

センサデータの意味的解釈に基づく 分散センサ情報管理システム

川上 朋也^{1,a)} 寺西 裕一^{1,2} 春本 要³ 下條 真司¹

受付日 2012年5月14日, 採録日 2012年11月2日

概要: ユビキタス環境ではセンサデータを共有し, ユーザの状況に応じて内容を変化させる「コンテキストウェアサービス」の実現が期待できる. このとき, 膨大な数のセンサ端末が存在することが予想されるため, 端末から情報を直接取得することで高いスケーラビリティを維持する P2P モデルが有効である. しかし, 計画的にではなく自律的にセンサ端末が配置される分散環境を想定する場合, 設置状況を事前に把握できないため, 指定する種類のセンサが適切な地域に存在するとは限らない. そのため, 必要なセンサ情報を取得できず, ユーザの要求に回答できないという問題が発生する. また, 短期間に同様の取得要求が繰り返された場合においても, 想定する分散環境ではそのたびに周辺端末への問合せなどが行われ, それらの冗長な処理が端末やネットワークに不要な負荷をかけるという問題が考えられる. 本稿ではまず, 指定するセンサが存在せず状況判断が行えないという問題に対して, 周辺に存在する他のセンサ端末から情報を収集して意味的に把握し, 演繹処理により状況判断の結果を導出するセンサ情報管理システムを提案する. 次に, 同様の要求に対する冗長な処理の問題に対しては, 要求に対する処理結果を共有するための仮想センサを設置し, 過去の結果を再利用することで処理の実行を抑制する手法を提案する. 本稿で提案するシステムを実装し, 仮想センサによって負荷を削減する手法の有効性をシミュレーションにより評価した. 本シミュレーション結果により, 高い正答率を維持しつつトラフィックの発生を大きく抑制できることを確認した.

キーワード: コンテキストウェアネス, センサデータ, 分散処理, P2P, 演繹

Distributed Sensor Information Management System Based on Semantic Analysis of Sensor Data

TOMOYA KAWAKAMI^{1,a)} YUICHI TERANISHI^{1,2} KANAME HARUMOTO³
SHINJI SHIMOJO¹

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

Abstract: In the ubiquitous computing environment, we believe that P2P-based context-aware application utilizing sensor data is important. However, since sensors are not placed under the control of one specific entity, it is difficult to retrieve appropriate information from the distributed sensors. In addition, when the same queries are sent by different users, same processes for collecting sensor data are repeated. The repetitive processing causes a load increase of sensors and network. In this paper, we propose a P2P-based system for managing distributed sensor information, which treats sensor data based on those semantic. In addition, we propose a method to create virtual sensors by real peer. The virtual sensor manages processed data as a cache of real sensor data. We implemented the proposed system and method. Then we evaluated the proposed virtual sensor placement method by simulations. By the simulation results, we confirmed that proposed method achieve a context-aware application with reducing the amount of network traffic.

Keywords: context awareness, sensor data, distributed processing, P2P, deduction

1. はじめに

近年、ネットワークや端末の種類、セキュリティを意識せず、「いつでも、どこでも、だれでも」安心してサービスを利用できる社会、いわゆるユビキタス社会が実現されつつある。このユビキタス社会においては、PCなどの固定端末をはじめ、携帯電話などのモバイル端末、マイクロプロセッサが内蔵された情報家電、環境中に設置された多種多様なセンサなど、あらゆる情報端末や機器がネットワークで接続されるといわれる。また、サービス面においても情報発信ツールの整備が進み、一般的なユーザであっても口コミ情報などのコンテンツを容易に発信できる環境が整いつつある。しかしその一方で、情報機器類やユーザが生成する情報が膨大に発生すると考えられ、ユーザは自身が必要とする情報を採り出すことが困難になると予想される。このとき、特に情報リテラシの度合いによってサービス享受レベルに格差が生じる、いわゆるデジタル・ディバイドが問題となる。そのため、ユビキタス社会においては、システム側においてユーザやユーザの周囲の状況（コンテキスト）を考慮し、ユーザに適する情報の発見と提供を行うコンテキストウェアサービスの実現が期待されている。

コンテキストウェアサービスでは、サービス利用者の周辺環境の情報や嗜好情報などのプロフィール情報、スケジュール情報、購買履歴などの情報を利用し、利用者のコンテキスト（状況）を考慮して動作する。たとえば、通常の最寄り検索サービスにおいて「遊園地」という検索を行った場合、近い順にA, B, C, Dの遊園地が見つかり、ユーザにはそのままA, B, C, Dが結果として返信されるのみである。一方、ユーザの状況、すなわちコンテキストを考慮した最寄り検索サービス（図1）では、近くにある遊園地A, B, C, Dを列挙したうえで、各遊園地の周辺に設置されたセンサより現在の状況を取得し、A, B, C, Dのうちで晴れて混雑していない遊園地であるBとCを適切な結果として返信することとなる。

コンテキストウェアサービスにおいてユーザに適切かつ有益な情報を提供するためには、センサデータを意味的に解釈するなど、ユーザの状況を正確に把握する必要がある。そして、現在、クライアント・サーバモデルにおいて情報を意味的に解釈する研究が数多く行われている。まず、Niらはセマンティックセンサネットワークを実現するため

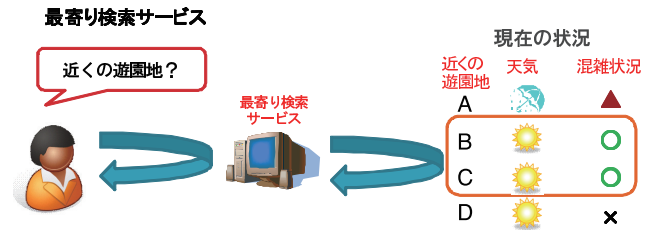


図1 コンテキストウェアサービスの例
Fig. 1 Example of context-aware service.

のフレームワークを提案している [1]。また広田らは、セマンティックセンサネットワークを用いることで実際世界の状況を論理表現で表し、物体の情報や物体どうしの関係、物体と環境との関係を記述している [2], [3]。この研究では、実世界志向のメタデータ管理システムである MeT を提案している。さらに、センサデータを推論によって状況解釈する研究 [4] が存在し、複数の情報源の情報の関連を定義するために Ontology を使うアプローチもある [5], [6]。これらのセンサデータから意味的状況を解釈する研究は、コンテキストへの実現のために重要であると考えられる。しかし、これらの既存手法はセンサデータやメタデータの管理、意味的に解釈する処理を集中的に行っており、膨大な情報やユーザが存在する環境では特定の端末や組織、ネットワークに負荷が集中する。そのため本研究では、特定のサーバ機器などが情報の管理や処理を集中的に行うのではなく、端末が自律的に情報を発信する分散環境においてセンサ情報の共有と解釈を行うことを目指す。

特定の位置に設置されたセンサが発信する情報などを分散管理するための P2P 技術として、位置情報に基づくオーバーレイネットワーク構築手法が提案されている [7], [8]。さらに、端末（ピア）の位置情報に基づいてオーバーレイネットワークを構築し、各ピアに担当領域を割り当てることで情報を分散管理する手法が提案されている [9]。しかし、事前に設置状況を把握できないため、指定する種類のセンサが要求する地域に存在するとは限らない。そのため、ユーザの要求に応答できない場合が生じる。また、特定の地域や種類のセンサに多数のユーザからのクエリが送信される場合、そのたびに同様のセンサデータの探索や収集処理が発生し、それらの重複処理が周辺のセンサ端末やネットワークに不要な負荷をかけることが考えられる。

そこで本研究では、センサデータを意味的に解釈し、木構造のルールに従って状況判断が可能な分散センサ情報管理システムを提案する。提案システムではセンサ情報を位置に基づくオーバーレイネットワーク上で分散管理し、意味的な解釈や状況判断は各ピアが自律的に行う。このとき、センサ情報の地理的な補間やルールに従った処理を行うことで、要求する場所にセンサ情報が存在しない場合でも状況判断を可能とする。また、提案システムはセンサデータを扱う Raw Layer (RL)、センサデータを地理的に補間す

¹ 大阪大学サイバーメディアセンター
Cybermedia Center, Osaka University, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

² 独立行政法人情報通信研究機構
National Institute of Information and Communications Technology, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

³ 大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

a) kawakami.tomoya@ais.cmc.osaka-u.ac.jp

る Abstract Layer (AL), 意味的に解釈する Logical Layer (LL) の3階層で構成し, AL および LL における処理結果を記憶する. 処理結果を仮想的なセンサによる情報として共有することで, 各層での同様の問合せに対する処理を削減する.

2. センサデータの活用

2.1 P2P アーキテクチャ

1つの組織がすべてのセンサを配置し, その組織にすべてのデータを集約することによりシステムを構築する場合, 広域のカバレッジを実現するには, センサ自体の配置, データ集約による負荷を収容可能な設備の構築に大きなコストがかかってしまう. そのため, 複数の組織が設置したセンサ間を相互に接続してシステムを構築し, 互いにセンサデータを共有することで, 低コストで広域のカバレッジを実現するとともに, データアクセスの負荷を分散する方法について, 多くの研究が行われている. 特に, 各組織のセンサやセンサデータのストレージを運用の利便性や組織ごとのデータ管理の独立性を維持しつつ相互接続可能な, P2P アーキテクチャによる接続方法の研究開発がさかんである [7], [8], [9]. これらの既存研究では, 位置情報に基づくオーバーレイネットワーク構築手法により P2P ネットワークを構成し, センサをピアとして相互接続する方法や, センサデータを位置依存コンテンツとして扱い, ピア間で共有する方法が用いられている.

位置情報に関連する既存 P2P 技術には, LL-Net (Location-based Logical Network) [7] やドロネーネットワーク [8] など, ピアの位置情報に基づくオーバーレイネットワーク構築手法がある. LL-Net は位置情報を基準にオーバーレイネットワークを構築する P2P システムであり, 指定した領域内に存在するピアに対してクエリを到達させるという操作を効率良く行うことができる. また, LL-Net では個々のピアは位置情報として緯度・経度を持ち, 探索領域を1平面にとらえ, 緯度, 経度方向に基盤目状のエリアに区切る. そして, エリアを階層的に扱うことで, 探索クエリを効率良く確実に目標とするエリアに転送することができる. さらに, ドロネーネットワークとはポロノイ領域 (Voronoi regions) を利用し, 地理的に近いピアとのリンクを構成する手法である. ここで, ポロノイ領域とはそれぞれの点 (母点) とその周囲の点で得られた垂直二等分線を境界とする領域であり, ドロネーネットワークではそれぞれのピアが母点となる. これらの位置に基づいた P2P ネットワークの多くは, 任意の位置範囲をキーとしたピア探索 (Range search) や, 任意の地点からの最近傍ピア探索 (Point Nearest Neighbor search, PNN search) などの複雑なクエリに対応している [10].

ピアの位置情報に基づくオーバーレイネットワークを利用し, ピア間で決められた担当領域に基づいて位置依存コ

ンテンツを分散管理する手法として, Mill [9] が提案されている. Mill とは, (x, y) などの2次元の位置情報座標を Z-ordering [11] によって1次元の円周上に対応させ, コンテンツの登録や検索の手順を単純化した管理手法である. そして, コンテンツの位置が変換された ID を担当する端末にそのコンテンツ自体を管理させる. また, Mill ではオーバーレイネットワークはリンク構成に基づいて構築されており, 任意の ID のピアへのクエリメッセージを効率的に送信することができる.

2.2 センサデータ収集における問題

P2P アーキテクチャによってセンサを接続し, コンテキストアウトウェアサービスを構築する場合, 2.1 節のセンサをピアとして相互接続する方法, および, センサデータを位置依存コンテンツとしてピア間で共有する方法のいずれにおいても, 次の2つの問題が生じる.

- センサ不在の問題

P2P アーキテクチャでは, あらかじめ1つの組織が計画的にセンサを配置するのではなく, 複数の組織が設置したセンサ間を相互に接続してシステムを構築する. そのため, センサが配置されていない領域が生じる可能性がある.

- 検索冗長性の問題

P2P アーキテクチャは, ピア間で相互にリソースの検索処理を実行するため, 1つのセンサの検索でも複数のピア間で通信が必要となる. コンテキストアウトウェアサービスでは, 同様の状況にある複数ユーザが同様の検索を行う場合が起きるため, 冗長なセンサの検索が行われてしまう.

特定の場所の状況を把握するためには, 対象とする領域に置かれたセンサに対応するピアを P2P ネットワークを介して検索する必要がある. このとき, LL-Net では, 階層化されたエリアに対応するピアへクエリが転送される動作が繰り返される. ドロネーネットワークにおいては, 領域的に近い位置に対応するノードへのリンクをたどる操作が繰り返されるため, 対象領域が離れた位置である場合, 複数のピアを経由する必要がある. Mill においても, ピアの担当範囲の ID へ到達するまでに, 複数回のピア間のメッセージ転送が必要となる. このとき, ピア間のメッセージ転送の回数については, ピアの地理的な密度などによって変化する.

たとえば, 組織 A が領域 X を中心にセンサを配置しており, 組織 B が領域 Y を中心にセンサを配置していた場合, 組織 A と B のセンサのみから構成される P2P ネットワークでは, 領域 X, Y 以外の領域ではセンサ情報を取得することができず, ユーザの要求に回答できない状況, すなわち, センサ不在の問題が生じる. このとき, P2P ネットワークでは, センサが不在であることを知るために, 上

記の複数回のメッセージ転送が必要である。しかし、対象領域にセンサが存在しないため、状況の把握に失敗する。

また、たとえば、ある地点に m 人のユーザが存在する場合、それぞれが短期間にコンテキストウェアサービスにアクセスすると、同じ状況判断の結果になる可能性がある。このとき、ロジックによっては、1つの状況を把握するために、複数回センサを検索する処理が必要となる。たとえば、状況判断を行うために3回のセンサの検索が必要で、全センサ数を n 、1検索あたりのメッセージ転送回数が $\log n$ 回であった場合、 $3m \log n$ 回のメッセージ転送が行われる。しかし、 m 人のユーザに対する状況判断の結果はすべて同じであり、多くが冗長なメッセージ転送となる。

これらは、P2P アーキテクチャによってコンテキストウェアサービスを実現する際に生じる課題であるといえる。本研究では、これらの課題を解決するための新たなシステム構成法を提案する。

3. 分散センサ情報管理システムの提案

3.1 アプローチ

本研究では分散環境においてセンサ情報を共有するため、位置に基づいたオーバーレイネットワーク上でセンサ情報を管理するシステムを提案する。

本研究ではまず、指定するセンサが存在せず状況判断が行えないという問題に対して、周辺に存在する他のセンサ端末から情報を収集して意味的に把握し、演繹処理により状況判断の結果を導出するシステムを提案する。このとき、意味的な状況把握のために必要な種類のセンサが対象となる位置に存在しない場合、周辺に存在する同一種類のセンサをもとに当該位置の情報を推測する。また、必要となる種類のセンサが周辺にも存在しない場合においては、異なる種類のセンサの情報を意味的に解釈することで、当該地域の状況に関する情報を導き出すことを考える。次に、センサデータにおける重複処理の問題に対しては、演算結果をもとに実端末が仮想センサを設置し、その仮想センサに処理結果を保持させる手法を提案する。処理結果を保持して再利用することで処理回数が減少し、端末やネットワークへの負荷を軽減することができる。

3.2 センサ情報管理の階層化

3.2.1 各階層における処理

提案するセンサ情報管理システムは、センサデータをそのまま扱う Raw Layer (RL)、センサデータの地理的な距離をもとにデータを補間する Abstract Layer (AL)、演繹処理により補間されたデータをもとに意味的解釈を行う Logical Layer (LL) の3階層で構成される。以下、各層について説明する。

- Raw Layer (RL)

センサデータをそのまま取り扱うレイヤである。RL

では雨センサや温度センサなどの異種センサ端末が多数分散して配置されており、各センサは周囲の環境を監視し、観測値を保管する。このレイヤのセンサは本稿では、Raw Sensor と呼ぶ。また、各 Raw Sensor が自分のセンサ種類、位置と観測値という情報を持つ。たとえば、位置 (2,3) に設置されている雨センサが雨量 23 (ml/時間) を測定した場合、「雨センサ：位置 (2,3), 値：23ml」というデータを保持し、他のピアに公開する。他のセンサ端末は位置とセンサ種類を指定し、検索することで、雨センサ (2,3) の観測値を取得できる。

- Abstract Layer (AL)

地理的な距離をもとにセンサデータを補間した情報を提供するレイヤである。このレイヤでは、LLからのセンサデータ取得要求に対して、要求された位置のセンサデータを取得し、応答する。また、要求する位置に Raw Sensor が存在しない場合では、周辺に存在する Raw Sensor 情報を利用することで、その位置に欠ける Raw Sensor 情報を補間する。この補間処理は、その位置からある一定距離の領域に存在する Raw Sensor 値から特定の計算モデルに基づいてその位置の推定値を計算することにより実現する。提案システムでは、最近傍法や距離による加重平均、クリギング法などの空間補間による計算モデルを想定する。また、推定値を計算するために収集対象とするセンサデータの距離は、計算モデルによって定義されるものを用いる。センサが十分に存在しない環境において、指定地点の推定値を得る方法については、クリギング法をセンサネットワーク内で分散的に行う方法 [12] や、センサネットワークごとに DB ピアと呼ばれる端末を設置し、センサデータの集約および補間を行う方法 [13] などがすでに提案されている。推定値の計算にはこうした既存手法の適用も可能と考える。

- Logical Layer (LL)

ユーザクエリの意味解釈を行い、概念を定義したルールを用いた演繹によって、ユーザクエリに応答するために取得必要な関連センサを導く。そして、これらの関連センサのセンサデータを AL から取得し、得られたセンサデータから実際の状況を判断し、ユーザクエリに応答する。AL, LL の組合せによって、複数の推定値に基づくルールを用いた状況判断が可能となる。このとき、ルールを用いることによって、単一種類のセンサだけでなく、複数の異種センサの推定値を用いた状況判断が行える。たとえば雨という状況を推定する際、雨センサが存在しなければ気圧センサを用いるといったことが可能であり、単一種類のセンサのみを用いた場合と比べ、センサ不在の問題をより広範囲で解決できる。本稿では、ルールはあらかじめこのレイ

ヤの処理モジュールとして各ピアに組み込まれていることを想定する。また、ルールの種類や管理方法は数多く考えられるが、それらは本稿の範疇外とする。

3.2.2 クエリに対する処理の例

たとえば、遊びに訪れるのによい場所かどうかの「SuitablePlace(x,y)」というクエリを受信した場合、まず木構造のルールにより LL で SuitablePlace の意味を解釈し、必要であると導出されたセンサデータを AL に要求する。AL ではこの LL からの要求に対し、必要となる地理的な範囲のセンサデータを RL で収集し、当該位置におけるセンサの観測値を推定する。そして、得られた推定値を AL が LL に返し、LL はその推定値を用いて判断することで問合せ元に応答する。

階層化されたセンサ情報管理システムの例を図 2 に示す。この例では以下のルールが用いられ、この演繹によって、「よい場所 (SuitablePlace)」とは「よい天気 (GoodWeather) かつ混雑していない (NotCrowded)」, そして「よい天気」とは「雨が降っていない (NotRain)」または「涼しい (Cool) と蒸し暑くない (NotHumid)」だと解釈できる。つまり、「『よい場所』と関連する単純な意味の状態は『雨ではない』かつ『涼しい』かつ『蒸し暑くない』かつ『混雑していない』状態であると分かる。

- ルール 1 :
 $SuitablePlace \leftarrow GoodWeather$
 $and\ NotCrowded$
- ルール 2 :
 $GoodWeather \leftarrow NotRain\ or\ (Cool\ and\ NotHumid)$

AL では、LL から依頼された対象となる状態の情報を取得する。NotRain の場合を例として述べる。まず NotRain は雨センサと関連し、位置 (x,y) の雨センサの雨量を探索する。そして、位置 (x,y) には雨センサがないので、対象とされる位置からユーザやアプリケーションが決めた範囲、ここ

では半径 100 m の領域内の RL に存在する雨センサの雨量値を取得する。そして、雨センサ用の計算モデルによって雨量の推定値を算出する。この場合では雨量はすべて 0 なので、推定値は 0 であり、NotRain = True と判断し、LL に応答する。同様に NotCrowded = True, Cool = False, NotHumid = True という単純な意味的状态を取得し、LL に応答する。次に LL では、取得できた単純な意味的状态の基づいて、ルールマッチングを行う。まず、以下のルール 2 のマッチングにおいて GoodWeather = True との結果を得られる。その後、以下のルール 1 のマッチングを行い、SuitablePlace = True の最終結果をユーザに応答する。

- ルール 2 :
 $GoodWeather[True] \leftarrow NotRain[True]\ or$
 $(Cool[False]\ and\ NotHumid[True])$
- ルール 1 :
 $SuitablePlace[True] \leftarrow GoodWeather[True]\ and$
 $NotCrowded[True]$

3.3 仮想センサによる演算結果の再利用

3.3.1 仮想センサの生成

本研究では、任意のクエリに対する処理結果に基づいて仮想センサを生成し、同様のクエリが発生した場合に「仮想センサ」が応答する方法を提案する。

ピアにおいて返信した処理結果をキャッシュしておき、同様の検索に対する返信として用いることでメッセージ転送回数を削減する方法が考えられるが、P2P ネットワークでは同じ検索が同じピアに転送されるとは限らないため、この方法の効果は限定的となる。

そこで本研究では、AL や LL における処理結果をキャッシュとして共有できるよう、当該処理結果を返信する仮想的なピアとして P2P ネットワークに登録する。検索要求に対してこの仮想的なピアが応答すれば、複数のピアがキャッシュを共有できる。この仮想的なピアには有効範囲を設け、見かけ上、通常のセンサと同様の振舞いを実現する。この有効範囲を持つ仮想的なピアが「仮想センサ」である。

仮想センサを効率的に使用するためには、その仮想センサの情報を容易に取得できることが必要である。そのため、本研究ではクエリに基づいて発見される可能性を考慮し、元のクエリの位置を中心として地理的に一番近くの実端末上に仮想センサを生成する。具体的には、クエリの対象となる位置に最も距離の近いピアが AL と LL における処理結果をキャッシュとして保持し、当該位置へのセンサ探索要求に応答する仮想センサを生成する。仮想センサはそれぞれ Logical Virtual Sensor (LVS), Abstract Virtual Sensor (AVS) と呼び、クエリに対して応答可能な LVS や AVS があれば、それぞれのレイヤの処理を行わずに仮想セ

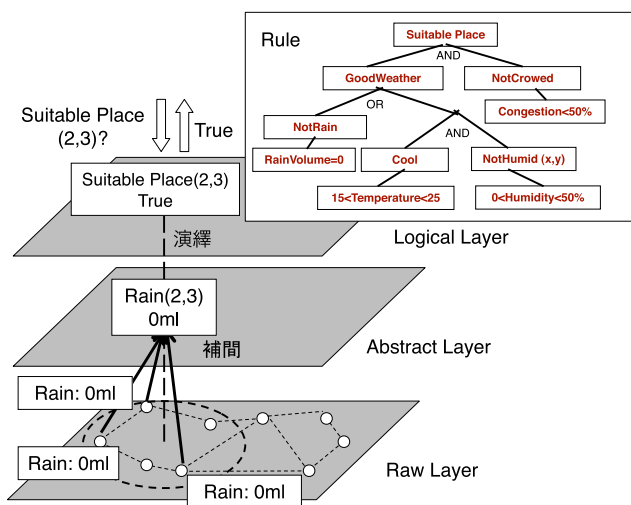


図 2 階層化されたセンサ管理の構造

Fig. 2 Construction of the layered management of sensors.

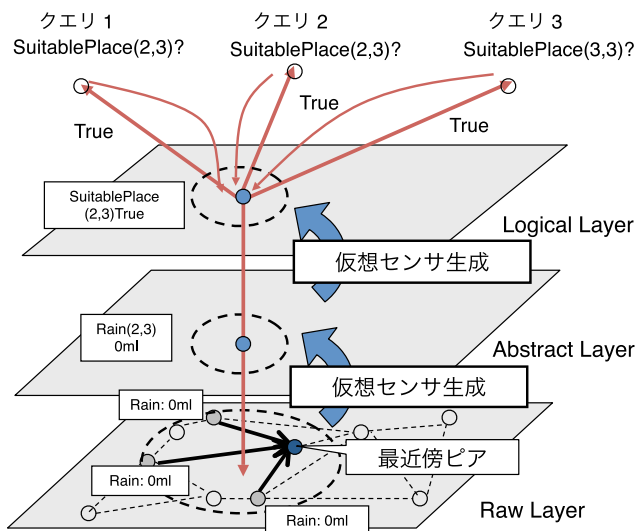


図 3 仮想センサ設置の流れ

Fig. 3 Process flow of virtual sensor placement method.

ンサの結果を利用する。仮想センサ生成の流れを図 3 に示す。

生成された仮想センサは、物理的なセンサの位置とは関係なく、あたかも指定された位置にセンサが置かれているように振る舞う。つまり、センサデータの取得要求に対して、仮想センサは要求する位置にそのセンサが存在しているように応答する。さらに、仮想センサは、対象とする状況、位置、値、有効半径を属性として持つ。有効半径は仮想センサの位置を中心とした円形の領域を表し、この領域内において、仮想センサの値の信頼度が高いという意味を持つ。本研究ではこの領域を仮想センサの有効範囲と呼び、同じ対象とする状態を指定したクエリにおいて、クエリの指定した位置がこの範囲に含まれれば、その仮想センサが応答するものとする。このとき、補間をとまなわないセンサデータに基づく LL における状況判断結果は、正確に有効範囲を設定できる。一方、AL における仮想センサの値は補間によって推定されるため、必ずしも正確ではなく誤差が生じる。しかし、状況判断を左右する範囲を誤差が超えなければ、ユーザに応答する LL の状況判断結果は正確となるため、結果の正確性に与える影響は小さいと考えられる。また、仮想センサは「対象とする状況 (位置 (x, y) , r) = 値」の形式で表す。

仮想センサの値の更新については、関係するセンサや端末を定期的に監視し、キャッシュした結果に反映させることで行う。たとえば、AL の仮想センサは空間補間に用いた RL のセンサを定期的に監視し、自身の値に変更を反映させる。また、LL の仮想センサは状況判断に用いた AL の仮想センサを定期的に監視し、自身の値に変更を反映させる。このとき、LL の仮想センサの値は木構造のルールに従った二値で表されるため、“or” や “and” の条件に基づいて必要な範囲のみ変更することで、不要な更新処理を削減

する。

3.3.2 仮想センサの破棄

仮想センサが無限に増加するとオーバーレイネットワーク上のピア数が増大し、ネットワーク全体のトラフィックも増大するという問題が発生する。そのため、あまり使用されない仮想センサや同じ情報を持つ仮想センサなどの不要な仮想センサを破棄する必要がある。この仮想センサの破棄を実現するため、本研究では各仮想センサに TTL (Time To Live : 生存時間) を指定する。生存時間とは仮想センサが生成したときから破棄するまでの時間を指す。つまり、この TTL を指定することによって、仮想センサの生存時間を制限する。具体的には、仮想センサが生成されたときに、時間測定のコマンドを 0 に初期化しておき、時間を計測し始める。そして、このタイマーが TTL に達した時点で仮想センサを破棄する。この処理により、あまりアクセスされない仮想センサ、つまり発信する情報が探索される可能性が低い仮想センサを破棄することができる。仮想センサの TTL の操作については、次の手順で行う。

- (1) アクセス頻度が大きいほど TTL を大きく設定する。この手法では一定間隔におけるアクセス数に基づいて、TTL を再指定する。つまり、平均アクセス頻度が大きいほど、仮想センサの存在時間が長くなる。たとえば、1 時間の平均アクセス数 n を計測しておき、TTL になった時点で以下のように TTL を再設定する。
 - $10 \leq n$: TTL = 1 時間
 - $5 \leq n < 10$: TTL = 30 分
 - $n < 5$: 消滅
- (2) 仮想センサにクエリが届いた際、TTL を一定時間に再設定する。つまり、そのアクセスされた時刻から一定時間アクセスされなければ仮想センサを破棄する。

4. 提案システムの実装と評価

4.1 状況判断システムの実装

演繹処理による状況判断システム構築のため、セマンティックセンサシステムの実装を P2P エージェントプラットフォームである PIAX (Peer-to-peer Interactive Agent eXtentions) [14] 上で行った。また、構築したシステムでは、センサの情報を用いて演繹処理を行うためのモジュールとして、Java によるセマンティックウェブアプリケーション開発が可能な JenaAPI^{*1}を採用した。構築したシステムを図 4 に示す。

図 4 の下の 3 階層は PIAX の構成を示している。ここで、Agent 管理 Layer の上層は Agent 層であり、この層では Logical Virtual Sensor Agent (LVS Agent), Abstract Virtual Sensor Agent (AVS Agent), Raw Sensor Agent (RS Agent) と Inference Agent があり、それぞれ Logical

*1 <http://jena.sourceforge.net/>

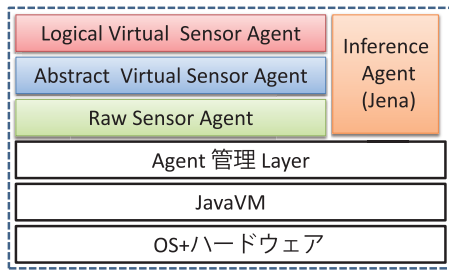


図 4 実装システムの構成

Fig. 4 Structure of the implemented system.

```

Logical Layer Rule
[Point:(?M xAxis ?x)(?M yAxis ?y) ->
[rule0: (?M Status SuitablePlace) <-
  (?M GoodWeather True),(?M NotCrowded True)]
[rule1: (?M GoodWeather True) <- (?M tenki NotRain)]
[rule3: (?M GoodWeather True) <-
  (?M tenki NotHumid),(?M tenki Cool)]
[rule4: (?M tenki NotHumid) <-
  checkStatus(?x,?y,NotHumid)]
[rule5: (?M tenki NotRain) <-
  checkStatus(?x,?y,NotRain)]
[rule6: (?M tenki Cool) <- checkStatus(?x,?y,Cool)]
[rule7: (?M NotCrowded True) <-
  checkStatus(?x,?y,NotCrowded)]
]

Abstract Layer Rule
[Point:(?M xAxis ?x),(?M yAxis ?y) ->
[rule0: (?M status Cool) <-
  getSensorData(temperatureSensor,?x,?y,?data),
  smaller(?data,20)],greater(?data,15)]
[rule1: (?M status NotRain) <-
  getSensorData(rainSensor,?x,?y,?data),
  smaller(?data,0)]
[rule2: (?M status NotHumid) <-
  getSensorData(humidSensor,?x,?y,?data),
  smaller(?data,50)]
[rule3: (?M status NotCrowded) <-
  getSensorData(personCountSensor,?x,?y,?data),
  smaller(?data,50)]
]
    
```

図 5 Jena で使用するルール例

Fig. 5 Rules example for Jena.

Virtual Sensor, Abstract Virtual Sensor, Raw Sensor に相当する。また、これらのエージェントは当該情報を保持していれば問合せに対して応答する。さらに、Inference Agent はユーザのクエリに対して演繹処理などを行うことで応答するエージェントで、LL と AL における演繹処理を行う。このとき、AL においてセンサデータを補間する計算モデルについては、指定地点を含む三角形の頂点となる 3 つの近隣センサデータを取得し、各頂点からの距離による加重平均で推定値を計算した。また、Jena で使用する任意の地点 $M(x, y)$ に関するルールの例を図 5 に示す。

表 1 シミュレーション環境
Table 1 Simulation environment.

項目	値
全体領域	5 km × 10 km
実センサ数	1,000
実センサの配置	無作為に決定
AL でのセンサ探索範囲	500 m
累計クエリ数	2,000
仮想センサの有効範囲	0 m, 100 m, 200 m, 500 m
計測値	メッセージ数, 正答率

4.2 シミュレーションによる評価

本研究では、実装した状況判断システムを用いて提案手法の有効性を評価するシミュレーションを行った。本シミュレーションでは、多くの異種センサが配置されている環境において、仮想センサを設置する場合と設置しない場合についての比較評価した。本シミュレーションの設定項目を表 1 に示す。

シミュレーション環境としては 5 km × 10 km の地理的な範囲を全体領域とし、1,000 個のセンサ端末をそれぞれ無作為に決定された位置に配置した。このとき、センサ端末の x 座標、 y 座標はそれぞれ一様分布に従い、5 km × 10 km の範囲に 1,000 個のセンサがほぼ均等に配置されることになる。また、AL がセンサ端末を探索する範囲については半径 500 m に固定してシミュレーションを行った。さらに、初期状態で仮想センサが存在せず、ユーザから送信されるクエリの応答処理を行った後、その結果に基づいて仮想センサを生成する。つまり、ユーザからのクエリに対する処理回数が増加するのにもない、新たに設置される仮想センサの数も増加する。本シミュレーションではこのユーザのクエリとして 2,000 個のメッセージを順次に与え、仮想センサの有効範囲が異なる環境において、処理する際にネットワーク内に発生するメッセージ数をそれぞれ計測する。ユーザのクエリは図 2、図 3 に示した「SuitablePlace(x, y)」であり、位置はセンサ端末と同様に無作為に決定した。また、本評価における発生メッセージとは、ユーザからのクエリに回答するために仮想センサまたは対象センサから送信される。ここで、ユーザが要求する位置で複数の仮想センサの有効範囲が重なる場合、複数の仮想センサから応答メッセージが送信される。本シミュレーションでは、1 クエリに対して複数の仮想センサから応答を得た場合、各仮想センサの応答を 1 メッセージとして計測する。また、クエリに回答する仮想センサが存在しない場合、クエリに回答するために複数の Raw Sensor から情報の取得を行う。この場合は各 Raw Sensor からの応答は 1 メッセージとして計測することとする。

図 6 は仮想センサの有効範囲の変化によるトラヒックの変化を示す。本シミュレーションでは有効範囲が 0 m, 100 m, 200 m, 500 m の場合において計測を行った。こ

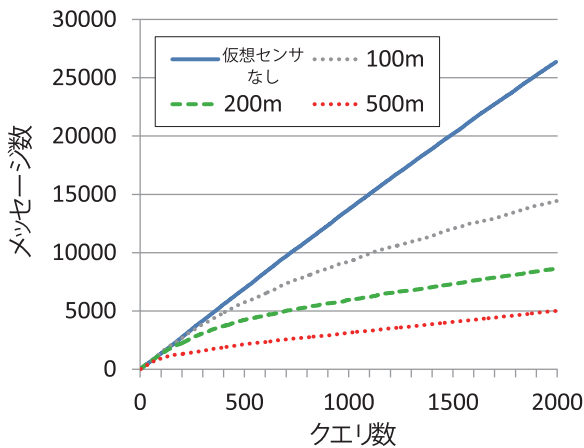


図 6 各有効範囲におけるメッセージ数の変化

Fig. 6 Number of messages while the number of queries is changed.

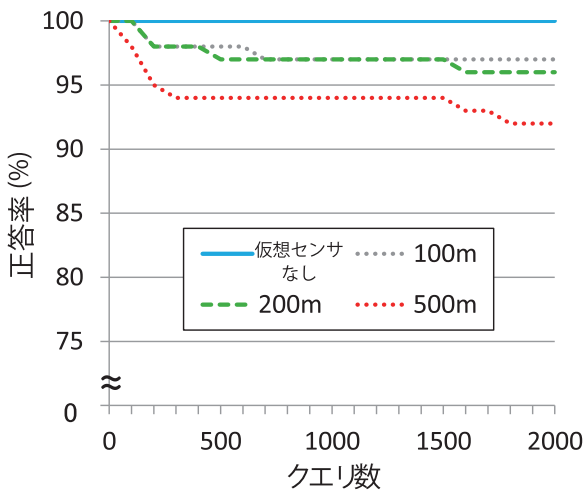


図 7 各有効範囲における正答率の変化

Fig. 7 Rate of correct answers while the number of queries is changed.

での有効範囲が 0m とは、仮想センサを利用しない環境に相当する。また、グラフの横軸はクエリ数で、縦軸は発生したメッセージの累計である。シミュレーションで得られた結果のグラフにより、仮想センサの有効半径が大きくなるほど、仮想センサを設置しない環境よりも多くのメッセージを削減でき、有効範囲が 500m の場合は仮想センサを設置しない場合と比較して 20%以下になっている。また、図 7 は前述と同様の有効範囲の変化による正答率の変化を示す。ここで、横軸はユーザからのクエリ数で、縦軸は正答率を表す。図 7 より、仮想センサの有効半径が一定の状況ならば、ユーザからのクエリが増加するのにもない、仮想センサからの結果の正答率が減少することが分かる。これは、クエリが増加するほど仮想センサの生成数も増加し、仮想センサがクエリに応答する確率が高くなるためである。そのため、要求元が正答を得る確率が低下することになる。また、仮想センサの有効半径が大きくなるほど正答率が大きく減少する。ただし、有効半径が 500m の

場合でも 90%以上の正答率を維持している。

本シミュレーション結果により、上記条件のもとでは仮想センサを生成することで、高い正答率を維持しつつトラヒックの発生を大きく抑制できることを確認した。したがって、提案する分散センサ情報管理システムおよび仮想センサを用いたセンサデータのキャッシュ手法により、センサ情報を活用したコンテキストウェアサービスを効率化できると考えられる。

5. まとめ

本研究では、分散環境においてコンテキストウェアを実現するための分散センサ情報管理システムを提案した。提案システムでは、事前に設置状況を把握できないために必要なセンサ情報を取得できないという問題に対して、周辺に存在する異種のセンサ情報から必要な情報を導出する手法を提案した。この情報の導出は、Raw Layer (RL), Abstract Layer (AL), Logical Layer (LL) の 3 層でセンサを階層的に管理し、センサデータを意味的に解釈することで行われる。また、同様の要求に対する冗長な処理の問題に対しては、要求に対する処理結果を共有するための仮想センサを設置し、過去の結果を再利用することで処理の実行を抑制する手法を提案する。本研究では提案するセマンティックセンサシステムを実装し、仮想センサによって負荷を削減する手法の有効性をシミュレーションにより評価した。本シミュレーション結果により、高い正答率を維持しつつトラヒックの発生を大きく抑制できることを確認した。したがって、提案するセマンティックセンサシステムおよび仮想センサ設置手法により、センシングデータを活用した状況依存型サービスを効率化できると考えられる。

今後の課題としては、本稿の評価で用いたパラメータはセンサの密度が比較的に高い環境を想定している。そのため、実際の環境を含め、異なる環境での評価や要求される精度を実現する方式の検討が考えられる。また、本稿ではルールの具体的な管理方法については扱っていない。P2P モデルにおいては、さまざまなユーザが存在し、必要となるルールも異なる。本研究で提案している LL に組み込むルールに関して、名前空間も含め、ユーザや端末が持つ独自のルールをどのように LL で管理するかは今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、科研費 (22500057) の助成、および、NICT・大阪大学共同研究「大規模分散コンピューティングのための高機能ネットワークプラットフォーム技術の研究開発」による成果である。

参考文献

[1] Ni, L.M., Zhu, Y., Ma, J., Li, M., Luo, Q., Liu, Y., Cheung, S.C. and Yang, Q.: Semantic Sensor Net: An Extensible Framework, *Proc. 3rd International Confer-*

ence on Computer Networks and Mobile Computing (ICCNMC), pp.1144-1153 (2005).

- [2] 広田 裕, 川島英之, 佐竹 聡, 梅澤 猛, 今井倫太: セマンティック・センサネットワークの実現に向けた実世界指向メタデータ管理システム MeT の設計, 情報処理学会研究報告: 知能と複雑系, Vol.2005, No.109, pp.29-36 (2005).
- [3] Imai, M., Hirota, Y., Satake, S. and Kawashima, H.: Semantic Connection between Everyday Objects and a Sensor Network, *Proc. Semantic Sensor Networks (SSN) Workshop*, pp.1-13 (2006).
- [4] Guo, B., Satake, S. and Imai, M.: Sixth-Sense: Context Reasoning for Potential Objects Detection in Smart Sensor Rich Environment, *Proc. IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT)*, pp.191-194 (2006).
- [5] Chen, H., Finin, T. and Joshi, A.: An Ontology for Context-Aware Pervasive Computing Environments, *Knowledge Engineering Review*, Vol.18, No.3, pp.197-207 (2003).
- [6] Neto, R.F.B., Macedo, A.A. and Camacho-Guerrero, J.: Configurable Semantic Services Leveraging Applications Context-Aware, *Proc. 11th Brazilian Symposium on Multimedia and the Web (WebMedia)*, Vol.125, pp.1-9 (2005).
- [7] 金子 雄, 春本 要, 福村真哉, 下條真司, 西尾章治郎: ユビ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(TOD28), pp.1-15 (2005).
- [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.SIG4(TOD29), pp.51-64 (2006).
- [9] Matsuura, S., Fujikawa, K. and Sunahara, H.: Mill: A Geographical Location Oriented Overlay Network Managing Data of Ubiquitous Sensors, *IEICE Trans. Comm.*, Vol.E90-B, No.10, pp.2720-2728 (2007).
- [10] Hu, H. and Lee, D.L.: Range Nearest-Neighbor Query, *IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering*, Vol.18, No.1, pp.78-91 (2006).
- [11] Orenstein, J.A. and Merrett, T.H.: A Class of Data Structures for Associative Searching, *Proc. 3rd ACM SIGACT-SIGMOD Symposium on Principles of Database Systems (PODS)*, pp.181-190 (1984).
- [12] ニッテルシルビア, ジングァン, 白石 陽: センサネットワークにおけるネットワーク内空間推定, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J88-A, No.12, pp.1413-1421 (2005).
- [13] 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).
- [14] 吉田 幹, 奥田 剛, 寺西裕一, 春本 要, 下條真司: マルチオーバーレイと分散エージェントの機構を統合した P2P プラットフォーム PIAX, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.402-413 (2008).



川上 朋也 (正会員)

平成 17 年近畿大学理工学部経営工学科卒業。平成 19 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年同研究科マルチメディア工学専攻特任研究員となり, 平成 24 年より同大学サイバーメディアセンター特任研究員, 現在に至る。P2P ネットワークに関する研究に従事。



寺西 裕一 (正会員)

平成 5 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 7 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。平成 17 年大阪大学サイバーメディアセンター講師, 平成 19 年同大学院情報科学研究科准教授, 平成 20 年より情報通信研究機構専攻研究員, 招へい専門員を兼任, 平成 23 年より情報通信研究機構研究マネージャおよび大阪大学サイバーメディアセンター招へい准教授, 現在に至る。博士(工学)(平成 16 年 3 月, 大阪大学)。マルチメディア情報システム, ユビキタス応用システム等の研究開発に従事。本会論文賞を受賞。IEEE 会員。



春本 要 (正会員)

平成 4 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 6 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻助手。平成 11 年大阪大学大型計算機センター講師, 平成 12 年同大学サイバーメディアセンター講師を経て, 平成 16 年同大学院工学研究科助教授(平成 19 年より准教授)となり, 現在に至る。博士(工学)(平成 10 年 2 月, 大阪大学)。データベースシステム, マルチメディア情報システム等の研究に従事。本会論文賞を受賞。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



下條 真司 (正会員)

昭和 56 年大阪大学基礎工学部情報工
学科卒業。昭和 61 年同大学院基礎工
学研究科博士後期課程修了。同年大阪
大学基礎工学部情報工学科助手。平成
元年同大学大型計算機センター講師。
平成 3 年同助教授，平成 10 年同教授，

平成 12 年同大学サイバーメディアセンター副センター長，
平成 17 年同センター長，平成 19 年同副センター長，平成
20 年独立行政法人情報通信研究機構大手町ネットワーク研
究統括センターセンター長/上席研究員。平成 23 年大阪大
学サイバーメディアセンター教授，独立行政法人情報通信
研究機構テストベッド研究開発推進センターセンター長を
兼任，現在に至る。マルチメディア情報システムのアーキ
テクチャの研究に従事。平成 17 年第 23 回大阪科学賞を受
賞。工学博士。電子情報通信学会，IEEE 各会員。