

# インタラクティブなセンサデータ閲覧のためのオンライン空間集約手法

白石 陽<sup>†</sup> 安西祐一郎<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 慶應義塾大学理工学部情報工学科 〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

E-mail: †{siraisi,anzai}@ayu.ics.keio.ac.jp

あらまし センサネットワークから提供されるセンサデータを効果的にユーザに提示するためには、地図データとの統合処理やセンサデータ間の空間補間などの空間集約処理が有用である。また、集約処理の結果を閲覧をする際のインタラクティブ性や実時間性を考慮することも重要である。本稿では、インタラクティブにセンサデータを閲覧するためのオンライン空間集約手法を提案する。本手法は、サーバより提供されるセンサデータに対して、領域ごとに空間集約処理を行い、インクリメンタルに処理結果を表示する。具体的には、ポリゴンデータとの空間統合および空間補間に基づくメッシュ統合のためのインクリメンタルな集約アルゴリズムを実装し、その実行結果を示す。

キーワード センサデータ統合, センサネットワーク, 空間情報統合, 空間集約, 視覚化

## An Online Spatial Aggregation Method for Interactive Sensor Data Browsing

Yoh SHIRAIISHI<sup>†</sup> and Yuichiro ANZAI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Information and Computer Science, Faculty of Science and Technology, Keio University

Hiyoshi 3-14-1, Kohoku, Yokohama, Kanagawa, 223-8522

E-mail: †{siraisi,anzai}@ayu.ics.keio.ac.jp

**Abstract** Global environmental information provided by distributed sensor networks is useful for various kinds of location-oriented applications. Spatial aggregation methods such as spatial integration with map data and spatial interpolation between sensor data are effective in interactive and flexible browsing of widely distributed sensor data. We thus propose an online spatial aggregation method for interactive sensor data browsing. Our method incrementally aggregates sensor data provided by sensor data servers based on location information and shows the aggregated results for each decomposed region.

**Key words** sensor data browsing, sensor network, spatial information integration, spatial aggregation, visualization

### 1. ま え が き

近年、センサネットワークに対する関心が高まっている [1]。モバイルコンピューティングやユビキタスコンピューティングの分野では、位置センシングや無線センサネットワークに関する研究 [2], [3] が多数行われているが、データベースの分野においても、センサデータストリームやセンサデータベースに関する研究 [4] ~ [6] が注目されつつある。さらに、気象、天気、河川に関するセンサデータを公開しているウェブサイトも存在し、センサネットワークが提供する様々なセンサデータをオンラインで利用できる環境が整いつつある [7] ~ [10]。

気象情報、渋滞情報、混雑状況、大気の状態など、センサネットワークにより提供される多種多様なセンサデータは、ユーザの周囲の環境の状態を把握する上で非常に有用である。地理的に広範囲に分布した大量のセンサデータを閲覧する場合には、各センサデータの値を見るよりも、位置情報に基づいて、複数の関連するセンサデータを加工し、抽象度の高いデータとして

提供することが有用であると考えられる。本稿では、このようなセンサデータを抽象度の高い表現に変換することを「センサデータの空間集約」と呼ぶ。センサデータの空間集約の具体例としては、センサデータ同士の空間補間や地図データなどの空間データとセンサデータのマッピングなどが挙げられる。単なる表示レベルの統合ではなく、データレベルの統合、さらには意味的な統合を行うための枠組みが必要である。

空間集約のアルゴリズムは、計算幾何学の手法や空間結合 (spatial join) の手法とも深く関連し、対象とするオブジェクト数が多いほど処理コストが問題となる。また、広範囲に設置されたセンサネットワークからネットワークを介して取得したセンサデータを用いて統合処理を行う際には、データ探索やデータ転送、データ統合の処理コストが大きくなり、集約結果を提示するまでの応答時間が問題となる。結果として、ユーザの待ち時間が増大し、インタラクティブ性を実現する上で問題となる。集約処理途中のインタラクティブな操作やデータ要求を実現するためには、ユーザの理解しやすい形で集約の途中結果を

提示することが効果的であると考えられる。さらに、どのように統合するデータを提供するかという問題も重要であり、空間集約のしやすい順序でデータを提供することが望ましい。

本稿では、ネットワークを介したインタラクティブなセンサデータ閲覧を実現するための要素技術として、複数のサーバからオンラインで提供されるセンサデータの空間集約手法を提案する。本手法は、問合せ領域を考慮して提供されるセンサデータを、位置情報に基づきインクリメンタルに空間集約処理を行い、その処理結果を領域ごとに段階的に表示することができる。文献[11]の中で、我々はセンサデータをインクリメンタルに提供することに着目したが、本稿では、その議論を進め、受信したセンサデータをどのように集約し、その結果をユーザに提供するかという問題を扱う。本稿では、空間集約の具体例として、(1) ポリゴンデータとセンサデータの空間統合、(2) 空間補間に基づくセンサデータのメッシュ統合を取り上げ、それぞれに対してインクリメンタルな空間集約アルゴリズムを実装し、それらのアルゴリズムを利用したセンサデータ閲覧システムを構築する。

以下、2.章で、我々のアプローチについて述べ、3.章でセンサデータ閲覧のための空間集約手法について説明する。4.章で、実験結果を示し、提案手法の有用性を考察する。最後に5.章で結論を述べる。

## 2. アプローチ

### 2.1 センサデータ閲覧システム

既存の WWW 上のセンサデータ公開システムでは、センサデータの分布を地図とともに画像情報として提供したり、画像上のノードをクリックすると時系列推移などの詳細なデータを閲覧できるようにするなど様々な工夫を用いている[7]~[10]。しかしながら、ユーザにとって利用しやすい、すなわちアプリケーションプログラムが各種の加工を行いやすい形式で、それらのセンサデータが提供されているわけではない。例えば、地図データなどの空間データをネットワークを介して取得し、センサデータと統合することができれば、空間データ統合に基づく柔軟なセンサデータ閲覧システムが実現できると考える。国土数値情報ダウンロードサービス[12]で取得できる行政界、道路、鉄道、河川、土地利用などの多種多様な空間データや、G-XML[13]で表現された相互運用性を見据えた空間データは、テキスト形式で表現され、センサデータとの統合処理がしやすいデータであると考えられる。

一方、地理情報システムの分野では、空間補間(空間内挿, spatial interpolation)という手法が様々な地理情報処理に利用されている。これは、「地理データは場所に関連し、近いデータほど関連性が高い」[14]という性質を利用して、ある地点の地理データを周辺の地理データから推論するものである。空間補間の手法としては、IDW(Inverse Distance Weighted)、スプライン、クリギングなど様々な手法が提案されている[14],[15]。空間補間の手法を用いることにより、離散的な地理データを連続的なデータへと変換することができる。このような空間集約の手法は、センサデータを閲覧する上でも視覚的な効果が大きいと考

え、空間補間に基づくセンサデータ統合のアルゴリズムの実装を一つの目的とする。

### 2.2 空間データのインクリメンタルな提供

ネットワークを介して空間データを検索する際の応答時間の増大に対処するために、我々は“anytime algorithm”[16],[17]に基づくインクリメンタルな空間データ提供手法を提案している[18]。anytime algorithm は、時間とともに処理品質を単調に増加させ、処理の途中に何らかの中間結果を出力できる性質を持つ。文献[18]では、空間データ検索の処理品質をデータの収集率として定義し、空間データを管理するサーバがクライアントに対してインクリメンタルに検索の中間結果であるデータを提供することで処理品質を向上させている。

これにより、クライアントは、すべての探索が終了する前に何らかの検索結果を受信することができるため、受信した途中結果を利用して統合処理を開始し、その結果をインクリメンタルに提示することも可能であり、検索時のデータ探索やデータ転送のコストが大きい場合に有用である。途中結果の提供順序は空間インデックスなどのサーバ側のデータ構造に依存するため、必ずしもクライアント側で処理のしやすい順序でデータが提供されるとは限らないが、文献[18]では、領域分割に基づき空間インデックスの探索を制御することにより、問合せ領域を考慮したインクリメンタルなデータ提供を実現している。

### 2.3 センサデータのインクリメンタルな提供

文献[11]で、我々は、前述のインクリメンタルな空間データ提供手法を発展させ、異種のセンサデータを提供するセンサネットワークが多数混在する環境での、センサデータ統合のためのインクリメンタルなデータ提供方式を提案している。この方式はセンサネットワークのラッパーであるセンサデータサーバと、仲介エージェントから構成され、仲介エージェントが問合せ領域を考慮してクエリを分割し、サーバでの各サブクエリの実行とサーバからの検索結果の転送を制御することにより、分割領域ごとに同期させてクライアントに提供することを実現している。

クライアントは、分散サーバからのセンサデータを領域ごとに逐次的に受信し、ユーザの指定した順序で優先度の高い領域のデータから統合処理を開始することができる。広範囲にわたる時系列センサデータの集約演算の結果を表示する場合には、要求した時系列の長さ按比例して応答時間が増大するが、ユーザの興味のある範囲から順番に統合結果を表示させることができれば、その結果に基づいて表示範囲の拡大や新たな領域に対するデータ要求を行うなどセンサデータ統合の結果をインタラクティブに閲覧することができると考えられる。

## 3. センサデータのオンライン空間集約手法

### 3.1 システム構成

本稿では、センサデータの空間集約手法を提案し、センサデータ閲覧システムの機能として実装する。本閲覧システムは、文献[11]で提案したセンサデータ提供システムからセンサデータを受信し、文献[18]で提案した空間データ提供システムから空間データを取得する。いずれのデータも XML を用いて表現

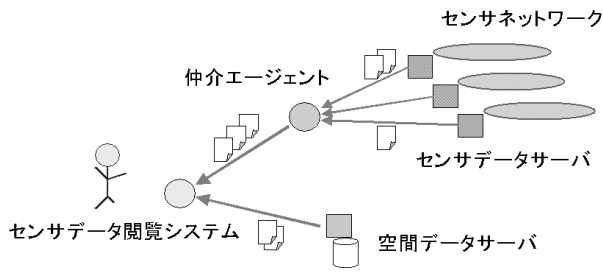


図1 データ提供システムの構成  
Fig.1 A data providing system

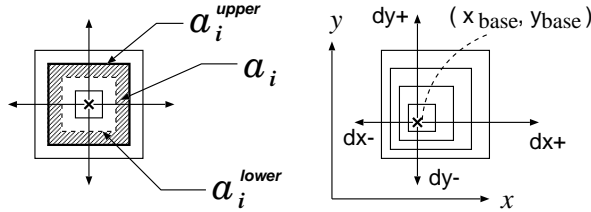


図2 問合せ領域の分割と空間制約 (文献 [11], [18])  
Fig.2 Query region decomposition and spatial constraints

され、領域ごとにインクリメンタルに提供される。データ提供システムの構成を図1に示す。

センサデータサーバは、各センサネットワークのラッパーとして機能し、センサノードの位置情報を保持するためのテーブル (location table) と、各ノードから提供されるセンサデータを時系列として管理するための時系列データテーブルを持つ。仲介エージェントは、クライアントからセンサデータサーバに対するクエリを受信すると、各センサデータサーバ (すなわち、センサネットワーク) に関するメタ情報に基づいて、クエリの条件を満たすセンサデータサーバを探し出し、そのサーバにクエリを転送する。各サーバからの検索結果は、仲介エージェントを介して、クライアントに転送される。空間データサーバは、基本的な幾何データである点 (point)、線 (line)、ポリゴン (polygon) を管理し、クライアントからの範囲検索に対して、それらの幾何データを提供することができる。データ提供システムの詳細については、文献 [11], [18] を参照されたい。

### 3.2 空間集約のためのクエリと領域分割

センサデータ閲覧システムは、式 (1) で表現されるクエリを要求する。

$$Q = \langle A, DT, TI, SC \rangle \quad (1)$$

$DT$  は、クライアントが要求するセンサデータの種類からなる集合である。 $TI$  は、下限値  $t_{min}$  および上限値  $t_{max}$  によって定まる時区間表現である。 $A$  には、問合せ範囲を示す領域表現が記述される。 $SC$  (空間制約) は問合せ領域の分割方法を指定するためのパラメータであり、このパラメータに基づいて、問合せ領域は、図2の左図のように互いに重なり合わない領域に分割される。これらの分割領域を順序付けることで、検索結果の転送順序が決定される。

分割領域  $a_i$  は、式 (3), (4) の関係を満たす2つの領域表現

$(a_i^{upper}, a_i^{lower})$  の差分領域として、式 (2) のように表現される。

$$a_i = \begin{cases} a_i^{upper} - a_i^{lower} & \text{for } i > 1 \\ a_i^{upper} & \text{for } i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$a_i^{lower} \subset a_i^{upper} \quad (3)$$

$$a_i^{lower} = a_{i-1}^{upper} \quad (4)$$

空間制約の表現として、文献 [11], [18] では、図2の右図に示すように、矩形問合せ領域に対して、分割の基準点  $(x_{base}, y_{base})$  と各座標軸方向の拡大幅  $(dx_+, dy_+, dx_-, dy_-)$  を指定する方法を実装している。各パラメータの指定によって、様々な領域分割 (領域拡大) が可能であり、本稿でも、この分割方法を採用する。

### 3.3 アルゴリズムの概略

本稿では、空間集約の例として、センサデータと地図データの空間統合および空間補間に基づくセンサデータのメッシュ統合を取り上げるが、いずれの場合も以下の概略に従う。

#### (1) データ統合の準備

空間統合の場合は地図データの取得、空間補間の場合はメッシュの生成が必要となる。

#### (2) 受信データを用いた中間結果の計算

受信データとしては、観測データのスナップショットや時系列データなどが考えられる。時系列データの場合は、時系列データ集約の結果を中間結果の計算に利用する。計算した中間結果は、統合対象である地図データやセルと関連付けて記憶する。

#### (3) 分割領域ごとの集約処理の完了と集約結果の表示

集約の完了に必要なデータが収集されているかどうかを、データ収集領域と比較することで判定する。この処理により、集約結果を領域ごとにインクリメンタルに表示することができる。

以下、3.4 と 3.5 で、空間統合と空間補間の具体的なアルゴリズムについて説明する。

### 3.4 空間データ統合アルゴリズム

#### 3.4.1 センサデータとポリゴンデータの統合

受信したセンサデータとポリゴンデータをインクリメンタルに統合する手順について説明する。

##### 1. 空間データオブジェクトを取得する。

まず、空間データサーバからネットワークを介して空間データ (ポリゴンデータ) を取得する。空間データは、空間データオブジェクト  $p$  の集合であり、 $p$  に対する幾何データを  $p.geom$ 、その包囲矩形を  $p.rect$  と表記する。

##### 2. OVERLAP\_LIST を作成する。

分割領域  $a_i$  と関連する空間データオブジェクトのリストを、 $OVERLAP\_LIST_i$  とする。 $OVERLAP\_LIST_i$  の要素  $p_{i,j}$  について、 $(p_{i,j}.geom \cap a_i) \neq \phi$  が成り立つ。すべての領域  $a_i$  について、 $OVERLAP\_LIST_i$  を作成する。

3. 分割領域  $a_i$  ( $1 \leq i \leq N$ ,  $N$  は分割数) に対するセンサデータを受信するたびに、次の処理を繰り返す。

3.1. 領域  $a_i$  に対する検索結果を  $RESULT\_LIST_i$  に保持し、その構成要素であるセンサデータオブジェクト  $o_{i,k}$  について、

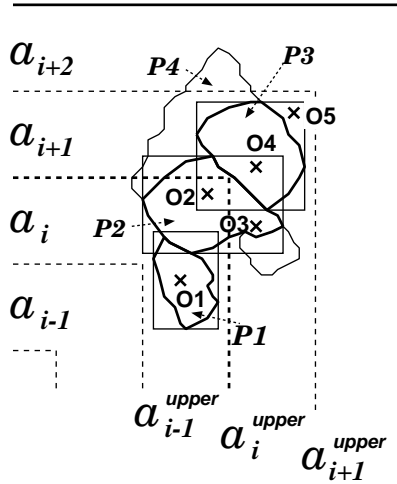


図3 領域分割に基づくポリゴンデータとの統合  
Fig. 3 Integration with polygon data based on region decomposition

[3.1.1], [3.1.2]の処理を行う。この時、 $o_{i,k} (\in RESULT\_LIST_i)$  について、 $o_{i,k} \subseteq a_i$  が成り立つ。

3.1.1. 領域  $a_i$  に関連する空間データオブジェクトのリスト  $OVERLAP\_LIST_i$  の構成要素  $p_{i,j}$  の中から、 $o_{i,k}$  を含むものを探し出す。この際、 $p_{i,j}$  の包囲矩形と  $o_{i,k}$  とを比較し、 $o_{i,k} \subseteq p_{i,j}.rect$  が成り立つ場合に、 $p_{i,j}$  の幾何データとの比較を行う。 $o_{i,k} \subseteq p_{i,j}.geom$  が成り立つ時、[3.1.2]の処理を行う。成り立たない場合には、他の空間データオブジェクトとの包含関係を調べる。

3.1.2.  $o_{i,k}$  を含む空間データオブジェクト  $p_{i,j}$  の属性として、 $o_{i,k}$  が持つ値を用いて中間結果を計算する。例えば、各ポリゴンに含まれるセンサデータの平均値を求めたい場合には、それまでの加算値とセンサデータオブジェクトの合計数を保持する。

3.2. [3.1]で、 $RESULT\_LIST_i$  の構成要素を用いて中間結果の計算を行った後、次の処理を行う。

3.2.1.  $OVERLAP\_LIST_i$  の構成要素 ( $p_{i,n}$ ) を順番に調べる。

3.2.2. 各リストの要素の中で、 $p_{i,n} \subseteq a_i^{upper}$  を満たす空間データオブジェクト  $p_{i,n}$  について、保持している中間結果を用いて集約結果を計算し、その結果を表示する。したがって、ポリゴンデータを包含する領域のセンサデータが収集されるまでは、そのポリゴンデータの集約演算は完了することはない。

ここで、図3を用いて前述のアルゴリズムの説明を補足する。分割領域  $a_i, a_{i+1}$  について着目すると、ポリゴンデータオブジェクト  $P1, P2, P3, P4$  について、 $\{P1, P2, P4\} \in OVERLAP\_LIST_i$ 、 $\{P2, P3, P4\} \in OVERLAP\_LIST_{i+1}$ 、センサデータオブジェクト  $O1, O2, \dots, O5$  については、 $\{O1, O2\} \in RESULT\_LIST_i$ 、 $\{O3, O4, O5\} \in RESULT\_LIST_{i+1}$  である。

まず、領域  $a_i$  に対する検索結果を受信すると、 $O1, O2$  について  $O1 \subseteq P1$ 、 $O2 \subseteq P2$  が成り立つため、それぞれ  $P1, P2$  の中間結果の計算に利用される。この時、 $P1 \subseteq a_i^{upper}$  が成り立つので、 $P1$  に対する集約処理は完了する。一方で、 $P2 \subseteq a_i^{upper}$  は成り立たないため、 $P2$  に対する集約処理は、 $a_i$  の結果受信時

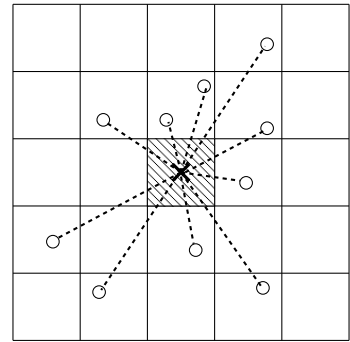


図4 IDWに基づくメッシュ統合  
Fig. 4 Mesh integration based on IDW

には完了しない。

次に、 $a_{i+1}$  に対する検索結果を受信すると、 $O3 \subseteq P2$  が成り立つので  $P2$  の中間結果が計算され、さらに、 $P2 \subseteq a_{i+1}^{upper}$  が成り立つので  $P2$  の集約処理を完了させることができる。 $P3$  の包囲矩形 ( $P3.rect$ ) に  $O2, O4, O5$  が含まれるが、 $O2, O5$  は、 $P3.geom$  には含まれないため、 $O4$  のみを利用して  $P3$  に対する中間結果が計算される。 $O2$  については、 $a_i$  の検索結果を受信時に既に処理されているため、この時点で計算に利用されることはない。 $P4$  は、 $a_i, a_{i+1}, a_{i+2}$  のそれぞれと重なり合うが、 $a_i, a_{i+1}$  に対する検索結果受信時には中間結果の計算だけを行い、 $a_{i+2}$  に対する結果を受信した時に集約処理を完了する。

### 3.5 センサデータの空間補間アルゴリズム

#### 3.5.1 Inverse Distance Weighted (IDW)

本稿では、空間補間 (空間補間) の手法として、IDW (Inverse Distance Weighted) [14], [15] を採用する。IDW は、ある地点の値を推論するために、近接した複数の点のデータを利用する。近接点  $i$  の値を  $z_i$ 、 $z_i$  に対する重みを  $w_i$  とする時、地点  $x$  の値  $z(x)$  は式 (5) で与えられる。

$$z(x) = \frac{\sum_i w_i z_i}{\sum_i w_i} \quad (5)$$

$w_i$  は、点  $x$  と点  $i$  の間の距離  $d_i$  を用いて、式 (6) のように定義される。

$$w_i = 1/d_i^2 \quad (6)$$

セルの中心点に関するデータを周囲のセンサデータで補間し、この処理をすべてのセルに対して行うことで、IDWに基づくメッシュ統合を実現できる (図4)。

通常、IDW では、空間補間に利用する点を選ぶ際に、最低限必要な点の個数 (min.point) と、点探索の範囲を限定する半径 (max.radius) をパラメータとして指定する。IDW では原理的に、式 (6) の重み付けの定義からわかるように、遠くのデータは近くのデータより計算結果に対する影響力が小さいため、これらのパラメータを指定し、利用する近接点データ数を制限しても、十分に空間補間を行うことができる。本稿では、点探索の範囲を限定するために、半径の代わりに、空間補間に利用する周囲のセルを決めるパラメータ ( $max\_cell$ ) を導入する。空間補間の対象となるセル内部の点に加えて、 $max\_cell$  個外側のセルに含まれる

点を計算に利用する． $max\_cell = 1$  の時は，対象とするセルと外側の 8 個のセル， $max\_cell = 2$  の時は，さらに外側の 16 個のセルを加えた合計 25 個のセルを計算対象とする． $max\_cell = 0$  の時は，対象とするセルの内部の点だけを利用する．補間したいセル ( $c$ ) を 2 点の座標  $(x_{min}, y_{min})$ ， $(x_{max}, y_{max})$ ，メッシュのセルのサイズを  $(size_x, size_y)$  とする時，2 点の座標  $(x_{min} - size_x \times max\_cell, y_{min} - size_y \times max\_cell)$ ， $(x_{max} + size_x \times max\_cell, y_{max} + size_y \times max\_cell)$  で定まる矩形領域に含まれるすべてのセルが計算対象になる．本稿では，この矩形領域を  $cover\_rect(c)$  と表記する．

### 3.5.2 IDW に基づくメッシュ統合

受信したセンサデータを用いてインクリメンタルに IDW に基づくメッシュ統合を行う手順について説明する．

1. メッシュデータを生成する．

1.1. 指定したセルサイズのメッシュを，問合せ領域  $A$  を覆うように生成する．

1.2. 各セルを分割領域  $a_i$  と対応付け， $CONTAIN\_LIST_i$  の構成要素とする．この時， $CONTAIN\_LIST_i$  の要素であるセル  $c_{i,j}$  について， $c_{i,j} \subseteq a_i^{upper}$  および  $\neg(c_{i,j} \subseteq a_i^{lower})$  が成り立つ．

2. 分割領域  $a_i$  のセンサデータを受信することに，以下の処理を繰り返す．

2.1. 領域  $a_i$  に対して受信した検索結果を  $RESULT\_LIST_i$  に保持し，その構成要素であるすべてのセンサデータオブジェクト  $o_{i,k}$  について， $o_{i,k}$  を含むセル  $c_{i,j}$  を探し出す． $o_{i,k} \subseteq c_{i,j}$  満たす場合に， $c_{i,j}$  の属性として，各センサデータオブジェクトに対して観測値および位置情報を保持する．

2.2.  $a_1$  から  $a_i$  までのセルリスト  $CONTAIN\_LIST_m (1 \leq m \leq i)$  ごとに，各リストの構成要素であるすべてのセル  $c_{m,n} (\in CONTAIN\_LIST_m)$  について，セル  $c_{m,n}$  の計算に必要なセルを包含する矩形領域  $cover\_rect(c_{m,n})$  が  $a_i^{upper}$  に含まれるかどうか調べる． $cover\_rect(c_{m,n}) \subseteq a_i^{upper}$  が成り立つ時，式 (5)，(6) に基づきセル  $c_{m,n}$  の値を計算し，最終的な集約結果として表示する (図 5)．

図 5 に示すように，IDW に基づきセル  $c$  の値を計算する場合には， $c$  に加えて周辺セルに含まれるセンサノードの値も利用する必要があるため， $c$  に関するセンサデータの収集が完了しただけでは，集約結果を計算することができない．そこで，セル  $c$  の計算に利用する周辺セルに関するセンサデータの収集が完了してから，最終的な集約結果を計算している．

## 4. 実験および評価

本節では，Java 言語により実装したセンサデータ閲覧システムを用いた実験の結果についてまとめる．

### 4.1 実験データ

本稿の実験では，センサデータとして気象データ CD-ROM 「アメダス観測年報 2000 年」(気象庁提供，気象業務支援センター [19] 発行)，空間データとして国土数値情報 [12] の行政界・海岸線データから抽出したポリゴンデータを利用した．

アメダス観測年報 CD-ROM では，気温や降水量，風向・風速

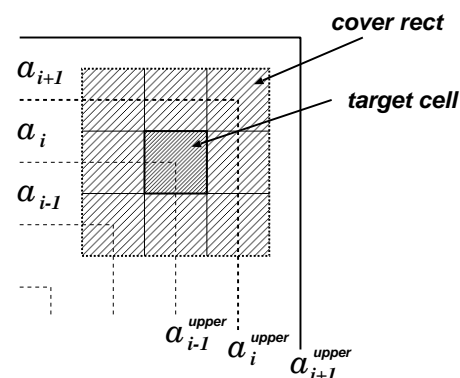


図 5 セルの集約計算のための領域判定

Fig. 5 A condition for completion of aggregation of the target cell

などの 1 年分の観測データが 1 時間ごとに各観測点ごとに記録されており，実際のセンサノードの分布を反映したセンサデータとして利用できる．

### 4.2 ユーザインタフェース

実装したセンサデータ閲覧システムは，マウスによるスライダーの操作により，表示範囲を拡大，縮小，移動させることができ，地図データだけでなく，統合結果の縮尺を柔軟に切り替えることができる．また，マウスのドラッグによる領域選択により，選択した領域に合わせて，表示範囲を拡大 / 移動することができる．これらのユーザインタフェース機能は，動的にクエリを要求し，インタラクティブにセンサデータを閲覧する上で必要不可欠である．

### 4.3 実行例

本節の実験では，センサデータとしてアメダスの気温データを利用する．センサデータは，単体のセンサデータサーバによって時系列データとして管理されている．なお，以降の実験でクエリ ( $Q$ ) のパラメータとして指定する問合せ領域 ( $A$ ) および空間制約 ( $SC$ ) の単位は，度である．

#### 4.3.1 センサデータとポリゴンデータの統合

まず，気温データとポリゴンデータとを統合する場合について実験を行った．本節の実験では，空間データとして国土数値情報より抽出した都道府県レベルのポリゴンデータを利用し，各ポリゴンに含まれる気温データの平均値を統合結果として表示する．問合せ領域  $A_{rect,1} = \langle 123, 24, 146, 46 \rangle$ ，空間制約  $SC = \{(x_{base}, y_{base}) = (123, 24), dx_+ = dy_+ = 2.0\}$  をクエリに指定した時の，空間データとの統合に基づく気温分布を，問合せ領域の分割の様子とともに，図 6，図 7 に示す．

図 6 → 図 7 より，指定した空間制約に基づいて問合せ領域が分割され，基準点 (問合せ領域の左下端点) に近い領域から右上方向 (つまり，北東方向) に向かって，インクリメンタルに統合結果が表示されていることがわかる．

#### 4.3.2 空間補間に基づくメッシュ統合

次に，IDW に基づくメッシュ統合を行った時の実験結果について示す．問合せ領域として， $A_{rect,1}$  の部分領域  $A_{rect,2} = \langle 135.93317, 32.760353, 142.75441, 39.33327 \rangle$  をマウスのドラッグにより選択し，分割の基準点を  $A_{rect,2}$  の左下 (南西) 端点



図 6 空間データ統合に基づく気温分布の途中結果  
Fig. 6 An intermediate result of spatial data integratin for temperature data

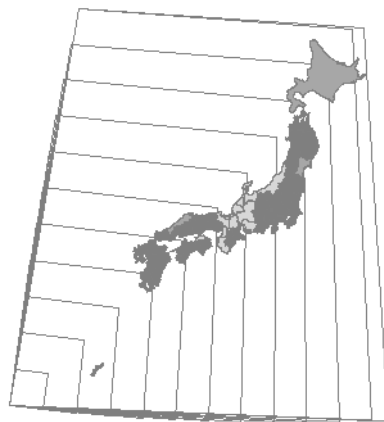


図 7 空間データ統合に基づく気温分布  
Fig. 7 A result of spatial data integratin for temperatute data

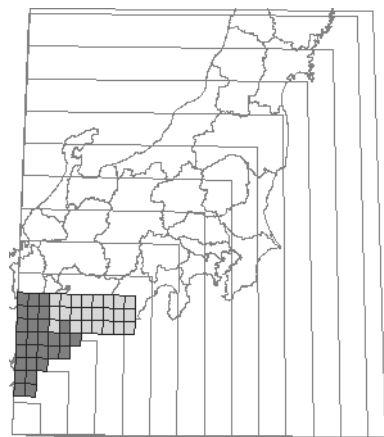


図 8 IDW に基づくメッシュ統合による気温分布の途中結果  
Fig. 8 An intermediate result of mesh integration based on IDW

として、分割幅を  $dx_+ = dy_+ = 0.5$  とした時の気温分布を図 8, 図 9, 図 10 に示す。メッシュの各セルの大きさは 0.2 度四方である。

前節の空間データ統合の場合と同様に、図 8 → 図 9 → 図 10 に示すように、基準点に近い場所からデータ統合の完了した領域が時間とともに拡大し、インクリメンタルなメッシュ統合が実現できていることがわかる。この例では、前節の実験で用い

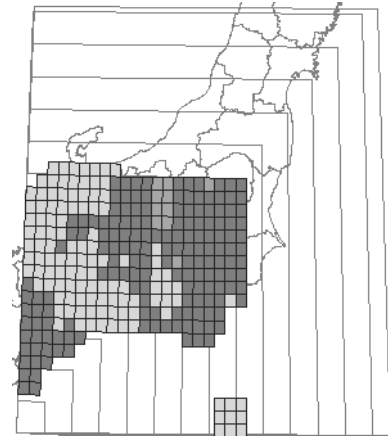


図 9 IDW に基づくメッシュ統合による気温分布の途中結果  
Fig. 9 An intermediate result of mesh integration based on IDW

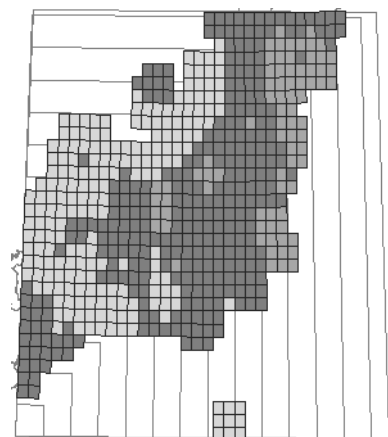


図 10 IDW に基づくメッシュ統合による気温分布の表示  
Fig. 10 A result of mesh integration based on IDW

た都道府県レベルのポリゴンデータを背景データとして利用している。

IDW のパラメータは  $max\_cell = 1$  であり、対象とするセルと周辺の 8 個のセルに含まれるセンサデータを利用して、空間補間を行っている。センサデータを連続的な分布として表現できるため、全体的な傾向を理解しやすいと考える。

#### 4.3.3 空間集約方法の比較

さらに、問合せ領域として  $A_{rect,2}$ (図 10) の部分領域  $A_{rect,3} = \langle 138.52538, 34.516792, 141.06485, 37.109722 \rangle$  をマウスドラッグにより選択した時の IDW に基づくメッシュ統合の結果を図 11 に示す。図 12 に、この時の受信センサデータの分布を示す。

図 11 では、セルの大きさが 0.1 度四方であり、図 10 と比較すると、縮尺に応じて見やすいセルの大きさが異なることがわかる。また、図 12 に示すように、センサノードの分布が非常に疎であるため、集約演算に必要なデータを確保するために、 $max\_cell = 2$  と、図 10 の場合より多い 25 個のセルを計算対象としている。

図 11, 図 10 は、同一分布のセンサデータを用いた異なる縮尺でのセンサデータ集約の結果であるが、集約の階層や粒度が異なる場合には、視認性の良いメッシュ統合を行うために、セ

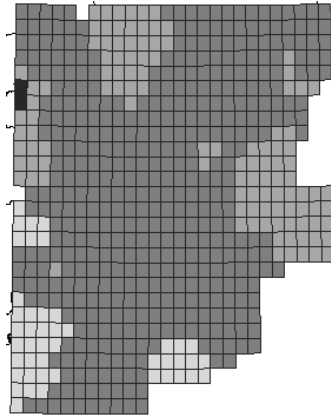


図 11 IDW に基づくメッシュ統合による気温分布の表示

Fig. 11 A result of mesh integration based on IDW for focused region

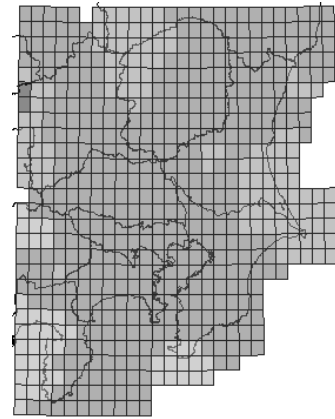


図 14 透明度を利用したメッシュ統合による気温分布の表示

Fig. 14 A result of mesh integration with transparency

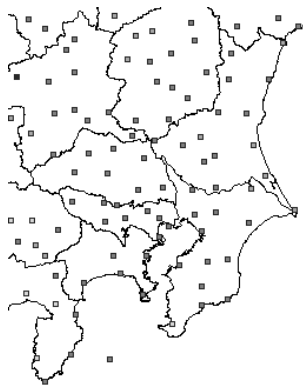


図 12 センサデータの点分布

Fig. 12 A distribution map of temperature data based on node's location

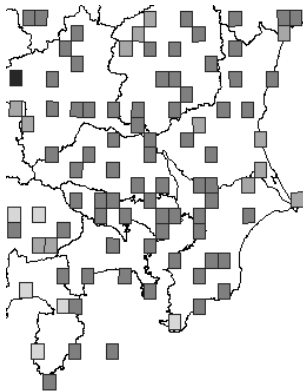


図 13 単純なメッシュ統合による気温分布の表示

Fig. 13 A result of simple mesh integration for temperature data

ルの大きさやセルの値を計算するためのデータ数などのパラメータの決定が重要である。今回の実験では、各セルの大きさを閲覧システムのユーザが決定しているが、今後の課題として、セルの大きさをセンサデータの密度に応じて適応的に変化させることが挙げられる。

図 13 は、図 11 と同一のメッシュに対して、文献 [11] で実装している単純なメッシュ統合を行った場合の結果である。

文献 [11] では、各セルに含まれるセンサデータのみを用いて、それらの平均値を計算し、そのセルの値としている。しか

し、このような単純なメッシュ統合のアルゴリズムでは、センサデータの分布密度が表示範囲に対して低く、セルの大きさが小さい場合には、値を持たないセルが多数出現することになる。単なるセンサデータの分布と比べても、空間集約の方法として有用であるとは言えない。それに対して、本稿で実装した IDW に基づくメッシュ統合の手法は、離散的に分布したセンサデータを連続的な面分布として捉えることができるので、全体の傾向を把握する上で効果的である。より細かい分布を持つセンサデータが利用できれば、IDW に基づくメッシュ統合の結果に基づいて、より詳細なデータ表示に切り替えることも可能であると考えられる。

また、領域を考慮したインクリメンタルなメッシュ統合手法は、図 8、図 9、図 10 に示されるように、空間データとの対応関係を確認しながら統合結果を閲覧できるという点も、インタラクティブなセンサデータ統合システムを実現する上で有用であると考えられる。一方で、すべての統合処理を完了した時には、図 12、図 13 で、背景である県境や海岸線データとの対応関係が理解しやすい反面、図 11 のように対応する空間データが把握できないという側面もある。

これに対する解決策としては、描画されている集約結果の透明度を切り替えるという手法が考えられる。図 14 は、その一例であり、図 11 と同様に全体的なセンサデータの分布傾向だけでなく、空間データとの対応関係も把握することができる。

#### 4.4 関連研究

インクリメンタルにデータを提供するアプローチは、ユーザへの情報提供という点で効果的であり、Web 検索の部分的な結果を生成できる問合せ処理システムや途中結果を利用したオンラインの集約処理に関する研究も行われている [20], [21]。"online aggregation" [21] では、集約演算の対象となるデータが逐次的に提供され、受信データを利用した処理の結果が、集約の途中結果として信頼度とともに提示される。CONTROL project [22] では、online aggregation に基づく様々なアプリケーションが構築されている。例えば、アメリカ合州国の各州に関する統計データを利用したシステムでは、各州ごとの集約処理の途中結果が、各州に対応するポリゴンデータの表示に反映さ

れ, Web コンテンツ中のインターレース GIF やプログレッシブ JPEG のように, 表示情報が時間とともに段階的に詳細化されていく.

インクリメンタルに処理結果を提供するその他の方法としては, 地図データの階層性に着目する方法や地図データの詳細度に着目する手法も考えられる. 地理情報システムや地図ソフトウェアでは, 道路, 鉄道, 行政界などの地図データが別々のレイヤーとして管理されており, 文献 [23] では, ベクター形式の地図データをレイヤーの順序で提供する手法を提案している. 文献 [24] で, 筆者らは, 詳細度の異なる階層的な地図データに対して, 抽象度の高い地図データを提供し, 外形を表示した後で, 詳細な地図データを領域を考慮してインクリメンタルに提供する手法を提案している.

データベースの分野では, 多数のセンサからデータを収集し, 統合処理を行うための問合せ手法やセンサデータベースシステムに関する研究が行われており, 特に, センサからのストリームデータを対象とした研究が盛んに行われている [4]~[6]. センサデータストリームと言った場合, 各センサノードから連続的に送信されるデータの流れを指す. センサデータストリームに関する研究では, 連続して受信するセンサデータに対する他のテーブルデータとの結合 (join) 演算や集約 (aggregation) 演算を対象とした研究が多い. しかし, モバイルコンピューティングや地理情報システムなどの位置情報システムでの利用を考えた場合には, 空間データとしての性質を考慮した空間集約手法が必要であり, 関係データベースにおける結合・集約演算より, 計算幾何や空間結合 (spatial join) の分野で提案されている手法 [25]~[27] のように空間データ処理に特化した手法が効果的であると考えられる. その点で, 本稿で扱うセンサデータの集約処理は, センサデータストリームに関する研究が対象としているものとは異なる.

## 5. む す び

本稿では, ネットワークを介してオンラインで提供されるセンサデータをインタラクティブに閲覧するためのインクリメンタルな空間集約手法を提案した. 本手法は, 分割領域ごとに提供されるセンサデータを, 空間データ統合や空間補間などのアルゴリズムを用いて領域ごとに集約処理を行い, その集約結果をインクリメンタルに表示することができる. これにより, オンラインでの集約処理途中で部分的なセンサデータ集約の結果を閲覧できる. 領域を考慮した途中結果の提供は, 集約のためのデータ収集やデータ統合のコストが高い場合に有用であると考えられる. 例えば, 本実験では, 空間統合の対象として, 都道府県レベルのポリゴンデータを対象としたが, より詳細なポリゴンデータとの統合を行う場合には, ポリゴン数が増加し, 統合のための計算コストが大きくなると考えられる. また, 表示範囲内のセンサノード数が多い (すなわち, センサノードの密度が高い) 場合や, 空間集約の対象である時系列データの長さが大きい場合にも, 同様に計算コストが高くなると考えられる.

また本稿では, センサデータをユーザの理解しやすい形式に加工・抽象化するために, 計算幾何学や地理情報科学の手法に

基づく集約アルゴリズムを実装した. 空間集約の手法を用いることで, 単なる点の分布という表現から, 面的な連続性のあるデータ分布を表示することが可能となり, センサデータ分布の全体的な傾向を把握する上で, 効果的であると考えられる. さらに, 領域という意味のあるまとまりで, インクリメンタルに集約結果が提示されることは, 集約処理の途中に閲覧システムに対するインタラクティブな操作を実現する上で重要である.

## 文 献

- [1] センサがネットにつながれば. 日経エレクトロニクス, No. 826, pp. 99-129, 2002.
- [2] The SCADDS Project. <http://www.isi.edu/scadds/>.
- [3] The WebDust Project. <http://www.cs.rutgers.edu/dataman/webdust/>.
- [4] Philippe Bonnet, Johannes Gehrke, and Praveen Seshadri. Towards Sensor Database Systems. In *Proceedings of 2nd International Conference on Mobile Data Management*, pp. 3-14, 2001.
- [5] Samuel Madden and Michal J. Franklin. Fjording the Stream: An Architecture for Queries Over Streaming Sensor Data. In *Proceedings of 18th International Conference on Data Engineering*, pp. 555-566, 2002.
- [6] The Aurora Project. <http://www.cs.brown.edu/research/aurora>.
- [7] 国土交通省 川の防災情報. <http://www.river.go.jp/>.
- [8] 大気汚染物質広域監視システム. <http://w-soramame.nies.go.jp/>.
- [9] IWATE・UNU・NTT 環境ネットワーク共同プロジェクト. <http://www.mcon.ne.jp/iwate/summit/index.html>.
- [10] 防災気象情報サービス. <http://www.tenki.or.jp/>.
- [11] 白石陽, 安西祐一郎. 位置情報に基づくセンサデータ統合のための逐次データ提供方式. データベースと Web 情報システムに関するシンポジウム (DBWeb2002), pp. 153-160, 2002.
- [12] 国土数値情報ダウンロードサービス. <http://www.nla.go.jp/ksj/>.
- [13] G-XML. <http://gisclh01.dpc.or.jp/gxml/>.
- [14] Paul A. Longley, Michael F. Goodchild, David J. Maguire, and David W. Rhind. *Geographic Information Systems and Science*. John Wiley & Sons, Ltd.
- [15] Jill McCoy and Kevin Johnston. ArcGIS Spatial Analyst ユーザーズ・ガイド. ESRI, 2001.
- [16] Mark Boddy and Thomas Dean. Solving Time-Dependent Planning Problems. In *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 979-984, 1989.
- [17] Shlomo Zilberstein and Stuart Russel. Optimal composition of real-time systems. *Artificial Intelligence*, Vol. 82, No. 1-2, pp. 181-213, 1996.
- [18] 白石陽, 安西祐一郎. 空間検索のためのインクリメンタルなデータ提供手法. 情報処理学会論文誌: データベース, Vol. 42, No. SIG 15 (TOD 12), pp. 15-29, 2001.
- [19] 財団法人 気象業務支援センター. <http://www.jmbc.or.jp/>.
- [20] Jayavel Shanmugasundaram, Kristin Tufte, David J. DeWitt, Jeffrey F. Naughton, and David Maier. Architecting a Network Query Engine for Producing Partial Results. In *Proceedings of the Third International Workshop on the Web and Databases (WebDB 2000)*, pp. 17-22, 2000.
- [21] Joseph M. Hellerstein, Peter J. Haas, and Helen J. Wang. Online Aggregation. In *Proceedings of ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pp. 171-182, 1997.
- [22] CONTROL Projects. <http://control.cs.berkeley.edu/projects.html>.
- [23] Michela Bertolotto and Max J. Egehofer. Progressive Transmission of Vector Map Data over the World Wide Web. *GeoInformatica*, Vol. 5, No. 4, pp. 345-373, 2001.
- [24] Yoh Shiraiishi and Yuichiro Anzai. Incremental Spatial Data Providing for Internet GIS. In *International Symposium Asia GIS (CD-ROM Proceedings)*, 2001.
- [25] 伊理正夫. 計算幾何学と地理情報処理 第 2 版. 共立出版, 1999.
- [26] 浅野 哲夫 (訳). コンピュータ・ジオメトリ 計算幾何学: アルゴリズムと応用. 近代科学社, 2000.
- [27] Philippe Rigaux, Michel Scholl, and Agnès Voisard. *Spatial Databases with Application to GIS*. Morgan Kaufmann, 2001.