

都市センシングデータに基づく 経路推薦のための空間補間手法の提案と実装

伊藤 嘉博¹ 中村 嘉隆² 高橋 修² 白石 陽^{2,a)}

受付日 2012年5月14日, 採録日 2012年11月2日

概要: 多数のセンサを実世界に配置することで時空間的に細かい単位(細粒度)のセンサデータを取得できるようになり, この技術の応用として都市センシングが注目されている. 都市センシングの活用により, 細粒度の都市環境情報を反映した歩行者ナビゲーションの実現が期待される. センサデータに基づく歩行者ナビゲーションを実現するためには, 経路推薦を目的としたものに限らず, 都市環境の把握など別目的で設置されたセンサネットワークからも, 経路推薦に必要な情報を収集できることが望まれる. しかし, それらはセンサノードの電源確保などの問題から都市環境に十分な密度で設置することが難しいため, この疎密度なセンサノードの設置状況を考慮し, 道路に対して重みとして反映することが必要となる. そこで本論文では, 道路単位でのセンサデータの空間補間を行い, その結果に基づいて経路推薦結果を提供する手法とシステムを提案する. 提案手法を備えたシステムは空間補間を利用し, 道路単位でのセンサデータを補間, 重み付けを行い, 経路推薦を行う機能を持つ. 本研究では実際に都市に設置されたセンサの観測データを利用して, 提案手法を備えたシステムの性能について検討する.

キーワード: センサネットワーク, 都市センシング, 経路推薦, 歩行者ナビゲーション, 空間補間

Spatial Interpolation Method for Route Recommendation Based on Urban Sensing Data

YOSHIHIRO ITO¹ YOSHITAKA NAKAMURA² OSAMU TAKAHASHI² YOH SHIRAISHI^{2,a)}

Received: May 14, 2012, Accepted: November 2, 2012

Abstract: We can collect granular sensor data by a lot of sensors attached to a sensor network in real world. This technology has been used for urban sensing. It is expected that urban sensing realizes personal navigation based on urban sensing data. To realize route recommendation based on sensor data, it needs to use sensor network that gather environmental data. However, it is difficult to set sensor node in near road in the high density because of cost and the problem of electric source. From this reason we need the method to allocate environmental data on road as cost in consideration of sensor nodes density. This paper proposes a method and system that includes the function for interpolate sensor data on the road data by using spatial interpolation and the function for providing the routing result based on sensor data. In addition, we discuss the effectiveness of our proposed system by using actual sensor data in urban area.

Keywords: sensor network, urban sensing, route recommendation, pedestrian navigation, spatial interpolation

1. はじめに

センサデバイスの小型化によって実世界の環境情報を容易に取得できる環境が整ってきていることにより, 様々な用途のセンサネットワークが構築されてきている. その活用例の1つとして注目されている試みとして, 都市内に配

¹ 公立はこだて未来大学大学院システム情報科学研究科
Graduate School of Systems Information Science, Future
University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

² 公立はこだて未来大学システム情報科学部
School of Systems Information Science, Future University
Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

a) siraisi@fun.ac.jp

置したセンサによって都市の環境情報をモニタリングする都市センシングの研究活動が進められている [1], [2], [3]. これにより, 従来は気象や大気汚染など広範囲かつ密度が粗いセンサデータしか利用することができなかったが, 近年では都市クラスの中で時間的かつ空間的に細かい単位(細粒度)で計測されたセンサデータが収集可能になっている [4], [5]. これにともない, 都市センシングによって収集されたセンサデータから新しい都市内歩行者ナビゲーションが実現可能になると期待されている [6]. 屋根の有無や勾配など, 固定的な環境情報は経路推薦に現在活用されている事例 [7] はあるが, 温度や人の混雑度などの都市センシングにより得られた細粒度の環境情報を経路推薦に適用することで, ユーザにとって快適なナビゲーションが実現することが期待できる. 例としては, 道路の温度を把握できた場合はより涼しい経路を, 混雑度を把握できた場合はより空いている経路を推薦するといったことが考えられる. その点においてカーナビゲーションの分野では, 混雑把握のための VICS が普及し, その情報を利用し混雑を回避するといったことに活用されている [8]. VICS の道路情報管理は VICS リンクと呼ばれる道路を交差点間で区切った道路リンク単位で行われている. しかしこの粒度は車を想定したものであり, 歩行者ナビゲーションにおいて温度や混雑度を反映させる場合, カーナビゲーションより細かい単位でこれらの環境情報を管理し, 道路に対して反映させる必要がある.

一方, 前述のように多くのセンサネットワークは温度や湿度などの環境情報の把握を目的としており, 本来経路推薦への活用を目的としていないが, 道路の近隣にセンサノードが存在していれば, ナビゲーションに役立つ情報を収集できる可能性がある. また歩行者ナビゲーションを実現する場合, 道路沿いに, 経路推薦への活用を目的としたセンサネットワークを設置できることが望ましいが, センサノードの電源の確保や設置コストの問題から, 環境情報を得るために道路に沿って十分な密度でセンサノードを設置することは難しい. このような状況をふまえ, 本論文では経路推薦だけを目的としたセンサネットワークを活用するだけでなく, 別目的で設置されたセンサネットワークの活用も視野に入れ, 疎密度の都市センシング環境を想定する. 都市センシングを活用した経路推薦を実現するには, このような疎密度なセンサノードの設置状況を考慮したうえで道路ごとの細粒度の環境情報を判断し, 道路に対して重みとして反映させる方法が必要となる.

そこで本論文では, 道路近辺にセンサノードが密集していないセンサネットワークを対象とし, 都市センシングデータに基づいた経路推薦結果を提供するための手法と, それを備えたシステムを提案する. 提案手法を備えたシステムはセンサデータを管理するだけでなく, そのセンサデータに基づいて経路推薦を行う機能を持っている. その

実現のために, 提案手法を備えたシステムは道路近辺のセンサノードと道路との距離を考慮しつつ, 道路上の環境情報を道路単位で補間し, その結果に基づいて道路ごとに重み付けを行うことで, 経路推薦を行う機能を持つ. 本論文では, これらの機能を持つシステムを設計することで, 提案手法の性能について評価を行い, 検討する.

2. 関連研究

2.1 都市センシング

都市センシングの代表的な例としては, 実際に都市の一部空間にセンサネットワークを構築し, 温度や湿度といった環境情報を時間的, 空間的に細かく観測する研究が行われている [4], [5]. この研究では, 群馬県の館林市駅東側 600m 四方に温度・湿度センサからなる微気象センサネットワークを構築している. 収集したデータは夏場の熱中症対策などに利用することを想定している. センサデータはマルチホップによって転送され, シンクノードを経由してインターネットで接続された外部のデータベースサーバに保存される. LiveE! [2] は個人や組織が自律的に運営するデジタル百葉箱を日本や海外の各地に設置, ネットワーク接続し, 従来以上の密度でリアルタイム性の高い情報を提供することで災害時の情報提供やヒートアイランド対策に役立てることが期待されている. CitySense [3] は都市の気象や大気汚染の監視を目的とした都市のセンサネットワークである. 同システムは, 各センサノードを街灯に取り付けて電力を確保することで, 従来の無線センサネットワークのバッテリー駆動時間の制約を解消し, 長期間の環境監視や都市内の人々の健康状態との相関分析への活用が期待されている.

このような都市センシングの実現により, 細粒度のセンサデータの収集が可能になってきており, その活用例として歩行者ナビゲーションへの適用が期待されている [6]. しかし, 上記の事例が示すように, 現在稼働しているセンサネットワークの設置目的は環境情報把握が主であり, 経路推薦を第1目的にしてはいない. そのためセンサデータを活用した経路推薦を実現するには, これらのセンサネットワークを有効に活用していく必要がある. しかし, これらのセンサネットワークは長期的な観測の継続を考慮すると, 電源の確保の問題からセンサノードの設置間隔なども一定の制約がある. たとえば文献 [4], [5] では 100V の商用電源の近辺にしかセンサノードを設置することができず, 文献 [3] では街灯のある道路だけにしか設置することができない. そしてこのようなセンサネットワークが収集した環境情報から経路推薦を行うためにはすべての交差点で区切った道路上の細粒度の環境情報があることが望ましいが, 前述の理由から道路上に十分な密度でセンサノードを設置することは困難であると考えられる.

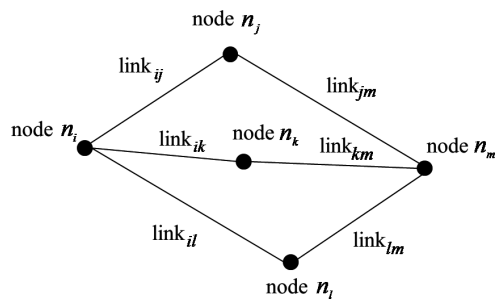


図 1 経路探索のためのグラフ構造の例
Fig. 1 Graph structure for route search.

2.2 経路探索

2.2.1 経路探索の基本要素

一般的に最適経路問題を解くためには図 1 のようなグラフ構造のデータが必要となる。グラフ構造に存在する各ノードは自分と連結するノードの情報を保持することでネットワークを構成できる。このようなグラフ構造のノードを交差点、ノード間のリンクを道路とすることで都市の道路ネットワークデータをグラフとして表現することができる。そして、このリンクに道路距離を重みとして与えることで、経路探索を行うことができる。代表的な経路探索手法としてダイクストラ法がある。したがって、この重みをセンサデータ基準としたものに変更することによってセンサデータに基づく最適経路探索が可能となる。

2.2.2 経路探索の関連研究

上記のような最適経路探索を行うアーキテクチャとして pgRouting [9] が存在する。このアーキテクチャはデータベースに登録された道路データを含んだテーブルをもとに経路探索を行うことができる。pgRouting が検索の対象とする道路データテーブルのレコード形式は固定であり、「道路 id」、「始点ノード」、「終点ノード」、「コスト」が設定されていることが必要となる。このテーブルに対する経路探索のインタフェースは SQL として提供され、SQL 中に出発ノードと目的ノードを記述することで問合せを行うことができる。また、最短経路探索問題だけではなく、巡回経路探索や到達圏探索なども SQL で記述することが可能である。pgRouting は経路探索の対象となる道路ごとにコストが対応付けられた道路データテーブルを経路探索開始前に用意する必要があり、センサデータをコストとすることを考えた場合、付近のセンサノードと道路の対応付けを行い、コストを計算する必要がある。しかし、pgRouting はこのような機能に関してはサポートをしていないため、pgRouting 単体ではセンサデータをもとにした経路推薦を実現することは難しい。

これに対し、圓戸ら [10] は独自の WebAPI を用いることでセンサデータに基づいたナビゲーションを行うシステムを提案している。このシステムは都市に分布するセンサノードと道路リンクとの対応付けを行う機能と、WebAPI

を用いてセンサノードから温度センサデータを取得し、ユーザが指定した温度との差を計算、ダイクストラ法の計算の対象とするコストに反映させることでユーザが指定した温度と近い快適な経路を提示する機能を持つ。このシステムは本論文が目指す経路推薦と類似しているが、センサノードと道路の対応付けに関しては道路の中心点から道路リンクの半分の距離で範囲検索することで周囲のセンサノードを抽出し、センサノードと道路リンクとの対応付けを行い、センサノードが持つセンサデータから道路の環境情報を判断している。しかしこの手法では、道路リンク間に 1 つの温度しか対応させることができず、道路リンク間の温度変化や勾配を表現することができない。このように、この手法では道路リンクの中心部や末端といった細かい範囲の環境情報を把握することができない。その問題に対応するには細分化された道路リンクにセンサノードを対応付ける必要があるが、前述の実世界のセンサノードの配置制限から道路リンク近辺にセンサノードが十分な密度で設置されている状況は現実的ではなく、その場合一部の細分化した道路リンクにセンサノードを対応付けできない場合が考えられ、経路推薦が不可能になってしまう。

2.3 センサデータの問合せ処理に関する研究

センサデータは様々な用途でアプリケーションに活用されることが考えられるが、収集し蓄積されたセンサデータは基本的に空間上で点状に分布し、その地点のデータを把握できるのみであるため、利用するアプリケーションに応じた処理を行うことが求められる [11]。たとえばアプリケーションがリアルタイム性の高いセンサデータを要求する場合は、データ収集や集約を行うネットワーク内問合せ処理が必要となり、またセンサデータの変化傾向の把握を要求するアプリケーションでは、統計やマイニングなどを行うストリームデータ処理が必要となる [12]。ストリームデータ処理に関しては時系列の類似度に基づく検索 [13] など、高度な処理の提案が行われている。また、センサデータの空間データとしての側面に着目した問合せ処理に関しても、様々な提案が行われており、近年は離散した点的なセンサデータの分布から等高線や面分布を計算するなど、前述のセンサノードの設置密度の差を吸収し、アプリケーションに提供するための手法についても提案されている [14], [15], [16], [17], [18]。

例としては、都市空間における空間解像度の異なるセンサネットワークを想定し、ユーザからの空間を対象とした問合せに対して適切な解像度のセンサデータを生成するシステムが提案されている [14], [15]。また、MauveDB [16] は線形回帰や補間といったアルゴリズムを活用して面的なセンサデータ分布を作成し、ビュー形式でセンサデータを提供する手法を提案している。これらの研究では、ある地点情報から他の未知の地点のデータを推定する手法であ

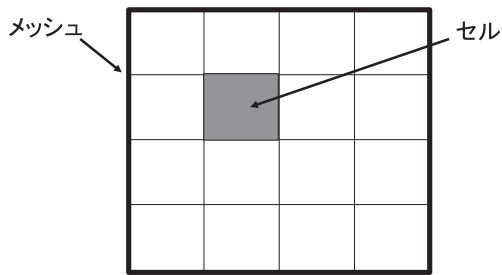


図 2 メッシュとセル
Fig. 2 Mesh and cells.

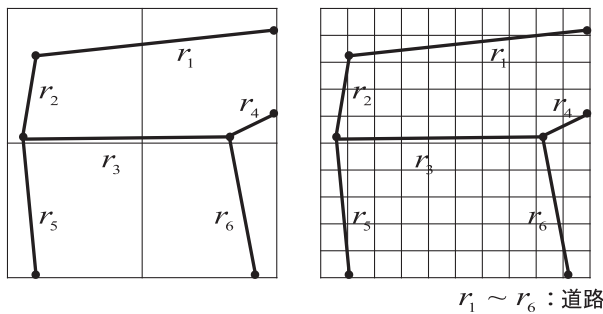


図 3 セルと道路の対応付け
Fig. 3 Mapping cells with road links.

る空間補間の手法 [17], もしくは回帰などのアルゴリズムを用いることでメッシュデータを生成し, 補間したセンサデータの提供を行っている. これらの手法は地理情報システム (Geographic Information Systems: GIS) の分野で提案されている手法である. 具体的には図 2 のように対象とする領域をメッシュ状に分割し, その構成要素をセルとして形成し, 各セルの値を周囲のセンサノードのデータから計算しメッシュデータとして表示する.

都市センシングデータを活用した経路推薦を応用ととらえた場合, 各道路に対して環境情報を対応付ける必要がある. しかし, センサデータに対しこのようなメッシュ状の補間結果を適用した場合, どのセルがどの道路と対応しているかについてセルと道路の空間的關係から判定する必要がある. さらにセルの大きさをどう設定するかという問題もある. 具体的には, 図 3 の左図のように大きなセルでメッシュを構成した場合は 1 つのセルが多くの道路を包含してしまうため, 複数の道路に対して同じセンサ値が割り当てられてしまう. 逆に図 3 の右図のようにセルの大きさを小さくしてしまうと, 補間処理を行うセルが多くなるために計算量が増加し, 道路を含んでいないセルに対しても補間処理を行っていないことになるため, 効率的でない.

以上の理由から, メッシュ状の空間補間は経路推薦には適切ではなく, 各道路に対して対応付けを行えるような他の手法を考える必要がある.

また, 四之宮ら [18] はセンサデータを空間補間する際に必要となる対象領域において, 地理的に一樣なセンサデータと空間における特徴を再現可能なセンサデータを収集,

冗長な情報を削減し, 正確な観測値分布を得られる手法について提案を行っている. しかし, この研究は広範囲な観測値分布に関しての空間補間を保証するもので, 都市センシングのようなより細粒度のセンシング状況に関しては考慮していない.

3. アプローチ

本研究は都市センシングデータを利用した経路探索を行うことを課題とし, 提案手法を備えたシステムによってそれを実現する.

センサデータを利用した経路推薦には, 収集したセンサデータから細粒度の道路上の環境情報を把握することが必要となる. しかし, 2.2 節で示した圓戸らのシステムは実世界のセンサノードの配置状況を考慮しておらず, 細粒度の道路環境情報を把握できないことが問題である. さらに 2.3 節で示した従来研究で提案されているメッシュ状の補間手法では, メッシュを構成する各セルと補間結果を対応付けており, そのままでは経路推薦に適用できない. そこで, 提案手法には, センサノードの設置状況の疎密を考慮して, 道路とセンサノードを直接対応付けることが求められる. 以上のことから, 提案手法が解決すべき課題は以下のとおりである.

- 道路単位での細粒度での環境情報の把握
 - 実世界のセンサノードの設置の疎密を考慮した道路とセンサノードの対応付け
 - 細粒度に対応付けた環境情報に基づく道路の重み付け
- これらの課題を解決するために, 本研究では次のアプローチをとる.

A) メッシュ状の補間に代わる, 道路単位での空間補間処理

これにより, 直接細かい範囲での道路の環境情報を把握でき, 都市センシングデータの経路推薦への活用が可能となる.

B) 可変半径法を利用した道路に対するセンサノード対応付け

センサノードの検索範囲を可変にすることにより, センサが道路近辺になくてもセンサノードの対応付けが可能となり, センサノードの設置の疎密に対応できる.

C) ユーザが指定した基準値に基づく道路の重み (コスト) 計算

これにより, A で得られる道路ごとに補間したセンサデータを重み (コスト) に変換でき, 都市センシングデータを活用した経路推薦を行うことができる.

4. 提案方式

4.1 提案手法の概要

提案手法を備えたシステムの基本概要について述べる. 3 章における提案手法のアプローチより, 提案手法を備え

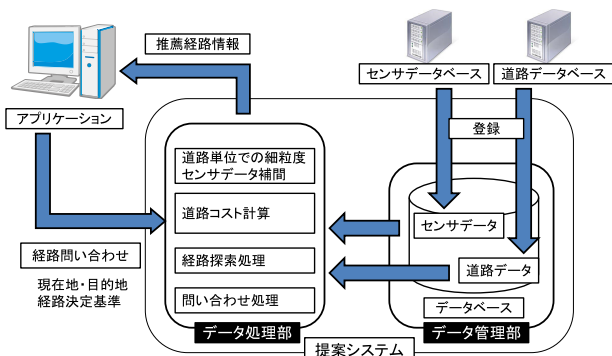


図 4 提案手法を備えたシステムの概要

Fig. 4 An overview of the proposed system.

たシステムに要求される機能は以下のとおりである。

- (1) センサデータと道路データの管理
- (2) 道路単位での細粒度センサデータ補間（道路とセンサノードの対応付けを含む）
- (3) 補間したセンサデータに基づいた道路の重み（コスト）計算
- (4) 経路探索処理
- (5) 問合せの処理

これらの機能を、各種データ管理を行うデータ管理部と、センサデータを利用した経路推薦を行うための各種データ処理を行うデータ処理部の2つを実装することで実現する。システムの全体図を図4に示す。まずデータ管理部分がセンサデータの受信を行い、道路データと一括して管理を行う。そしてデータ処理部がセンサデータと道路データを受け取り、道路単位でのセンサデータの補間を行う。データ処理部は補間したセンサデータに基づいた道路コスト計算を行い、それらデータの管理を行う。また、アプリケーションからの経路問合せ処理と経路探索処理もデータ処理部が行う。経路問合せ処理の際に、ユーザが現在地、目的地、経路推薦に必要なパラメータの設定を行う。

4.2 センサデータと道路データの管理

提案手法を備えたシステムのデータ管理部におけるセンサデータと道路データの管理の方法について説明する。本論文では、道路データは2.2.1項で述べたリンクの情報としてデータベースで管理する。このような交差点で区切られた各道路（リンク）を道路セグメントと呼ぶこととする。道路セグメントデータは道路セグメントテーブルにおいて図1で示した構造で管理し、表1に示すデータ属性で定義する。また、センサデータはセンサノードの情報を管理するセンサノード情報テーブルとセンサノードごとのセンサデータを格納するセンサデータテーブルを用いて管理する。センサノード情報テーブルは表2のようなデータ属性でセンサノードの各種情報を管理する。センサデータテーブルは表3のデータ属性でセンサノードごとの時系列データを管理する。

表 1 道路セグメントテーブル

Table 1 Attributes of road segment table.

属性名	説明
道路セグメント ID	道路セグメントの識別番号
始点ノード	道路セグメントの始点ノード番号
終点ノード	道路セグメントの終点ノード番号
セグメント距離	道路セグメントの長さ (メートル単位)
位置情報	道路セグメントの位置情報 (ラインデータ)

表 2 センサノード情報テーブル

Table 2 Attributes of sensor node information table.

属性名	説明
センサノード ID	センサノードの識別番号
センサの種類	センサノードに搭載されている センサ
位置情報	センサノードの位置情報 (ポイントデータ)

表 3 センサデータテーブル

Table 3 Attributes of sensor data table.

属性名	説明
計測時間	センサデータを観測した時間
センサデータ	センサが収集したデータ

各センサデータテーブルの名前は「センサの種類_センサノード ID」とすることで管理を行う。センサデータにアクセスを行う場合は、先にセンサノード情報テーブルにアクセスし、センサノード ID とセンサの種類 of データを得ることで入手したいセンサデータのテーブルにアクセスすることができる。これにより、時系列センサデータの活用が可能となり、またセンサデータテーブルの肥大化を防ぐことができる。

上記の形式でデータ管理部がデータの管理を行い、データ処理部が各データを参照し、経路探索を行うための処理を実行する。

4.3 全体の処理の流れ

4.2節のデータ構造をふまえて、それらを利用した経路探索までの全体の処理の流れを図5に示す。まず道路セグメント情報テーブルの情報から、各道路を長さに応じて分割処理し、新たに分割道路セグメントテーブルを作成する。次に、分割道路セグメントテーブルの位置情報とセンサノード情報テーブルの位置情報を比較し、道路近辺にあるセンサノードを検索し、センサデータテーブルからデータを引き出す。そして、これらのデータに対して空間補間の手法を適用することで、分割道路セグメントのセンサデータを推定する。最後に経路推薦を行うため、分割道路

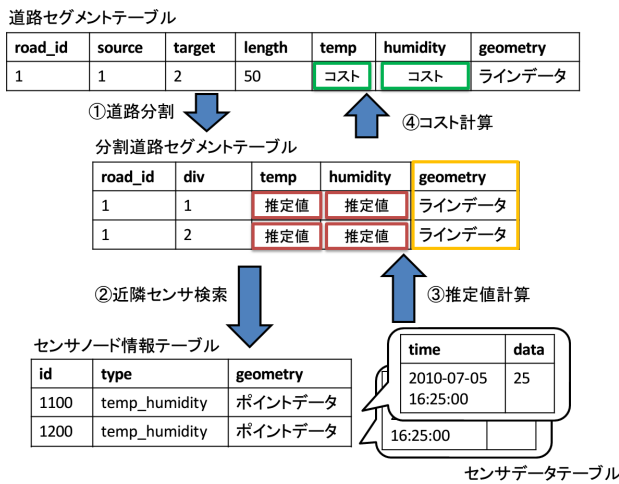


図 5 道路セグメントの分割からセンサデータの割当て、コスト計算までの処理の流れ

Fig. 5 Processing flow from road segmentation to cost calculation.

セグメントのセンサデータ推定値から、各道路セグメントのコストを計算し、道路セグメントテーブルに格納する。

4.4 道路単位でのセンサデータの補間

4.4.1 空間補間による道路の細粒度センサデータ推定

センサデータを利用した経路推薦には、収集したセンサデータから道路上の環境情報を判断し、道路ごとに重み付けを行うことが必要となる。そのため、提案手法を備えたシステムでは線単位、つまり道路単位でのセンサデータの補間を行う。しかし、都市空間においてはビルなどの建造物や街路樹、アスファルトの有無などの影響で、同じ道路上でも環境情報は一様ではない場合が多いと考えられている [1]。したがって、適切な経路推薦を行うためには、道路に対してより細かい範囲でのセンサデータの補間が求められる。そこで、データベースに登録された各道路セグメントを細かく分割し、個々の分割した道路セグメントに対してセンサデータを補間する。以下に処理の詳細を記述する。

最初に、道路セグメントを等間隔に分割する。この分割した道路セグメントを分割道路セグメントと呼ぶ。この様子を図 6 に示す。分割する数は、定義されたメートル単位の分割幅 (*wid*) によって決定される。具体的には、分割対象となる道路セグメント s_a の長さを l_a とすると、以下の式 (1) を満たす n_a が分割数となる ($n_a = 1$ の場合は分割を行わないこととする)。また、道路セグメントと分割道路セグメントの関係を表式 (2) に示す。なお関数 F は、実数 r を引数として r 以上の最小の整数を返す関数である。

$$n_a = F(l_a/wid) \tag{1}$$

$$s_a = \{div_{a1}, div_{a2}, div_{a3}, \dots, div_{an_a}\} \tag{2}$$

上記手法で生成した分割道路セグメントに対してセンサデータを補間することで経路推薦を行うことができる。し

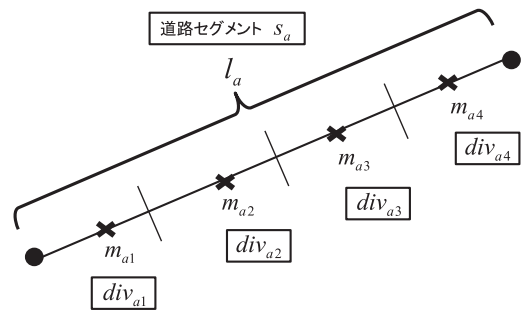


図 6 道路セグメントの分割

Fig. 6 Divided road segment.

かし、センサの設置場所によっては環境情報を知りたい道路セグメントの近くにセンサノードが存在しない場合も十分に考えられる。その場合、センサデータを割り当てることができない道路セグメントが存在することになり、その道路セグメントは経路推薦に利用できなくなってしまう。そこで本提案手法では空間補間の手法を用いることでこれを解決する。空間補間は、地理的に隣接しているデータは関連性が高いという前提に基づいて、指定した地点の値を周囲のデータから推定する手法である。

提案手法では、逆距離加重法 (Inverse distance weighting, 以下, IDW) [17] と呼ばれる空間補間の手法を利用することでセンサデータの推定を行う。IDW は推定の対象とするある地点 x の値 $z(x)$ を近くに存在する N 個の点 (近隣点) i ($i = 1, 2, \dots, N$) の値 z_i を利用し、式 (3) を用いて計算する。

$$z(x) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \tag{3}$$

w_i は z_i に対する重みであり、点 x と点 i の間の距離 d_i を用いて式 (4) のように定義される。

$$w_i = 1/d_i^2 \tag{4}$$

また、IDW を利用する際には、どの近隣点を推定に利用するかを決定する必要がある。しかし実際のセンサネットワーク環境では、センサノードの設置に制限があることから道路近辺に一部センサノードが存在しない場合も考えられる。そこで本提案手法では、可変半径法 (Variable radius method) [19] を応用し、この問題を解決する。可変半径法とは図 7 に示されるような補間点を中心にして与えられた距離を初期半径とする円を描き、この領域に必要な数のデータ点が存在しない場合さらに半径を拡大し、検索範囲を広げることでデータ点を抽出する手法である。この可変半径法を適用する場合、一部の道路には遠くに存在するセンサノードが割り当てられる可能性があり、推定に誤差が出る可能性がある。しかし、IDW は補間点と近隣点との距離で加重平均を適用し推定値を算出することから、

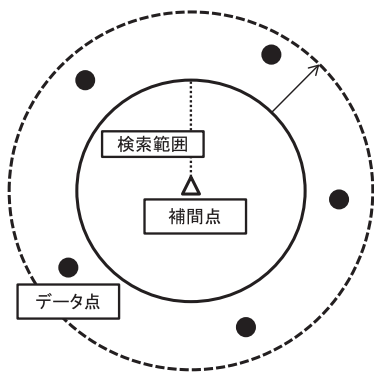


図 7 可変半径法
Fig. 7 Variable radius method.

距離の影響度を考慮できるため、可変半径法を適用しても誤差の影響は大きくないと考えられる。

以上をふまえて、本提案手法における分割道路セグメントに対するセンサデータ補間手法について説明する。まず、各分割道路セグメントの中点を算出し、この点を補間点とする。次に、検索幅をメートル単位で定義し、それを初期半径として分割道路セグメントの各補間点から円を描き、可変半径法でセンサノード情報テーブルから検索を行う。ここで1つ以上のセンサノードが抽出された場合処理を打ち切るが、見つからない場合は検索幅を2倍、3倍と増やし検索を続行し、分割道路セグメントに対して必ず1つ以上のセンサノードのIDを割り当て、その取得したIDを利用し、各センサノードに対応するセンサデータテーブルを検索し、最新のセンサデータをデータベースから取得する。それらに対し前述のIDWの手法を用いることで、分割道路セグメント上に設定した補間点に対してセンサデータの推定を実行、その結果をデータベースに格納する。この一連の処理をすべての分割道路セグメントの補間点に対して行うことで、すべての分割道路セグメントに対して細粒度のセンサデータを補間することが可能になる。

4.4.2 キャッシュテーブルを利用したセンサデータ検索の効率化

上記の手法を用いることにより、分割道路セグメントすべてにセンサデータを割り当てることができるものの、道路セグメントを細かく分割する手法の性質上、位置が近い分割道路セグメントには同じセンサノードが割り当てられる場合が多い。さらに、道路セグメント周囲にセンサが存在しなかった場合、検索範囲を拡大していくため、推定に用いられるセンサノードが重複する可能性はさらに高くなる。結果としてセンサデータテーブルから何度も重複した情報を取得することになるため、問合せのたびに逐一センサデータをデータベースに問い合わせ、検索を行っているのは処理時間の増大につながってしまう。そこで提案手法を備えたシステムでは独自のキャッシュテーブルを定義し、1度参照したデータを各経路推薦処理の間、一時キャッ

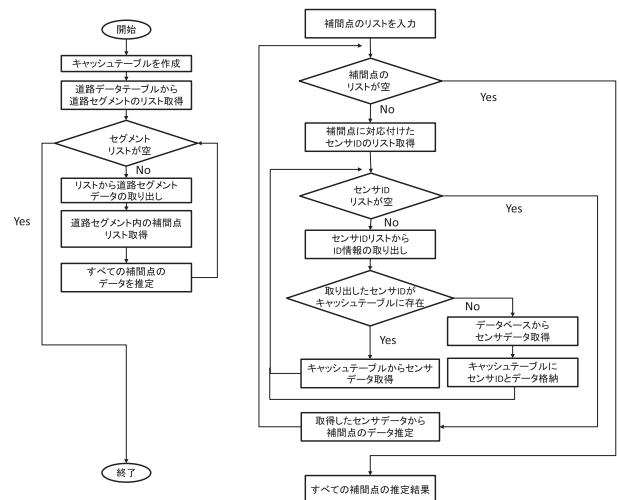


図 8 キャッシュテーブルを利用したセンサデータ検索の流れ
Fig. 8 Processing flow on searching sensor data with cache table.

シュテーブルに保持しておくことで時間の短縮を図る。このキャッシュテーブルはセンサノードのIDを検索キーとし、各センサノードの最新のセンサデータを格納するために、経路推薦システム上で作成される一時キャッシュテーブルである。

このキャッシュテーブルを用いた処理の流れを図8のフローチャートを用いて説明する。

まず空のキャッシュテーブルを作成し、道路データテーブルから道路セグメントのリスト（セグメントリスト）を取得する。そしてセグメントリストから取り出した道路セグメントのデータからそのセグメント上にある補間点のリスト（補間点リスト）のデータをもとに、すべての補間点のセンサデータを推定する。以上の処理をセグメントリストが空になる、すなわちすべての道路セグメントの推定処理が終了するまで図8の左図のように繰り返していく。次にすべての補間点のデータを推定する処理の流れについて説明する。入力された補間点リストから取り出した補間点に対応付けたセンサIDをリスト（IDリスト）として取得する。そしてこのセンサノードのID情報をもとにセンサデータを検索していく。IDリストから取り出したセンサノードのIDを取り出し、そのIDがキャッシュテーブルに存在するかどうかを判定する。キャッシュテーブルを参照し、推定処理に使うセンサノードのデータが格納されていた場合は、データベースへアクセスを行わずキャッシュテーブルからデータを取得する。逆にキャッシュテーブル内にセンサノードのデータがない場合は、通常どおりデータベースへアクセスし、推定処理に使うセンサノードのセンサデータをセンサデータテーブルから取得し、キャッシュテーブルにセンサノードのIDとデータを格納する。これをIDリストが空になるまで実行し、リストが空になったら補間計算に利用するセンサデータが揃ったと見なし、

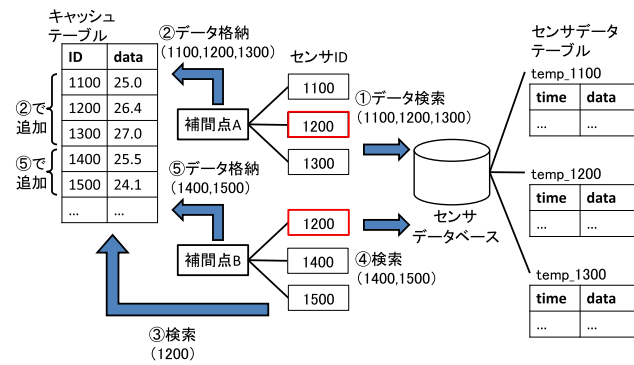


図 9 キャッシュテーブルを利用したセンサーデータ検索の例
 Fig. 9 An Example on searching sensor data with cache table.

IDW による補間計算を実行する。その後、補間点リストから情報を引き出す処理に戻り、以降の処理を補間点リストが空になるまで図 8 の右図のように繰り返すことで、すべての補間点の推定結果を算出していく。

具体例として図 9 を利用して説明を行う。

検索の最初に補間点 A が対象となり、この補間点にセンサーノード 1100, 1200, 1300 が対応付けられているとすると、まだキャッシュテーブル上にデータが存在しないため、通常どおりセンサーデータベース上からセンサーデータを検索し、推定処理を行う。その後、検索されたセンサーノード 1100, 1200, 1300 のセンサーデータはキャッシュテーブルに格納され、次の補間点の推定処理に移行する。そして次の補間点 B が補間対象となり、この補間点にセンサーノード 1200, 1400, 1500 が対応付けられているとすると、先ほど検索したセンサーノード 1200 のセンサーデータはキャッシュテーブルに格納されているため、このデータに関してはセンサーデータベースにアクセスをせず、キャッシュテーブル内からデータを引き出される。それ以外のセンサーノード 1400, 1500 のデータに関しては通常どおりセンサーデータベース上からセンサーデータを検索し、推定処理を行う。そして同様にセンサーノード 1400, 1500 のデータもキャッシュテーブルに格納され、次からのデータ検索処理に活用される。

このように、提案するキャッシュテーブルを活用することで、システム内での重複した検索処理の発生を抑制し、検索の効率化を実現することができる。また、キャッシュテーブルのデータは経路推薦処理完了後に破棄され、新たな経路問合せがきた際に最新のデータで再構築される。このように、キャッシュテーブルは個々人の経路を問合せた時間にもない生成されるため、個人の問合せに応じた経路探索を高速化するためのキャッシュとして動作する。

4.5 道路に割り当てたセンサーデータに基づいたコスト計算・経路探索

4.4 節で述べた手法を用いることで、分割道路セグメントごとにセンサーデータの補間処理を行い、すべての分割道路セグメントに対して補間結果を割り当てることができる。

しかし、経路推薦を行うためには道路セグメントごとにコストを設定する必要がある。

そこで、経路探索アルゴリズムは効率的かつ応用範囲の広い手法であることからダイクストラ法を採用することとし、センサーデータを利用した経路推薦を実現するために、センサーデータをもとにした道路セグメントごとのコスト計算式を定義した。各ユーザが快適とするセンサーの値を問合せの際にパラメータとして設定し、この値を利用してコスト計算を行う。この値はセンサーの種類やユーザの好みによって自由に設定することができ、たとえば温度センサーの場合、夏場に一般的に人間が快適と感じる温度である 25°C に設定するといったことが考えられる。

まず、図 6 のような長さ l_a である道路セグメント s_a を n_a 個に分割し、センサーデータの割当てが行われた分割道路セグメントがあるとする。

センサーの値だけではなく経路距離も考慮する場合は式 (5)、経路距離を考慮せずにセンサー値のみを重視する場合は式 (6) で道路セグメント s_a のコスト C_a を計算する。

$$C_a = \left\{ \sum_{k=1}^{n_a} |m_{ak} - t_d| \right\} \cdot l_a \quad (5)$$

$$C_a = \{ \max(m_{ak}) - t_d \}^2 \quad (1 \leq k \leq n_a) \quad (6)$$

k を 1 から n_a までの整数とすると、図 6 の m_{ak} は分割道路セグメント div_{ak} に割り当てられたセンサーデータの推定値であり、 k は 1 から n_a までの整数とする。また、ユーザが快適であると指定したセンサーデータの値を t_d と定義する。

式 (5) は、ユーザの指定したセンサー値との差が大きくなるほどコストが大きくなるため、ユーザが快適であると感じる経路を選ぶことができるようになる。さらに、道路セグメントの距離をかけることで、経路長も考慮に入れることが可能になる。また、式 (6) は距離を考慮せず、道路セグメントに対応付けられたセンサーの推定値の最大値とユーザの指定したセンサー値との差の二乗をコストとすることで、センサー値のみを重視している。以後、式 (5) を用いたコスト計算を「センサー・距離ベース手法」、式 (6) を用いたコスト計算を「センサーベース手法」とする。以上の手法を利用することにより、道路セグメントのセンサー値を基準としたコストが決定することが可能となり、センサーデータを利用した経路推薦を実現することができる。

5. 実験および考察

5.1 実験環境

提案手法の有効性を検証するために、1 台のコンピュータ (CPU: Core i5 650 3.2GHz, メモリ: 4GB, HDD: 500GB OS: Windows 7 Professional) を用いて実験を行った。このマシンを用いて、提案手法を実装したシステムを構築した。データベース管理システム (DBMS) は PostgreSQL8.4 を使い、Java Servlet を用いてシステ



図 10 センサノード分布図

Fig. 10 Distribution of sensor nodes.

ムを実装した。また、地理情報の取扱いには拡張機能の PostGIS1.5 を利用した。

5.2 評価

実験には関連研究 [4], [5] で述べた館林市のセンサネットワークが収集したセンサデータを利用した。このセンサネットワークは温度データと湿度データを収集しており、センサノードは図 10 のように分布している。なお、センサノードは駅周辺周辺の縦横 600m の範囲で分布している。図 10 が示すように、場所によりセンサノードの設置状況に粗密があることが分かる。このセンサネットワークで収集しているデータのうち、本実験では夏場の温度データ（合計 2,016,450 レコード）を利用することとし、その中でも晴れた日である 2010 年 8 月 23 日, 8 月 24 日, 8 月 28 日の 1 日分の各データと、都市の各地点の温度差が大きく観測されている 2010 年 8 月 21 日のデータを利用した。実験では指定した時刻を現在時刻と見なし、データベース内で指定した時刻以前で一番近い時刻のセンサデータを実験に利用することとした。

本実験では、提案手法を備えたシステムでの各機能についての検証と評価を行う。まず、提案手法を備えたシステムの機能である経路推薦を実際に実行し、算出した経路の結果について検証を行う。さらに、提案手法を備えたシステムにおける重要な機能であるセンサデータ補間処理の推定精度と処理時間についての検証を行った。具体的には補間の際のパラメータである検索幅を変えたときの推定精度や処理時間についての評価、さらにデータ検索の効率化のためのキャッシュテーブルの機能の有効性についての評価も行う。

5.2.1 経路推薦の結果

提案手法を用いた経路推薦の結果について記述する。本実験では、4.4 節のセンサ・距離ベース手法とセンサベース手法のそれぞれを用いて経路生成を行い、一般的な最短



図 11 生成経路 (左:センサ・距離ベース手法 右:センサベース手法)

Fig. 11 Routes generated by each method. (Left: Sensor and distance base method Right: sensor base method).

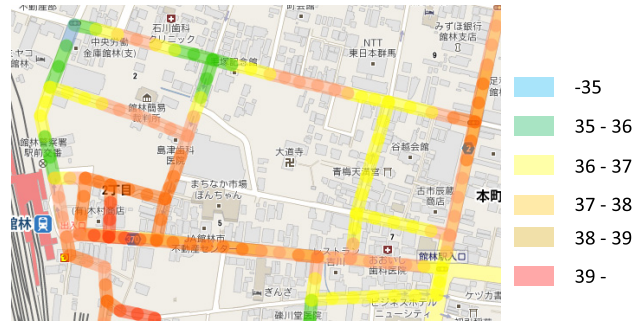


図 12 道路セグメント沿いの推定温度分布

Fig. 12 Temperature gradients on road segments.

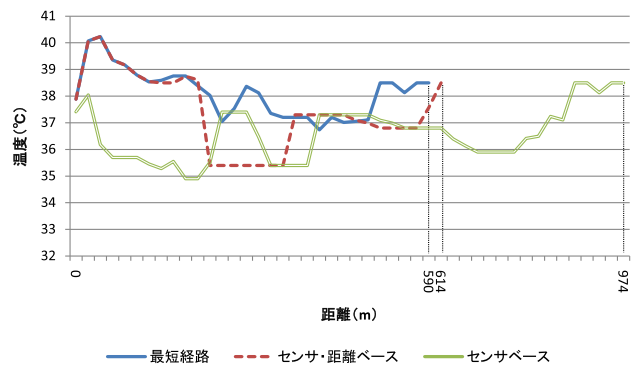


図 13 各経路の推定温度勾配

Fig. 13 Estimated temperature gradient of each route.

経路との比較を行った。センサデータは経路生成に都市の各地点の温度差が大きく観測されている 2010 年 8 月 21 日 16:00 の温度データを利用した。その結果を図 11 に示す。なお、温度センサの快適値は 25°C、検索幅は 200m と設定した。また、この生成経路について分析するために、本システムで推定した道路セグメントの推定温度分布を図 12 に示す。この推定温度分布より、提案手法ではセンサの快適値を 25°C としたため、最も温度の低い経路が選ばれられると考えられる。さらに、各経路の推定温度勾配の分析結果を図 13 に示す。

これらの結果から、一般的な最短経路推薦の場合、全体的に高い温度の道路セグメントを経路として推薦していることが分かる。一方、提案手法のセンサ・距離ベース手法を用いた場合は 35°C~36°C の道路セグメントを通過しているなど、最短経路と比較して温度の低い道路セグメント

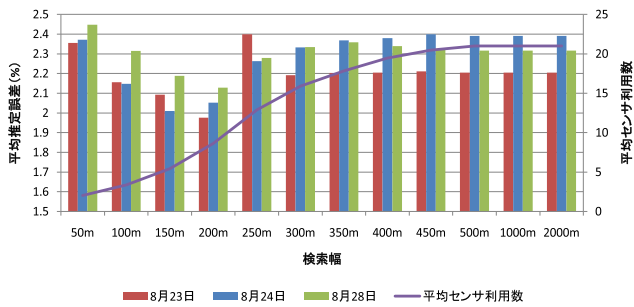


図 14 検索幅変更による推定誤差の変化

Fig. 14 Change in estimated error by changing search range.

で経路を推薦していることが分かる。さらに、センサベース手法の場合はすべての道路セグメントで最低の 35°C 以下の温度の道路セグメントを通過しており、センサ・距離ベース手法よりさらに低い温度の経路を推薦できている。

5.2.2 センサデータ推定精度と処理速度の関係の評価

提案手法を備えたシステムのセンサデータ推定精度と処理速度の関係についての実験結果を記述する。推定精度は実測値の存在する館林市のセンサの設置地点を補間点とし、提案手法を用いて周囲のセンサデータからセンサの設置地点のデータ推定を行い、推定したデータと実測値を比較することで差異を算出した。この差異は相対誤差の計算で求める。具体的には、推定誤差を $\{(|推定値 - 実測値|) / 実測値\} \times 100$ の計算により割合で算出する。

まず初めに、検索幅を変更した場合の推定精度について検証を行った。検索幅は 50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 250 m, 300 m, 350 m, 400 m, 450 m, 500 m, 1,000 m, 2,000 m とし、各検索幅のすべてのセンサ設置地点の推定誤差を算出、それらの誤差の平均を計算した。実験は 2010 年 8 月 23 日, 8 月 24 日, 8 月 28 日の 14:00 のデータを用い、それぞれの日の推定誤差の平均を算出した。図 14 に結果を示す。図 14 が示すように、50 m から 200 m まで検索幅を広げると推定誤差も低下する傾向があることが読み取れる。しかし、検索幅を 250 m より大きくした場合は逆に推定誤差が増大している。これは検索幅が増大すると、各補間点から距離的に遠くのセンサを補間に利用するようになるため、推定値の誤差が大きくなったと考えられる。

次に、提案手法を備えたシステム上の IDW によるセンサデータ推定処理の時間についての実験結果を記述する。提案手法を備えたシステムでは IDW によるセンサデータの推定を行うために可変半径法を応用して道路セグメント周辺のセンサの検索を行っている。この際に、検索幅を定義することで近隣センサの判定を行う。この検索幅の変化によるセンサデータ推定処理時間について計測を行った。具体的には検索幅の変化を図 14 と同一とし、IDW による最初の補間点の推定計算開始から最後の補間点の推定計算終了までのそれぞれの処理時間を計測した。その結果をセンサノード検索、センサデータ検索、データ更新処理の

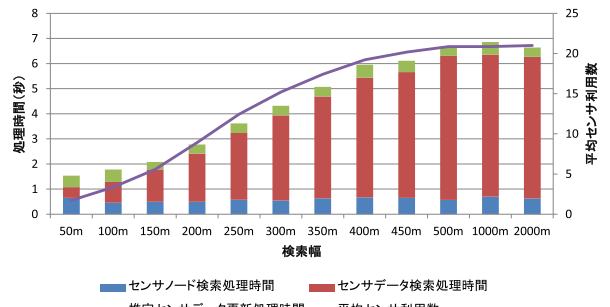


図 15 センサデータ推定処理時間

Fig. 15 Processing time for estimating sensor data.

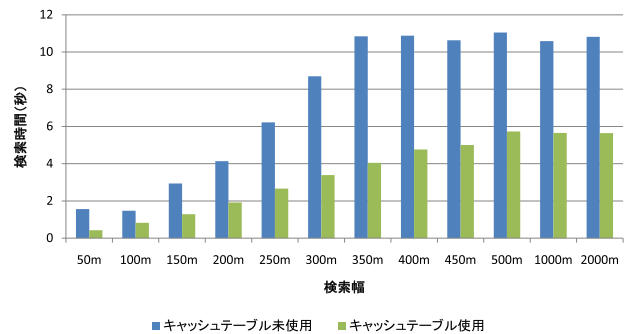


図 16 キャッシュテーブル利用の有無による性能差の比較

Fig. 16 Performance in use of cache table.

3つに分け、図 15 に示す。なお、センサ補間処理を行う際の道路セグメントの分割幅 wid は 25 m と定義した。

この結果から、検索幅が増えるに従って、処理時間が増大していることが分かる。また、この結果と図 14 に示した結果を比較すると、検索幅を増やすことで処理時間は比例的に増加しているが、同時に推定誤差も大きくなる傾向があることから、処理速度と推定精度には相関関係があることが分かる。この理由としては、検索幅を広げることで推定に利用するセンサデータが増え、処理時間や推定誤差が大きくなったと考えられる。このことから、検索幅をただ増やすだけではなく、推定のために最適な検索幅を設定する必要があることが分かった。実際にこの実験環境下においては、推定のためには検索幅を 200 m に設定することが最適であることが分かる。

5.2.3 キャッシュテーブルの有効性の評価

提案するキャッシュテーブルを用いた検索性能の向上度合いの検証実験の結果について記述する。5.2.2 項の処理時間の実験結果はキャッシュテーブルを利用した前提のものであるが、今回はシステム上でキャッシュテーブルを利用した場合としなかった場合のそれぞれについて実際に検索処理を実行し、その処理時間を計測・比較し、性能の評価を行う。なお、キャッシュテーブルの活用によって影響が出るのは、センサデータ検索処理であるため、その検索処理時間のみを抽出し、評価を行った。図 16 に実験結果を示す。この結果からキャッシュテーブルを用いた場合、キャッシュテーブルを用いない場合と比較すると、いずれ

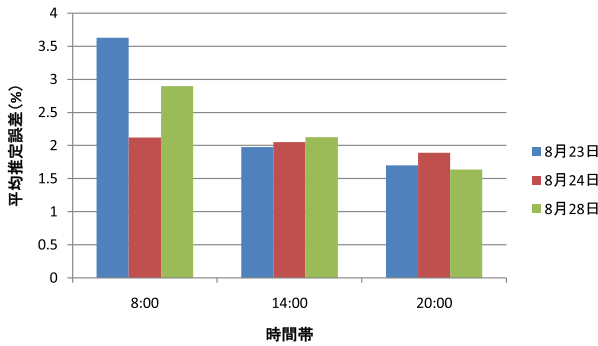


図 17 時間帯別の推定誤差

Fig. 17 Estimation error by time of day.

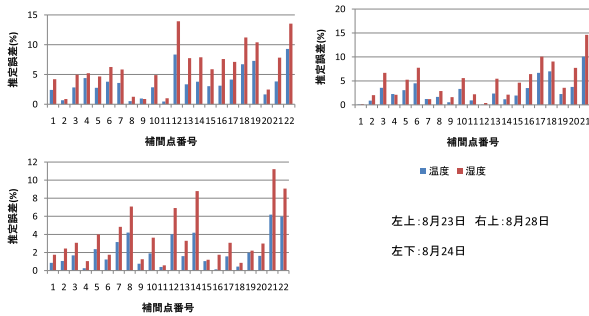


図 18 各日付における各補間点の推定誤差

Fig. 18 Estimation error at different days.

の検索幅においても、全体的に処理時間が短縮できていることが分かる。具体的には設定した検索幅によっては最大で処理時間を約 73%，最小でも約 44%削減することができ、全体としての平均で 55%の処理時間を削減することができた。

5.2.4 センサデータの推定誤差の検証

次に、各日付の時間帯ごとの推定誤差について検証を行った。時間帯は 8:00, 14:00, 20:00 の 3 つに分類し、それぞれの推定誤差の平均を算出した。図 17 に結果を示す。推定を行う際の検索幅は最も精度が良いと考えられる 200m とした。推定誤差は実験環境の場合 3% でおおよそ 1°C の誤差となっている。図 17 から、全体的に推定誤差は少ないことが分かるが、8:00 においてやや誤差が大きいことが分かる。この原因について調査するため、各日付におけるこの時間帯における各補間点の推定誤差の計算を行った。その結果を図 18 に示す。この実験では温度、湿度両方に対して推定誤差の計算を行った。

これらの結果から、いくつかの補間点において、大きな誤差が出ていることが分かる。さらに、温度の推定誤差と湿度の推定誤差は同じ場所で同程度の誤差傾向を示している。たとえば、温度の推定誤差が大きい傾向にある場所は湿度の推定誤差も大きい傾向にあることが分かる。このような誤差が発生する原因としては、推定する場所の周囲の環境が影響すると考えられる。そこで、8月23日の8:00における全補間点の中から温度の推定誤差が5%を超えて



図 19 8月23日において大きな推定誤差を観測した補間点

Fig. 19 Interpolated point that measured large estimation error at 8:00 Aug, 23.

いる場所を抽出し、検証を行った。図 19 にその結果を示す。図中の × 印で示されたセンサノードは前述の時刻におけるデータがエラーを含んでいる、もしくはデータが存在していなかったノードであるため、推定処理の評価には使われていない。

8月23日の8:00において、センサノードのIDが12, 18, 19, 22のものが設置してある場所が5%を超えた推定誤差を示した。まず、誤差が大きい補間点の明確な特徴としては、センサネットワークが存在する領域の端に存在しているということがあげられる。この特徴はセンサノードのIDが18, 19, 22に該当するものが設置してある地点にあてはまる。これらの地点の推定誤差が大きくなる原因としては、センサネットワークの領域の端はセンサノードが少なくなる傾向にあり、結果として道路近隣のセンサノードが少なくなり、誤差が大きくなったと考えられる。一方、IDが12のセンサが設置してある地点は、センサネットワークの中央に位置しているにもかかわらず、推定誤差が大きくなっている。この原因としては、この地点の温度の推定のために、他の道路に存在するセンサのデータを利用しているためであると推測することができる。実際に、この地点は裏路地にもかかわらず、推定のために大通りに存在するセンサを利用しているため、誤差が発生したと考えられる。さらに、他の日付の推定結果においても同様に前述のいずれか2つの特徴を持つ補間点が大きな推定誤差を示した。

5.2.5 実験結果に関する考察

経路推薦に関する実験結果に関しては、提案する各コスト計算手法を用いることで当初想定したとおりの傾向の経路を推薦することができることが確認できた。さらに、5.2.4 項で検証を行った提案する道路単位でのセンサデータの空間補間手法についても温度センサデータを用いた評価実験から、センサノードの配置が密集しておらず、また稼働しているセンサノードが少ない状況においても補間値は平均 3% 程度の誤差に収まっており、全体的に高い精度

で道路上の細粒度のセンサデータを推定できた。このことから異なる目的で設置された疎密度センサネットワークのデータを活用し、経路推薦を行うための基本的な枠組みは実現できたと考えられる。

しかし、センサの設置密度の疎密に起因する温度データの推定誤差が一部存在することも同時に示唆された。そのため、今後はセンサデータの推定誤差を軽減するための提案が求められる。具体的には、今回は単一のセンサデータで推定精度を検証したが、日照条件などといった環境情報も影響していることなどが考えられる。そのため、他の環境情報を追加のセンサや天候観測調査などで把握することが可能であるなら、それらの要素を複合的に考慮し推定を行うことで精度を向上させることができると考えられる。

また、5.2.2 項の処理速度の実験結果から、システムの処理速度に関しては検索幅を最大に広げても、実利用面でも十分高速な処理速度であることが分かった。しかし、あくまで館林市に設置された限られた範囲でのセンサネットワークでの実験結果であるため、今後はより広大な範囲でのセンサネットワークに提案手法を備えたシステムを適用した場合の処理時間についても実験し、有効性を示す必要があると考えられる。加えてキャッシュテーブルの有効性評価に関しては、システムに対して適用することで全体の平均でおよそ 50% 処理時間を短縮することができたことが分かった。しかし、この結果においても、館林市のセンサネットワークに適用した場合の実験結果であり、より広大な領域のセンサネットワークでの適用を考えた場合、キャッシュテーブル内のデータサイズの肥大化を防ぐために、経路推薦処理中のキャッシュアウト処理も今後検討していく必要がある。

6. まとめ

本論文では都市に複数のセンサが存在する環境下において、空間補間の手法を用いることで道路上のセンサデータを線的に補間することで推定し、その推定データをもとに経路推薦を行う手法の提案を行った、さらに実際に提案手法を備えたシステムの実装を行うことで、本提案方式を利用した際の処理時間と推定精度、経路推薦の結果について実験・考察を行った。その結果、実環境においての一定の有効性を示すことができた。今後はより大規模な環境を想定したシミュレーション実験を通しての有効性の検証や、他の環境情報を考慮する手法の提案などにより、推定精度の向上を目指していく必要がある。

また気象の時系列データや人の混雑度など、より動的な情報を活用していく手法について考案することも今後の課題である。

参考文献

- [1] Ono, T., Ishizuka, H., Ito, K., Ishida, Y., Miyazaki, S., Mihirogi, O. and Tobe, Y.: UScan: Towards Fine-Grained Urban Sensing, *Int'l Workshop on Real Field Identification* (2007).
- [2] Live E!—生きた地球の環境情報, 入手先 <http://www.live-e.org/>.
- [3] Murty, R., Mainland, G., Rose, I., Chowdhury, A.R., Gosain, A., Bers, J. and Welsh, M.: CitySense: A Vision for an Urban-Scale Wireless Networking Testbed, *IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security* (2008).
- [4] 高木篤大, 菅生啓示, 石田泰之, 森田達也, 岩本健嗣, 蔵田英之, 戸辺義人: 微気象ネットワークセンシングの実際: 群馬県館林市の例, 電子情報通信学会技術研究報告 USN ユビキタス・センサネットワーク, Vol.109, No.248, pp.13-18 (2009).
- [5] 戸辺義人, 蔵田英之: 細粒度気象センサネットワーク構築の実際—群馬県館林市の例, 情報処理, Vol.51, No.6, pp.692-699 (2010).
- [6] 金井圭介, 大野貴弘, 石塚宏紀, 伊藤花乃子, 澤 義和, 三尋木織, 戸辺義人: 都市情報センシングシステムの提案, 情報処理学会研究報告 UBI, No.18, pp.141-148 (2008).
- [7] NAVITIME, available from <http://www.navitime.co.jp/>.
- [8] VICS, 財団法人道路交通情報システムセンター, 入手先 <http://www.vics.or.jp/>.
- [9] pgRouting Project: pgRouting, available from <http://www.pgRouting.postlbs.org/>.
- [10] 圓戸辰郎, 田村陽介: Web API を用いたセンサネットワークに関する研究: センサデータを利用したナビゲーションシステムの開発, 情報処理学会第 70 回全国大会講演論文集 (3), pp.23-24 (2008).
- [11] 白石 陽: センサネットワークのためのデータベース技術, 情報処理, Vol.47, No.4, pp.387-393 (2006).
- [12] 川島英之, 今井倫太, 安西祐一郎: センサデータベースシステム KRAFT の設計と実装, 情報処理学会論文誌: データベース, Vol.45, No.SIG14 (TOD24), pp.39-53 (2004).
- [13] 安藤 繁, 田村陽介, 戸辺義人, 南 正輝: センサネットワーク技術—ユビキタス情報環境の構築に向けて, 東京電機大学出版局 (2005).
- [14] 岩井将行, Niwat, T., 石塚宏紀, 中村陽一, 金井圭介, 白石 陽, 戸辺義人: TomuDB: 都市空間センサ情報を扱うデータベースシステム, 電子情報通信学会技術研究報告 USN ユビキタス・センサネットワーク, Vol.108, No.138, pp.13-18 (2008).
- [15] 石井那由他, 白石 陽, 石塚宏紀, 戸辺義人: 空間補間による異種解像度センサデータの統合手法, 情報処理学会論文誌: データベース, Vol.49, No.SIG7 (TOD37), pp.44-58 (2008).
- [16] Deshpande, A. and Madden, S.: MauveDB: Supporting Model-based User Views in Database Systems, *SIGMOD 2006*, pp.73-84 (2006).
- [17] Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J. and Rhind, D.W.: *Geographic Information Science*, John Wiley & Sons, Ltd. (2001).
- [18] 四之宮潤, 寺西祐一, 春本 要, 竹内 享, 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).
- [19] 張 長平: 空間データ分析, 古今書院 (2001).



伊藤 嘉博 (学生会員)

2011年公立ほこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科卒業。現在、同大学大学院システム情報科学研究科システム情報科学専攻修士課程在学中。



中村 嘉隆 (正会員)

2002年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。2007年同大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。2010年大阪大学大学院情報科学研究科特任助教。2011年より公立ほこだて未来大学システム情報科学部助教。博士(情報科学)。センサネットワークセキュリティに関する研究に従事。IEEE会員。



高橋 修 (フェロー)

1975年北海道大学大学院工学研究科修士課程修了。同年電電公社(現NTT)横須賀電気通信研究所入所。コンピュータネットワークの研究・開発・標準化に従事。NTTドコモを経て2004年より公立ほこだて未来大学教授。博士(工学)。本会業績賞。電子情報通信学会, IEEE各会員。



白石 陽 (正会員)

2002年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程単位取得退学。東京大学空間情報科学研究センター研究機関研究員, 助手, 助教を経て, 2009年より公立ほこだて未来大学助教, 2011年より同大学准教授。博士(工学)。データベース, 高度交通システム, 都市センシング, 地理情報システムに関する研究に従事。電子情報通信学会, 地理情報システム学会, ACM等各会員。