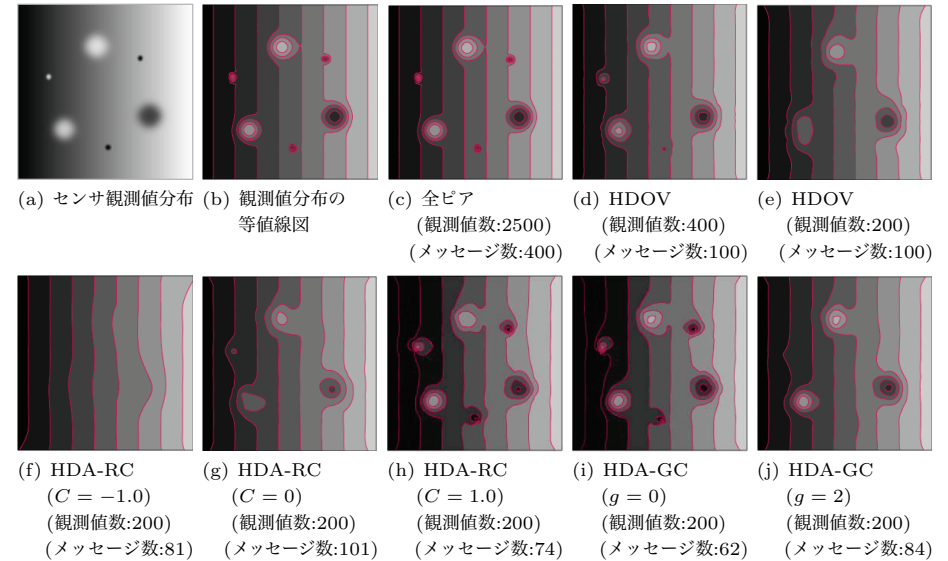


図 4 等値線図 (等値線幅 30)

4.2 評価結果

4.2.1 等値線図

図 4 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 4(b) は図 4(a) のセンサ観測値分布に基づき作成した等値線図であり、図 4(c) は全てのピアのセンサ観測値を収集した場合、図 4(d)、図 4(e) はそれぞれ HDOV を利用し地理的に一様に 400、200 のセンサ観測値を収集した場合、図 4(f)、図 4(g)、図 4(h) はそれぞれ HDA-RC において制限センサ観測値数を 200 (内、地理的に一様に収集するセンサ観測値数: 0, 100, 100), $C = -1.0$, $C = 0$, $C = 1.0$ とした場合、図 4(i)、図 4(j) はそれぞれ HDA-GC において制限センサ観測値数を 200 (内、地理的に一様に収集するセンサ観測値数: 100), $g = 0$, $g = 2$ とした場合である。また、各手法において収集したセンサ観測値およびクエリ発行後に応答を返すべきピアへメッセージが転送されるまでに、ピア間でやり取りされた総メッセージ数を載せる。

全ピア応答は図 4(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高精度であるが、指定領域内の全てのセンサ観測値を収集するため、システムの制約を大きく超えたセンサ観測値を収集する。HDOV を利用し 200 のセンサ観測値を収集した場合、地

理的に一樣にセンサ観測値を収集しているため細粒度の特徴点だけでなく大きい粒度の特徴点についても正確に把握することができていない。地理的に一樣に 400 のセンサ観測値を収集した場合、大きい粒度の特徴点は正確に再現できているが細粒度の特徴点については取りこぼしがある。細粒度の特徴点を把握するためにはさらにセンサ観測値を収集する必要があるが、地理的に一樣にセンサ観測値を収集するため必ずしも細粒度の特徴点を把握できるわけではない。また、そのような場合には特徴点以外の領域で冗長なセンサ観測値を多く収集してしまう。HDA-RC について、 $C = 0$ の場合は地理的に一樣にセンサ観測値を収集するため HDOV を利用し地理的に一樣に 200 のセンサ観測値を収集した場合と同等の等値線図が再現されている。また、 C が負の場合は、特徴点を除いたセンサ観測値分布が再現されており、 C が正の場合は、地理的分散の大きい領域や特徴点が存在する領域のセンサ観測値を収集するため、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できている。しかし、HDA-RC は粒度に関係なくセンサ観測値を収集するため、ある一定の粒度以下の特徴点を除去した等値線図を再現するなどの柔軟なセンサ観測値収集ができない。一方、HDA-GC は指定された特徴点の粒度未満のセンサ観測値を収集しないため、細粒度の特徴点まで把握した等値線図、細粒度の特徴点を除いた等値線図を再現している。限られたセンサ観測値数の範疇では、観測値分布における広域点変動と局所変動の両者を適切に再現することが困難なため、細粒度の特徴点まで把握する場合には特徴点周辺の精度が落ちる可能性がある。細粒度の特徴点を把握しないことで領域全体に対してより正しい位置に等値線が引けるため、センサ観測値分布の概要を把握したい場合などには有効である。

全ピアのセンサ観測値を収集する場合および HDOV は、センサ観測値の集約として自身の一段下の階層の子ピアのセンサ観測値と座標を集約している前提であるため、それぞれ対象となるピアの属する階層の一段上の階層に属する全てのピアへメッセージをフラッディングする。特に、 L_1 に属する全てのピアへメッセージを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は、多くのメッセージがやり取りされるため、システムへの負荷が大きいと考えられる。一方、HDA-RC および HDA-GC はメッセージ数を抑えられており、特に HDA-GC については、システムが制限するセンサ観測値数の範疇かつ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。

4.2.2 SNR

HDA-GC の特性を明らかにするために、再現等値線図の SNR (Signal to Noise Ratio) を用いる。SNR は次式のように定義する。

$$SNR = 10 \log_{10}(\max^N / MNE)$$

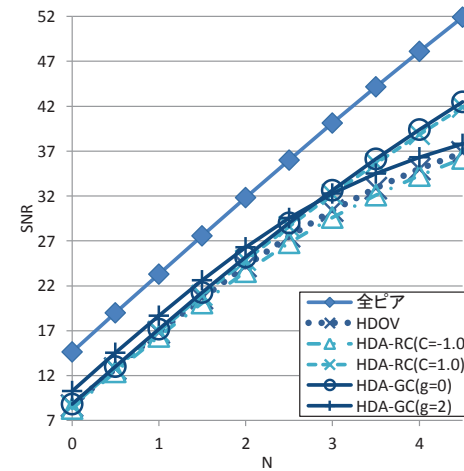


図5 等値線図の SNR (観測値数: 200)

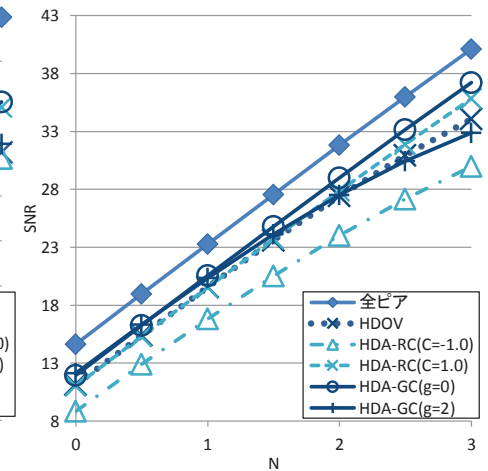


図6 等値線図の SNR (観測値数: 400)

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。

$$MNE = \frac{\sum |I_o - I_n|^N}{\sum 1}$$

\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5、図6に収集センサ観測値数が 200, 400 の場合において各手法によって再現された等値線図の SNR を示す。また、全てのセンサ観測値を収集した場合についても同時に載せている。全てのセンサ観測値を収集する場合、全ての N において高い SNR を示しており高精度の等値線図を再現しているが、システム制約を大きく超えるセンサ観測値を収集してしまう。図5より、他の手法と比較し HDA-GC ($g = 2$) は N が小さい場合に高い SNR を示している。すなわち、不要な細粒度の特徴点を退けてセンサ観測値を収集することで領

域全体に対して正しい位置に等値線を引くことができ、要求される粒度に応じてセンサ観測値を収集することで領域全体の観測値分布の傾向をより正確に把握できていることを示している。一方、 N が大きい場合に高い SNR を示しているのは HDA-GC ($g = 0$) である。すなわち、細粒度の特徴点まで取りこぼすことなく等値線図を再現できていることを示している。また、HDOV や全ての特徴点を把握する HDA-RC ($C = 1.0$) の場合と比較しても HDA-GC ($g = 0$) は高い SNR を示しているため、HDA-GC が効率よく情報収集対象ピアを決定していることがわかる。図 6 に示されるような収集する観測値数が多い場合、小さい N において HDA-GC ($g = 0$) と HDA-GC ($g = 2$) の差が小さくなっている。これは地理的に一様に収集するセンサ観測値数が多くなり、領域全体に対してより正しい位置に等値線を引くことができたためと考えられる。HDA-GC ($g = 0$) と HDA-GC ($g = 2$) の双方が領域全体の傾向を把握できているが、領域全体の傾向を把握したいという要求がある場合には、意図しない細粒度の特徴点を退けて等値線図を再現できることは効果的であるため、HDA-GC ($g = 2$) の優位性はあると考える。また、図 5 と同様に、HDA-GC は HDOV や HDA-RC と比較し高い SNR を示しているため、HDA-GC が効率よく情報収集対象ピアを決定していることがわかる。

5. おわりに

本研究では、大規模センサネットワークにおけるシステム制約と特徴点の粒度に基づくセンサ観測値収集手法 (HDA-GC) を提案した。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) を利用し、システムが制限する収集センサ観測値数の範囲でユーザが要求する特徴点の粒度に応じてセンサ観測値を収集する。提案手法の有効性を評価するために粒度の異なるいくつかの特徴点をもつセンサ観測値分布を用いてシミュレーション評価を行った。その結果より、提案手法がシステム制約の範囲でユーザの指定する特徴点の粒度に応じてセンサ観測値を収集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、制限センサ観測値数、センサ観測値分布、ユーザの指定粒度に応じて、地理的に一様に収集するセンサ観測値数など最適なパラメータ値の導出方法についても今後検討していく必要がある。

謝辞 本研究の一部は、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), Tech. Rep. LSIR-REPORT-2006-001 (2006).
- 2) Araújo, F. and Rodrigues, L.: GeoPeer: A location-aware peer-to-peer system, *Proc. of The 3rd IEEE Int. Symposium on Network Computing and Appl. (NCA 2004)*, pp.39–46 (2004).
- 3) 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).
- 4) 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).
- 5) 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ネー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).
- 6) 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).
- 7) Lloyd, C.D.: Local models for spatial analysis, CRC Press (2006).
- 8) 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ネー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).
- 9) 四之宮潤, 寺西裕一, 春本 要, 竹内亨, 西尾章治郎: 階層化ドロネーオーバーレイネットワークにおける空間補間に適したセンサ観測値収集手法, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.10, pp.2892–2901 (2011).
- 10) 四之宮潤, 寺西裕一, 春本 要, 竹内亨, 西尾章治郎: 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, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.12, pp.3251–3262 (2011).
- 11) Teranishi, Y.: PIAX: Toward a framework for sensor overlay network, *Proc. of the 6th Annual IEEE CCNC Workshop on Dependable and Sustainable Peer-to-Peer Systems*, pp.1–5 (2009).
- 12) Tsuboi, S., Oku, T., Ohnishi, M. and Ueshima, S.: Generating Skip Delaunay Network for P2P Geocasting, *Proc. of the Sixth International Conf. on Creating, Connecting and Collaborating through Computing*, pp.179–186 (2008).