

## 階層化ドロー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の検討

四之宮 潤<sup>†1</sup> 寺西 裕一<sup>†1,†3</sup> 春本 要<sup>†2</sup>  
竹内 亨<sup>\*1</sup> 西尾 章治郎<sup>†1</sup>

本稿では、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それらセンサが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、空間補間のために全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、精度を保つために非常に多くのセンサ観測値を収集する可能性があり、システムへの負荷が大きくなる。そこで、本研究では、収集センサ観測値数およびメッセージ数をシステムサイドで設定し、そのシステム制約の範囲でユーザが要求する観測値分布の把握の仕方に応じた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上で、領域ごとに収集すべきセンサ観測値数をユーザの要求に応じて決定する。シミュレーション評価の結果、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囲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。

### An Examination of Sensor Data Collection Method on Hierarchical Delaunay Overlay Network Satisfying System Constraints

JUN SHINOMIYA,<sup>†1</sup> YUUCHI TERANISHI,<sup>†1,†3</sup>  
KANAME HARUMOTO,<sup>†2</sup> SUSUMU TAKEUCHI<sup>\*1</sup>  
and SHOJIRO NISHIO<sup>†1</sup>

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 sensors 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 decides the number of sensor data to collect for each area, depending on user's requirements for the sensor data distribution by extending hierarchical Delaunay overlay network (HDOV). By our proposal method, 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 point or omitted characteristic point 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上でも重要となる。こうした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ためのプロジェクトが多く存在する。例えば、Live E!プロジェクト<sup>2)</sup>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。フィールドサーバプロジェクト<sup>3)</sup>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等に配置し、屋外における環境モニタリングや、農林水産

<sup>†1</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>†2</sup> 大阪大学 大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Osaka University

<sup>†3</sup> 独立行政法人 情報通信研究機構  
National Institute of Information and Communications Technology

<sup>\*1</sup> 現在、日本電信電話株式会社未来ねっと研究所  
Presently with NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation

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、二酸化炭素濃度等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。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的に現実的ではない。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。ここで、センサの観測値分布はアプリケーションから指定された区間幅で再現されるものとする。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。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。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、収集するセンサ観測値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領域全体の分布の傾向を把握する方法が考えられるが、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。リアルタイム性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元に、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階層化ドロネーオーバーレイネットワーク(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。これにより、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 階層化ドロネーオーバーレイネットワーク

文献6)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<sup>9)</sup>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にドロネー三角形分割とポロノイ領域分割を示す。ここで、実線はドロネー辺、破線はポ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<sup>1)</sup>、範囲検索はgreedy routing<sup>11)</sup>やcompass routing<sup>7)</sup>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ポ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 $\rho$ が与えられた時、面積 $S_{vor}$ のポ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、ポ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

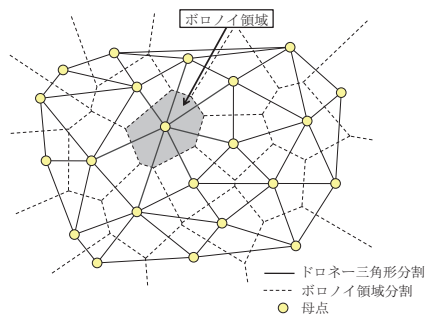


図 1 ドロネー三角形分割とボロノイ領域分割  
Fig. 1 Delaunay Triangulation and Voronoi Cell Segmentation

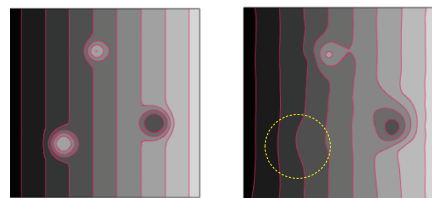


図 2 空間補間による等値線図  
Fig. 2 Contour Lines Maps by Spatial Interpolation

の分布が地理的に一様なドロ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。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取りこぼしていることがわかる。

## 2.2 HDA-SN

文献 10) 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。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、それぞれのピアが一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、等値線と等値線と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、特徴点を取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、上位階層のピアは一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してことで、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、特徴点を取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もクエリを転送し、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。

## 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。各ピアは P2P ネットワークとして HDOV を構築することを想定する。また、ここでは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<sup>8)</sup> などが

ある．本研究では，観測データの持つ空間的相関性にしがって，空間を代表する広域的な変動と特徴点のような局所的な変動の両者を適切にモデル化可能なクリギングを補間法として用いる．クリギングは地球統計学分野を中心に用いられる補間法であり，地盤沈下量や地下水位の予測などのほか，地価推定など，非常に多岐にわたる分野で利用されている．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．

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リアルタイム性などを考慮し，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，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内に存在する  $L_{i-1}$  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  $L_{i-1}$  のドロネーオーバーレイネットワークを利用して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て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て， $L_{i-1}$  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， $C(n)$  を  $n$  の位置する座標， $D(n)$  を  $n$  の観測値， $num[i]$  を  $L_i$  における子ピアの数とする．また， $center(P)$  をピアの集合  $P$  の座標の重心， $min(P)$  をピアの集合  $P$  の内の最小のセンサ観測値， $max(P)$  をピアの集合  $P$  の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， $var(P)$  をピアの集合  $P$  のセンサ観測値の地理的分散とする．さらに， $N_i$  を  $L_i$  に属するピアの集合， $V_i(n)$  を

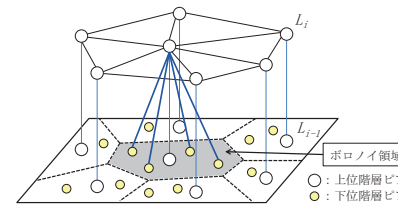


図 3 HDOV の階層間におけるリンク構築  
Fig. 3 Construction of the Links between the Layers

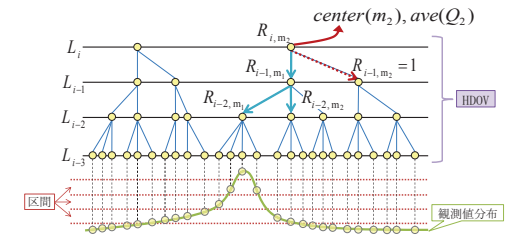


図 4 センサ観測値数の収集  
Fig. 4 Collection Of Sensor Data

$L_i$  に属するピア  $n$  のポロノイ領域内に存在する  $L_{i-1}$  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．

$\{I(n)|n \in N_i\}$  は次の 6 つの要素からなる．

- (1)  $C(n)$  and  $D(n)$
- (2)  $num[i - 1]$
- (3)  $center(P)$ , where  $P = N_{i-1} \cap V_i(n) \cup \{n\}$
- (4)  $min(P)$  and  $max(P)$ , where  $P = N_{i-1} \cap V_i(n) \cup \{n\}$
- (5)  $ave(P)$ , where  $P = N_{i-1} \cap V_i(n) \cup \{n\}$
- (6)  $var(P)$ , where  $P = N_{i-1} \cap V_i(n) \cup \{n\}$

したがって，各ピアは  $\{C(m), D(m), num[i - 1], center(Q), min(Q), max(Q), ave(Q), var(Q)\}$  の集合を集約する．ここで， $m \in N_{i-1} \cap V_i(n)$ ， $Q = N_{i-2} \cap V(m)$  である．すなわち，自身のポ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，ポロノイ領域内のピアの座標の重心，ポ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，それに伴い空間における特徴も変化する．HDOV は常時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なやり取りしているため，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．

### 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 の最上位層に存在するピアの内、指定領域とポ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ポ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収集する 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  $n(n \in N_i \cap L_i > L_u)$  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  $m$  のポロノイ領域と指定領域の交わる面積である。 $S(k)(k \in V_i(n))$  はポロノイ領域内における区間数であり次式で与えられる。

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

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  $C$  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。また、 $C$  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。なお、 $C$  が負の場合は、 $S(k) = 1$  を  $S(k) = 2$  とみなす。これは、等値線を正しい位置に引くという観点から、等値線を跨ぐ領域におけるセンサ観測値を収集することが重要であるためである。ピア  $n(n \in N_i \cap L_i \leq L_u)$  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全てを  $R_{i,n}$  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。

## 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  $300 \times 300$  とし、2,500 ピアを格子状に配置する。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 ~ 255) に対応する値とする。図 5(a) に示すように、センサ観測値分布にはいくつかの特徴点が存在する分布を用いる。

HDOV は 5 階層で構築され、全ピアから構成される  $L_0$  は 2500 ピアでドロネーオーバー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、ドロネーオーバー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。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、 $300 \times 300$  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<sup>5)</sup>、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。境界応答手法では、ドローンオーバーレイネットワークを構築している環境の下、クエリを受信したピアが隣接ピアとセンサ観測値を比較し、等値線の境界に位置していると判断したピアのみが応答することで、冗長なピアの応答を削減しつつ精度の高い等値線図を再現することができる。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て等値線図を作成したものであり、図 5(c) は全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よいが、これらの手法はそれぞれ 2500, 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

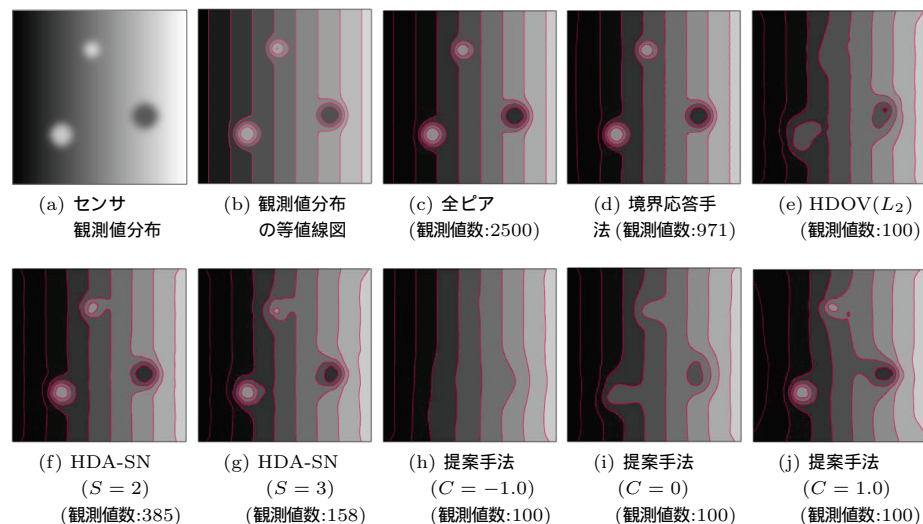


図 5 等値線図 (等値線幅 30)

Fig. 5 Reconstructed Contour Lines Map

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  $S = 2$  の場合は精度がよい。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、提案手法では予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 メッセージ数

図 7 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

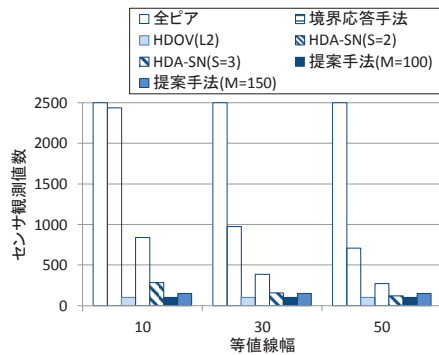


図 6 センサ観測値数

Fig. 6 The Number of Collected Sensor Data

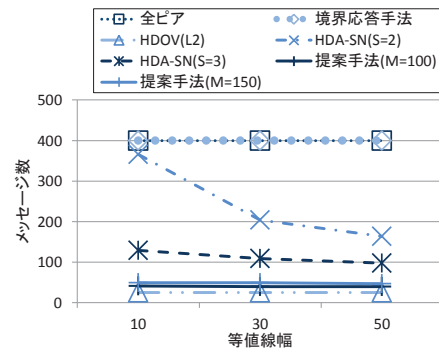


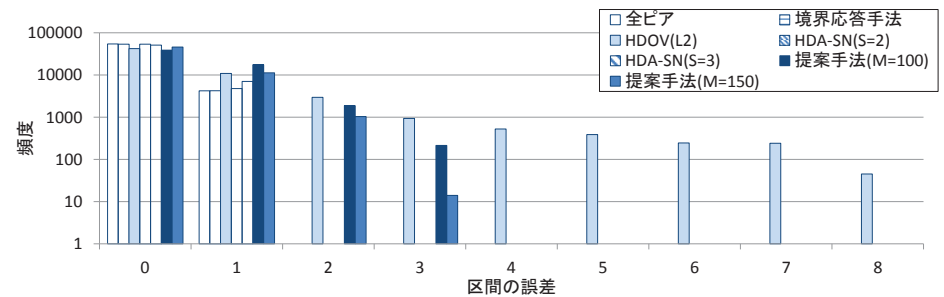
図 7 メッセージ数

Fig. 7 The Number of Messages

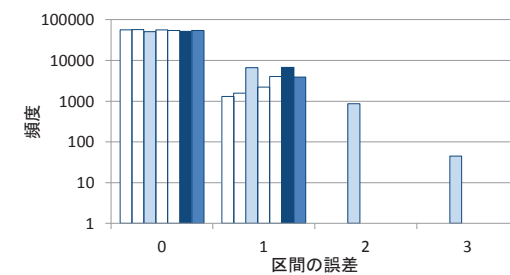
やり取りされる総メッセージ数の評価結果を示す．全ピアのセンサ観測値を収集する場合，境界応答手法，HDOV の  $L_2$  を利用する場合については，提案手法におけるセンサ観測値の集約を行っていることを前提としているため，それぞれ対象となるピアの属する階層の一段上の階層に属する全てのピアへメッセージをフラッディングし，集約情報に基づいてセンサ観測値を返信する．したがって，フラッディングすべき階層に属するピアの総数とメッセージ数が等しくなる．特に， $L_1$  に属する全てのピアへフラッディングする必要のある全ピアのセンサ観測値を収集する場合と境界応答手法は，多くのメッセージがやり取りされるため，システムの制約を考慮した場合には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取りされる．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わかる．

#### 4.2.3 区間の誤差

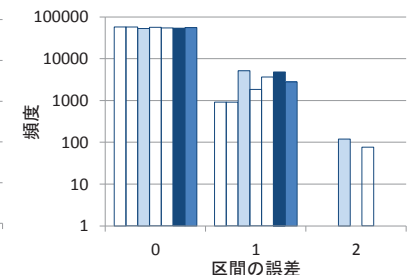
図 8 に，センサ観測値分布から得られる等値線図と各手法によって再現された等値線図において，各画素の区間の誤差を算出したときの各誤差に対する頻度を示す．区間の誤差が 0 であればその画素は正しく再現されていることを意味する．なお，HDA-SN が特徴点を把握するという観点から，提案手法では特徴点を把握するために  $C = 1.0$  の場合について



(a) 等値線幅：10



(b) 等値線幅：30



(c) 等値線幅：50

図 8 区間の誤差

Fig. 8 The Number of Segment Error

評価し， $M = 100, 150$  としている．図 8(a)，図 8(b)，図 8(c) はそれぞれ指定等値線幅が 10，30，50 の場合における区間の誤差とその頻度について示している．

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，全ての等値線幅において区間の誤差が 1 以下であり，再現された等値線図の精度がよい．しかし，図 6，図 7 からわかるように，収集するセンサ観測値数およびメッセージ数が非常に多く，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については，区間の誤差が大きい場合に高い頻度を示しており，空間における特徴を取りこぼしていることがわかる．HDA-SN において， $S = 2, S = 3$  の双方について，特に指定等値線幅が小さい場合には区間の誤差を抑えられており，空間における特徴を把握できていることがわかる．しかし，図 6，図 7 より収集するセンサ観測値数お

よびメッセージ数が多いため、システムの制約を考慮した場合適していないと考えられる。\$S\$ が大きく指定等値線幅も大きい場合には、HDOV の \$L\_2\$ を利用する場合と同程度の誤差を示しており、特徴点を取りこぼしていることがわかる。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\$ を設定することで、再現される等値線図の精度を保ちつつ、センサ観測値数やメッセージ数を抑える必要がある。一方、提案手法では、予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比較すると、いずれの等値線幅についても提案手法が区間の誤差を抑えられており、再現される等値線図の精度がよい。したがって、提案手法が効率よくセンサ観測値を収集できていることがわかる。また、等値線幅が 30 の場合について、提案手法と HDA-SN において \$S = 3\$ と設定した場合を比較すると、収集センサ観測値数および区間の誤差とその頻度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。

#### 4.2.4 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\$ は次式のとおり定義する。

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

\$MNE\$ (Mean to The \$N\$th power Error) は平均 \$N\$ 乗区間誤差であり、次式のとおり定義する。

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

\$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

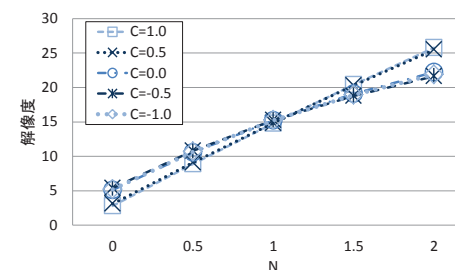


図 9 等値線図の解像度 (\$M = 50\$)

Fig. 9 The Resolution of Contour Lines Map (\$M = 50\$)

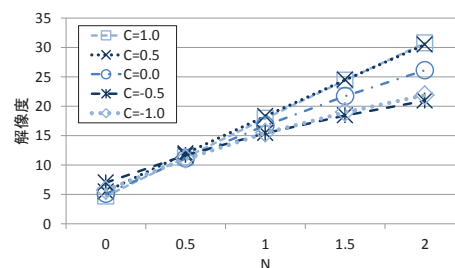


図 10 等値線図の解像度 (\$M = 100\$)

Fig. 10 The Resolution of Contour Lines Map (\$M = 100\$)

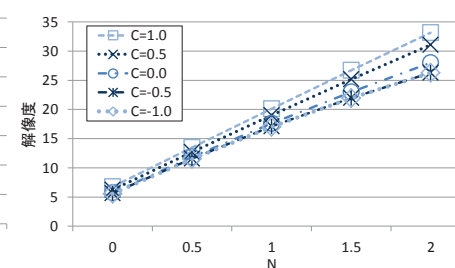


図 11 等値線図の解像度 (\$M = 150\$)

Fig. 11 The Resolution of Contour Lines Map (\$M = 150\$)

である。図 9、図 10 に示す通り \$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取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 に示す通り \$M\$ が多い場合は、全ての \$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囲で、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上ではシステムの制約の範囲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高いと考えられる。しかし、 $C$  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、 $C$  が小さい場合の評価を定量的に行えていないため、今後は、 $C$  が小さい場合についての定量的評価を行う必要がある。

また、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ー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。例えば、LL-Net<sup>4)</sup> 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もつ階層的なオーバー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内 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ーレイネットワークへの適用も今後の検討課題である。

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 (VICS<sup>12)</sup> 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。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、時間的な補間等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、階層化ドロネーオーバーレイネットワーク (HDOV) を利用し、システムの制限の範囲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も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上でデータ収集手法を改善、および、実環境におけるセンサデータを利用した評価についても今後取り組みたい。

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) 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).
- 2) 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).
- 3) Fukatsu, T., Hirafuji, M. and Kiura, T.: Massively Distributed Monitoring System Application of Field Monitoring Servers Using XML and Java Technology, *Proc. of the Third Asian Conference for Information Technology in Agriculture*, pp.414-417 (2002).
- 4) 金子 雄, 春本 要, 福村真哉, 下條真司, 西尾章治郎: コピ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).
- 5) 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).
- 6) 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).
  - 7) 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).
  - 8) Lloyd, C.D.: Local models for spatial analysis, CRC Press (2006).
  - 9) 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).
  - 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, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2010), Vol.2010, No.1, pp.761–768 (2010).
  - 11) Tsuboi, S., Oku, T., Ohnishi, M. and Ueshima, S.: Generating Skip Delaunay Network for P2P Geocasting, *Proc.the Sixth International Conf.on Creating, Connecting and Collaborating through Computing*, pp.179–186 (2008).
  - 12) Yamada, S.: The Strategy and Deployment Plan for VICS, *IEEE Communications Magazine*, Vol.34, No.10, pp.94–97 (1996).