

分散型共起ベクトルによるセンサ情報の 可視化システムの提案

南 靖彦^{†1} 藤田直生^{†1} 柳沢 豊^{†2} 寺田 努^{†1} 塚本昌彦^{†1}

近年、小型で安価なセンサノードの登場によりセンサネットワークに注目が集まっており、環境モニタリングや社会基盤設備の管理などさまざまな応用で使用されている。これらのシステムでは大量のセンサノードの利用が想定されており、環境の変化から有効な情報をいかに検出するかは重要な課題である。従来の閾値ベースの情報収集方式やデータマイニングによる認識では、予測できない変化を捉えることや、センサデータから大域的な状況を認識しにくいという問題がある。そこで本研究では、センサネットワーク上の環境変化を分散型共起ベクトルにより可視化するシステムを提案する。これにより、過去の解析情報に頼らない知識の発見と、人による状況認識が可能となる。提案システムは、センサノードごとに隣接するセンサノードとセンサ値の比較を行うことにより、センサデータを可視化する。本研究では、シミュレータを作成してさまざまな可視化方法を実装し、有効な表示方法を検討した。

Sensor Data Visualizer with Distributed Co-occurrence Vectors

Yasuhiko Minami^{†1} Naotaka Fujita^{†1} Yutaka Yanagisawa^{†2}
Tsutomu Terada^{†1} Masahiko Tsukamoto^{†1}

Recently, small computer devices enable us to develop wireless sensor networks to be used for various application systems. Finding beneficial information from sensor readings data is one of the most significant technologies for the sensor network. Existing techniques such as data mining are popular to extract such important information, but it takes long time to analyze data with these techniques. To extract the beneficial information in real time, we propose a method to visualize sensor data based on co-occurrence vectors among surrounding sensor nodes. Our method immediately extracts and visualizes the differences among data obtained by nodes. We implemented a prototype system and we have discussed its performance.

1 はじめに

近年の半導体技術や無線技術、センシング技術の進歩により、無線通信機能をもつセンサノードの小型化、高性能化が進んでおりセンサノードを活用した無線センサネットワークに注目が集まっている。無線センサネットワークとは、さまざまな場所に配置した無線機能をもつ小型のセンサノードで物理量を測定し、実空間の情報化を行うシステムである。小型で安価なセンサノードの登場により、無線センサネットワークは環境モニタリング¹⁾や社会基盤設備の管理²⁾、農作物の生育状況の管理、物流管理、工場での生産管理、防犯・防災技術などさまざまなシステムで使用されている³⁾⁴⁾⁵⁾。これらのシステ

ムでは大量の利用が想定されおり、大量に発生するセンサデータから有効な情報を得るための技術が重要となる。大量のセンサデータから有効なデータを得るためには、過去のデータから発見されたパターンやルールを知識ベースとして学習し、有効なデータを得るデータマイニングにより、すべてのセンサノードから集めたセンサデータから情報を取り出す手法がある⁶⁾。また、TinyDB⁷⁾などセンサノードで一定以上の値が検出されたらデータの送信を行う閾値ベースによる方法によりセンサデータを取得する手法がある。しかしこれらの手法は、過去の解析により有効なデータが分かっているものから発見を行うため、今まで検出されていない新たなデータを発見することは難しい。

本論文では、2つのセンサ間のデータが一定の関

^{†1} 神戸大学 工学研究科

^{†2} NTT コミュニケーション科学基礎研究所

連性をもつ場合に、センサ間の関連性がどのように変化したかを示すベクトルを共起ベクトルと呼び、センサノード間の共起ベクトルを可視化する、分散型共起ベクトル可視化システムを提案する。提案する分散型共起ベクトル可視化システムでは、各センサノードが隣接するセンサノードとセンサデータを交換することでセンサノードの位置におけるベクトルを計算し、このベクトル情報を用いることにより、センサネットワーク上の環境変化を可視化する。センサデータの可視化により、大量のセンサデータを視覚的にとらえることができ、環境変化の情報を容易に得られる。また、可視化を行ったデータは過去の解析により検出されたものではないため、可視化されたデータより新たな情報の発見も可能となる。また、センサデータの処理は各センサノードによる分散処理により行われるため、データ全てをサーバに集めることにより生じる、データ処理や通信の問題も起こらない。

さらに、分散共起ベクトルによる可視化は様々な提示方法が考えられるため、本研究では分散型共起ベクトル可視化システムの基本的な機能をもつシミュレータを実装し、どのような情報提示が効果的かを検討した。

以下2章で関連研究について述べ、3章で提案する分散型共起ベクトル可視化システムの説明を行う。4章で実装したシミュレータの説明を行い、5章で提案システムについての考察を行う。最後に6章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2 関連研究

センサデータの可視化はさまざまな場面で行われている。たとえば身近なものでは降水量データの可視化があり、時間ごとの降水量の移り変わりを表示することにより、専門的な知識がなくとも現在までの降水量の情報を得ることや、今後の降水量の予想を容易に行うことができる⁸⁾。このように、センサデータを可視化し情報提示を行うことは有効な手段であり、センサデータの可視化に関しさまざまな研究が行われている⁹⁾¹⁰⁾。

白石ら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している¹¹⁾。空間集約の手法を用いることで、センサデータ分布の全面的な傾向を把握するのに効果的な、面的な連続性のあるデータ分布を表示することを可能としている。Carstenらは、無線センサネットワークのための可視化のフレームワーク SpyGlass¹²⁾を

提案している。SpyGlassはさまざまな種類のセンサデータの可視化に対応するためにプラグインが提供されており、開発者はプラグインを用いることによりさまざまなセンサデータの可視化を行うためのシステムの開発を容易に行うことができる。MoteVIEW¹³⁾はユーザと無線センサネットワークとの間のインターフェースとなるように設計されており、データベースにセンサデータを保存することや、センサデータの解析、グラフの表示、センサデータの分布を色により表示するなどの可視化を行うことができる。徳弘らは5×5の小型水晶振動子ガスセンサを用い、匂い、ガス流の可視化システムの開発を行っている¹⁴⁾。このシステムでは、ガスセンサを並べたアレイによりガス濃度の分布を動画像として可視化している。また、得られた動画像に対し画像処理アルゴリズムを用いることにより、ガス流の自動方向推定が可能であることを確認している。Dohertyは画像処理の技術を用いることによりセンサデータより環境の変化の流れを可視化している¹⁵⁾。この研究ではランダムに配置されたセンサノードから得られた気温のデータを、高低により色分けされたグリッド状の画像にし、時間変化するその画像にLucas-Kanadeアルゴリズムを用いることによりデータの流れをベクトルにより表示するシミュレーションを行っている。これらの研究では、センサノードから得られるセンサデータを一度サーバ等を集めることによって、サーバ上で処理を行うことでセンサデータの可視化を行っている。本研究で提案する分散型共起ベクトル可視化システムでは、センサノード上で隣接センサノードのデータを用い処理を行いセンサデータの可視化を行うことで、サーバ等で表示を行うだけではなく、センサノードのみで環境変化の可視化を行える点が特徴である。

3 分散型共起ベクトル可視化システム

本論文で提案する分散型共起ベクトル可視化システムは、多数のセンサノードが設置されたセンサネットワークのにおいて、サーバにセンサデータを集めて処理を行うのではなく、センサノードごとに近くのセンサノードから得られるデータのみを用いて可視化を行うシステムである。各ノードでは周辺のノードのセンサデータと自ノードのセンサデータとの共起ベクトルを随時計算することで、データ

がどのように変化し、伝わっていくかを可視化できる。通常のセンサネットワークでは、データマイニングによりデータベースに集められた大量のセンサデータから有効な情報を得るか、センサノードであらかじめ決められた閾値を超えたデータが検出されたときのみデータの送信を行い情報を得る閾値ベースの方法により状況の認識が行われることが一般的である。しかし、どちらの場合も過去に検出された現象をもとに情報の検出を行っているため、過去に検出されていない新たな情報の発見を行うことが難しい。そこで、センサデータを可視化することで、ユーザが情報を容易に得られるだけでなく、過去に検出されていない新たな現象の検出も直感的に行える。分散型共起ベクトル可視化システムでは、各センサノードがベクトルデータをもっているため、サーバで情報を集約して可視化するだけでなく、センサノード自身が情報の提示を行うことが可能である。センサノード自身で情報の提示を行うことにより、センサデータより異常な情報が検出された場合などに、その場ですぐに異常を伝えることができる。

3.1 システム概要

本システムでは、まずセンサネットワーク上の各センサノードがセンサデータを取得し、隣接するセンサノードとデータの交換を行う。たとえば図1(a)の中央のセンサノードは実線でつながれている隣接するセンサノードとのみセンサデータの交換を行う。そして、センサノード上で、センサノードのデータと隣接する1つのセンサノードのデータとの比較を行い2点間の環境変化の方向を求める。同様の処理を数個の隣接センサノードと行うことで、センサノードの位置における環境変化の方向と大きさを表すベクトルを求める。このようにすべてのセンサノード上で環境変化を表すベクトルを計算することで、データをサーバに集めることなく全てのセンサノードのベクトル計算が行える(図1(b))。このベクトルデータをもとにセンサネットワーク上の環境変化の可視化を行う。センサノードごとにベクトルデータを求めることにより、センサデータをサーバに集めなくても、その場で情報の提示が行え、ベクトルの値がある一定の閾値を超えたものだけを集めることにより、大量のデータをすべて通信しなくともセンサネットワーク内の環境変化を提示できる。共起ベクトルの可視化方法の例としては、ベクトルデータをサーバに集め、サーバ上でベクトルデータや、センサノードの位置情報より全体のセンサデータの流れを表す共起ベクトルの表示を行う

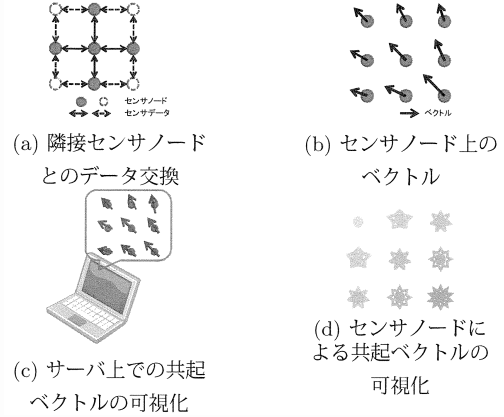


図 1: 分散型共起ベクトル可視化システム

Fig. 1: Distributed co-occurrence vector visualization system

ことが挙げられる(図1(c))。これにより、通信を行うデータの削減やサーバでのデータ処理の軽減ができるとともに、センサネットワーク内の環境変化を容易にとらえることができる。また、センサノードにLED等の表示器を取り付けることにより、求めたベクトルの大きさよりLEDの光の強さを変化させ、図1(d)のように共起ベクトルの可視化が行える。これによりデータをサーバに集めることなく、センサノード上の分散処理による共起ベクトルの可視化を行うことができ、環境変化の情報をセンサノードが設置されているその場で提示できる。

3.2 分散型共起ベクトル可視化システム

提案する分散型共起ベクトル可視化システムを実現するためには、隣接するセンサノードの関連付けが必要となる。また、各センサノードでは、隣接するセンサノードと連携しベクトル計算を行う。それぞれについて以下で述べる。

隣接センサノードとの関連付け

本システムでは、共起ベクトルを求めるために、各センサノードが隣接するセンサノードとデータの交換を行う。そこで、センサデータの交換を行う隣接センサノードとの関連付けを行わなければならない。隣接センサノードとの関連付けを行う際は、まずセンサノードの通信距離を考えなければならない。これは、無線センサノードの通信距離には限りがあり、センサノード間の距離が離れることによりセンサデータの通信エラーが発生し、データが通信できないなどの問題が起き、それによりセンサノード上のベクトル計算の精度が悪くなるためである。

また、センサノードに対し関連付けた隣接センサノードが周囲にある程度均等に配置されていない場合、センサノード上のベクトル計算が正しく行われない。したがって、精度の高い共起ベクトルの計算を行うため、センサノードに対しある程度均等に通信エラーのないセンサノードを関連付けることが必要となる。

共起ベクトル計算

隣接センサノードの関連付けをもとに、隣接するセンサノードとデータを比較し、各センサノード間のベクトル計算を行う。

ベクトル計算は、あるセンサノードに隣接するセンサノードのうちの1つとデータの比較を行い、2点間のベクトル計算を行う。2点間のベクトルを求めるには、式(1)で時間のずれを、式(2)で方向を求める。

$$A_k = \sum_{t=0}^m |a_{t+k} - b_t| \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm m) \quad (1)$$

ここで、 a_t と b_t は時間 t における自身のセンサノード a と隣接センサノード b のセンサデータの値である。時間 0 から m までの 2 点のデータの差を比較し A_k を求め、 k を $-m$ から m までずらし A_k が最も小さくなる時、2 点のデータが最も近いものとなるため 2 点のデータは時間 k だけずれていることになる。このときの k を f とする。 A_f より式(2)を用いて、2 点間のずれ時間の大きさと方向を表すベクトルを求める。

$$(A_x, A_y) = \begin{cases} \frac{A_f}{l}((x_a - x_b), (y_a - y_b)) & (f \geq 0) \\ -\frac{A_f}{l}((x_a - x_b), (y_a - y_b)) & (f < 0) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 $l = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}$ であり、 x_a, x_b, y_a, y_b はそれぞれ位置 a と位置 b の x 座標と y 座標である。隣接する他のセンサノードに対しても同様に計算し、隣接するセンサノードより求めたベクトルをすべて足し合わせ方向を求め、その地点での一定期間のデータの平均値を求めることにより大きさをつける。これより、センサノードの位置における共起ベクトルを求める。しかし、この方法で計算を行った場合、関連付けられた隣接センサノードの配置によっては、ベクトルが正しく表示されないことが考えられる。そのため、隣接センサノードとの関連づけの際に、均等に関連付けを行う工夫や、正しく計算できないセンサノード上のベクトルは表示させないなどの工夫が必要となる。

可視化

共起ベクトルの可視化は、前節で求めた共起ベクトルを用いて行う。

サーバ上で可視化を行う場合は、各センサノードの共起ベクトルと位置情報を用いて可視化を行い、センサノードに共起ベクトルを重ねて表示することで、データがどのような方向に流れていてどのように変化しているかということを経視的に得ることができる。また、各センサノードが共起ベクトル情報をもっているという特長を活かすことにより、サーバに送信することなく、センサノード自身で可視化を行うことも可能である。例えば、センサノードに LED などを取り付けることにより、ベクトルデータの強弱を LED の明暗で表し、センサネットワーク全体で LED の強弱により環境変化の可視化を行うことが可能である。

4 システムの実装

本研究では、分散型共起ベクトル可視化システムの有用性を検討するため、シミュレータの実装を行った。実装では、分散型共起ベクトル可視化システムの表示方法の検討を行うため表示部分の作成を主に行った。そのため、実際のセンサノードは使用せず、隣接センサノードとの関連付けや、センサノード上でのベクトル計算等は PC 上で行う。また、データは発信源からの距離により理想的に減衰する振動データを用い、共起ベクトルの可視化を行えるようにした。共起ベクトルの可視化は、サーバ上で行う場合やセンサノード上の LED を用い表示した場合などを想定し、数種類の表示方法を実装した。

4.1 システムの概要

実装したシステムでは、まず図 2 のように画面上にセンサノードを設置し、サンプルデータの発信源の登録を行う。センサノードの設置時と同時に、システムはセンサデータを交換するための隣接センサノードとの関連付けを行う。また、今回の実装したシステムでは、設置したセンサノードは正確な位置が分かっているとする。センサネットワークのモデルとしては、ある地点においてセンサ値の変化が起こり、それが伝搬していくようなモデルの変化を採用した。本稿では変化が起こる点をデータの発信源と呼び、シミュレータ上に自由に配置できるようにした。Start ボタンを押すと、隣接センサノード同士でデータの交換を行い、隣接センサノード間のベクトルが計算される。このベクトルデータをもとに、図 3 のような共起ベクトルを可視化する。

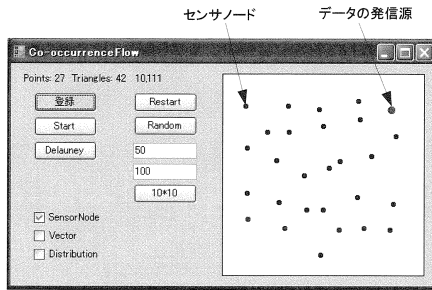


図 2: ノード登録

Fig. 2: Registration of sensor nodes

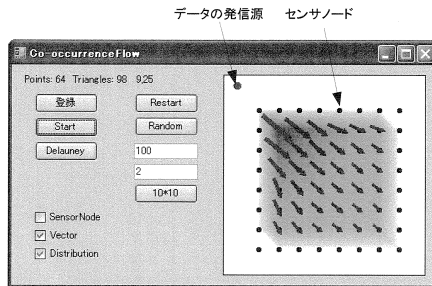


図 3: 共起ベクトルの表示

Fig. 3: Visualization of co-occurrence vector

4.2 実装

以下に実装を行った分散型共起ベクトル可視化システムについて述べる。

センサノードの位置登録・関連付け

分散型共起ベクトル可視化システムを実現するためには、センサノードの位置推定が必要となるが、今回の実装ではシステムがセンサノードの位置を既に把握できているとする。実装したシステムではセンサノードはドローネ三角分割を用いることにより、隣接センサノードとの関連付けを行う。実際のセンサノードを用い本システムを実現する場合は、センサノードの距離により通信エラーが発生することが考えられる。そのため、共起ベクトル計算の精度を上げるためには通信距離も考慮した隣接センサノードの関連付けを行う必要があるが、今回の実装では通信距離や通信エラーは考えずにいった。

センサノード上のベクトル計算

センサノード上のベクトル計算は、関連付けを行ったセンサノードのセンサデータより 3 章で述べた式 (1),(2) を用いて求める。隣接する各センサノードからセンサノード間の振動の伝わる方向を表

すベクトルを計算し、関連付けを行ったセンサノード間のベクトルを全て足し方向を求め、一定期間のセンサデータの平均値より大きさをつけることにより共起ベクトルを求める。

可視化を行うセンサノードの選択

関連付けた隣接センサノードの位置によっては、ベクトルが正しく計算されない場合がある。そこで今回の実装では関連付けられた隣接センサノードの配置により、ベクトルを表示するかしないかを判断した。座標 x_0, y_0 にあるセンサノードに関連付けられたセンサノードの座標 x_i, y_i に対し式 (3) により、座標の平均を求める。

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, Y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (3)$$

ここで、 n は関連付けられたセンサノードの個数である。この X, Y と x_0, y_0 との差を求め、この差が一定の閾値以上であれば、ベクトルが正しく計算できないとし、表示を行わないこととした。

共起ベクトルの可視化

共起ベクトルの表示は、各センサノードの位置でのベクトルデータを用いて行い、共起ベクトルの可視化に関して検討を行うために、サーバにベクトルデータを集めて行う方法と、センサノード自身が情報の表示を行う方法を想定し実装した。実装した表示方法は下記の 3 種類である。

図 4 は、センサノードで計算を行ったベクトルをサーバに集めることを想定し、サーバで集めたベクトルデータよりセンサノード上のベクトルの表示を行うことにより全体の共起ベクトルの提示を行ったものである。ベクトルの向きに震動が伝わっており、加速度が減少することによりベクトルの長さ太さを小さくすることにより共起ベクトルを示している。

図 5 は、同様にベクトルデータをサーバに集め、ベクトルの大きさにより色の濃淡と透明度を変えることにより共起ベクトルの可視化を行ったものである。データの発信源に近い場所ほど加速度が大きいので濃く表示し、発信源から離れることにより加速度が小さくなり薄く表示することにより、共起ベクトルの可視化を行っている。

図 6 は、各センサノード上で計算したベクトルを集めず、センサノード上の LED 等の明暗により共起ベクトルの可視化を行うことを想定したものである。加速度の大きい発信源に近い場所ほど、センサノードの表示を明るくすることにより、センサネットワーク全体の可視化を行っている。

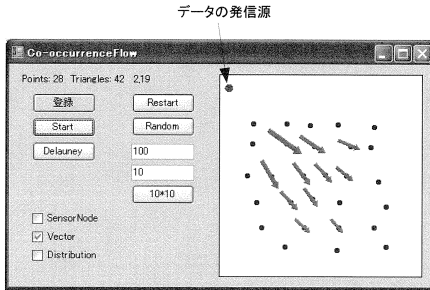


図 4: ベクトルによる共起ベクトルの可視化
Fig. 4: Vector-based visualization

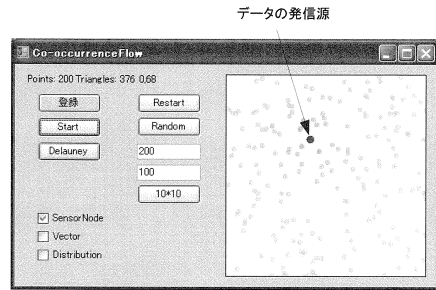


図 6: LED による共起ベクトルの可視化
Fig. 6: LED based visualization

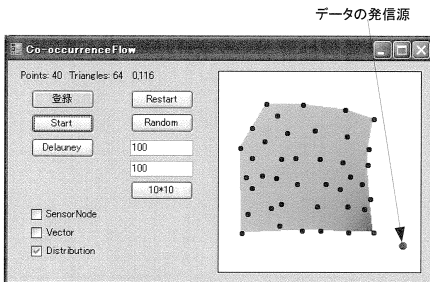


図 5: 色分けによる共起ベクトルの可視化
Fig. 5: Color map based visualization

5 考察

実装した分散型共起ベクトル可視化システムのシミュレータより可視化された情報について考察を行う。本論文で実装したシミュレータでは、サーバにベクトルデータを集めて共起ベクトルの可視化を行う方法と、センサノード自身がベクトルデータより情報の表示を行う方法を想定し、センサデータの可視化を行った。サーバにベクトルデータを集め、図 4 のようにセンサノード上にベクトルを表示することにより共起ベクトルの可視化を行う方法では、震動がどの方向に伝わり、どのように減衰しているのかという情報を読み取ることができる。また、加速度データの発信源が分かっていない場合でも、表示されたベクトル情報より発信源の予測が可能であることも確認できた。端にあるセンサノードや、関連付けた隣接センサノードに偏りがあるセンサノードに関しては、式 (3) の条件に当てはまり、表示されないことが確認できた。しかし、センサノードの配置によっては表示されるセンサノードの数が少なくなってしまうため、ある程度隣接セ

ンサノードに偏りがあっても正しく計算できるように補正する必要がある。また、図 5 のように、ベクトルデータの大きさにより色分けし、分布の表示を行う方法でも、振動の伝わる方向や減衰の様子を読み取ることができる。また、センサノードが設置されていない場所も色づけられているため、センサノードのない場所でのデータを予測することも可能である。サーバにデータを集めず、図 6 のようにセンサノード上の LED により情報提示を行う方法では、センサノード上の LED の明暗により、データの流れを読み取ることが確認できた。これにより、センサノードによる分散処理のみで、センサネットワーク上の環境変化の情報を検出することが可能となる。

6 まとめ

本論文では、センサノードごとにデータの流れを表すベクトル計算を行うことで、分散処理によりセンサデータの可視化を行う、分散型共起ベクトル可視化システムを提案をした。センサデータの可視化を行うことにより、過去に検出されていない情報の発見が難しいデータマイニングや閾値ベースのセンサデータ処理の問題点を解決できる。また、本システムの特徴である、各センサノードの分散処理によるセンサデータの可視化を行うことで、サーバにデータを集め可視化を行うだけでなく、センサノード自身が LED 等を用いることにより情報の表示が可能となる。本システムの有用性を示すためシミュレータの作成を行い、共起ベクトル可視化の検討を行った。共起ベクトルの可視化をシミュレートすることにより、分散型共起ベクトル可視化システムによりセンサネットワーク内の環境変化の情報を検出可能なことが確認できた。また、可視化された情報

よりデータの発信源の予測や、センサノードのない場所のデータの予測を行えることが分かった。検討結果より、センサデータの可視化を行い情報を提示するだけでなく、そこからさまざまな知識の検出が行われる可能性がある。

今後は、さらに効果的な可視化方法についての検討を行うとともに、実際のセンサノードにより本システムを実現することを目標とする。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤 (A)「ユビキタス環境のための全体プログラミング方式」(20240007)の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler and J. Anderson: “Wireless sensor networks for habitat monitoring,” International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, pp.88-97 (2002).
- 2) 川谷充郎, 金哲佑, 藤本達貴, 塚本 昌彦, 藤田 直生, 南 靖彦: “橋梁振動モニタリング用 MEMS 無線センサノードの開発と実橋適用性検討,” 平成 20 年度全国大会第 63 回年次学術講演会 (2008).
- 3) 総務省: “情報通信白書平成 20 年度版,” pp.230 (2008).
- 4) Romer, K. and Mattern, F.: “The design space of wireless sensor networks,” Wireless Communications, IEEE, Vol. 11, No. 6, pp.54-61 (2004).
- 5) I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian and E. Cayirci: “Wireless sensor networks: a survey,” Computer Networks, Vol.38, Issue 4, pp.393-422 (2002).
- 6) 有村博紀: “大規模データストリームのためのマイニング技術の動向,” 電子情報通信学会論文誌. D-I, 情報・システム, I-情報処理, Vol.J88-D-I, No.33, pp.563-575 (2005).
- 7) Samuel R. Madden, Michael J. Franklin, Joseph M. Hellerstein and Wei Hong: “TinyDB: an acquisitional query processing system for sensor networks,” ACM Trans. Database Syst., Vol.30, pp.122-173 (2005).
- 8) 気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>.
- 9) Shinji Inoue, Motoi Nakao, Tatsuo Yoshinobu and Hiroshi Iwasaki: “Chemical-imaging sensor using enzyme,” Sensors and Actuators B: Chemical, Vol.32, pp.23-26 (1996).
- 10) Doggett, W. and Vazquez, S.: “An architecture for real-time interpretation and visualization of structural sensor data in a laboratory environment,” Digital Avionics Systems Conferences, 2000. Proceedings. DASC. The 19th, Vol.2, pp.6D2/1-6D2/8, (2000).
- 11) 白石陽, 安西祐一郎: “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,” DEWS (2003).
- 12) Carsten Buschmann, Dennis Pfisterer, Stefan Fischer, Sandor P. Fekete, Alexander Kroll: “SpyGlass: a wireless sensor network visualizer,” ACM SIGBED Review, Vol.2, pp.1-6 (2005).
- 13) MoteVIEW, Crossbow Technology Inc: http://www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/MoteView_Users_Manual.pdf.
- 14) 徳弘崇文, 石田寛, 中本高道, 森泉豊榮: “小型水晶振動子ガスセンサアレイを用いた匂い・ガス流可視化システムの研究,” 電子情報通信学会技術研究報告, OME, 有機エレクトロニクス (1999).
- 15) Lance Doherty: “Algorithms for Position and Data Recovery in Wireless Sensor Networks,” Submitted to the Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley (2000).