

センサノード上で近接ノードのコンテキスト情報から推論を行う 分散推論システムの提案

神田 武[†] 柳沢 豊^{††} 今井 倫太[†] 川島 英之[†] 岡留 剛^{††}

[†] 慶應義塾大学大学院 理工学研究科 〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

^{††} NTT コミュニケーション科学基礎研究所 〒 619-0237 京都府相楽郡精華町光台 2-4

E-mail: †{takeshi,michita,kawasima}@ayu.ics.keio.ac.jp, ††yutaka@cslab.kecl.ntt.co.jp, †††houmi@idea.brl.ntt.co.jp

あらまし 近年、実世界に多数配置されたセンサノードで取得したデータから、コンテキストを推論する手法の研究が進んでいる。従来手法では、センサデータをサーバに全て集積した上で推論処理を行う。しかしこの方法では、ノード数が増加するとサーバに集中するデータ量が増大し、計算コストが飛躍的に増加する問題があった。そこで著者らは、サーバの計算処理コストを低減するために、各センサノードとその近接するノードから取得した局所的なデータのみを用い、ノード上で直接データ処理を行う、分散型のコンテキスト推論システムを作成した。このシステムは、1. センサノード上での推論エンジンの実行、2. 接触検知によるノードの位置関係の取得、3. 近接ノード間でのコンテキスト共有の機能を持つ。本稿では、このシステムの実現方法、構成、および動作例について述べる。

キーワード センサネットワーク、コンテキストウェア、センサノード上のデータ処理、推論エンジン

A Decentralized Inference System

which Operates on Sensor Nodes using Adjacent Node's Context Data

Takeshi KANDA[†], Yutaka YANAGISAWA^{††}, Michita IMAI[†], Hideyuki KAWASHIMA[†], and

Takeshi OKADOME^{††}

[†] Graduate School of Science and Technology, Keio University Hiyoshi 3-14-1, Kohoku-ku, Yokohama, 223-8522
Japan

^{††} NTT Communication Science Laboratories Hikaridai 2-4, Souraku-gun, Kyoto, 619-0237 Japan

E-mail: †{takeshi,michita,kawasima}@ayu.ics.keio.ac.jp, ††yutaka@cslab.kecl.ntt.co.jp, †††houmi@idea.brl.ntt.co.jp

Abstract Recently, several studies have been made on the technique for inference of contexts using sensor nodes attached to various objects in the real world. In existing work, a sensor data server accumulates all data received from sensor nodes to infer contexts. However, when the number of nodes increases, the volume of the data that concentrated on the server increases, and the calculation cost on the server explodes. In order to solve the problem, we proposed the Decentralized Inference System which executes context inference on each sensor node. Our proposed system has following three remarkable functions; 1)the inference engine on sensor nodes, 2)detection of adjacent nodes and 3)communication between adjacent nodes. This paper describes the actualization methods, the composition and the operation examples on the Decentralized Inference System.

Key words sensornetworks, context-aware, data processing on sensor nodes, inference engine

1. はじめに

本研究では、日常物にセンサノードを取り付け、センサノード上で物のコンテキストを取得して周囲環境を効率的に推論する、分散推論システムを提案する。

近年、環境内に配置されたセンサから人や物の状況（コンテキスト）を把握して状況に応じたサービスを提供する、コンテ

クスタウェアなシステムが多く提案されている。コンテキストとは環境内の物や人などの状況を表した情報である。コンテキストウェアなシステムがセンサを用いて物理的なコンテキストを取得する場合、センサデータの数値処理が不可欠となる。たとえば、コンテキストウェアなシステムは単なる数値列である位置センサの3次元座標情報を「ユーザがディスプレイの前にいる」、「机の上に本がある」等の記号的な表現として解釈

する必要がある。

日常環境のコンテキストとして、環境内にある物の位置関係や物の物理的状況が取得できれば有用である。物の位置関係とは、「本棚の中に本がある」、「皿のとなりにコップがある」といった情報である。物の物理的状況とは、物の向きや動き、物の周囲の温度、照度などであり、「コップが横向きに置いてある」、「ラップトップコンピュータが暗いところにある」といった情報である。物の位置関係や物理的状況が記号的に取得できれば、実世界環境の検索システムやモニタリングシステムにおけるユーザへの情報提示、ロボットや CG エージェントの環境認識、ホームオートメーションシステムにおけるルール記述など、実世界情報にアクセスする様々なアプリケーションに利用できる。

物の物理的なコンテキストを取得するために、物にセンシング機能を持ったデバイスを取り付ける研究が進んでいる。代表的なものに超音波 3 次元タグ [3] と Smart-Its [2] がある。超音波 3 次元タグは、超音波発信機を物に取り付けて、発信機からの超音波を天井や壁に設置した複数の受信機で受信することで物の 3 次元位置をセンチメートルのレベルで高精度に計測可能なシステムである。Smart-Its は、物に取り付け可能なセンサネットワークデバイスである。Smart-Its は、各種のセンシング機能、センサノード上でのデータ処理機能、RF 無線通信による近距離のノード間通信機能を持つ。

本研究の目的は、物にセンサノードを取り付け、センサノードから得られる物のコンテキストを用いて、効率的に環境情報を推論することである。しかしながら、従来のセンサネットワークを用いてコンテキスト取得や推論処理を行うと以下の問題が生じる。超音波 3 次元タグはセンサデータを全てサーバに集積し、サーバ上で一括して計算処理を行う必要がある。ところが、物の位置関係のコンテキストを取得するには複数の物の位置情報を比較処理しなければならない。そのため、センサノード数の増加に伴ってサーバでの計算量が爆発的に増加する問題がある。一方、Smart-Its は近距離のセンサノード間で通信して、ノード上で複数のノードのコンテキストを利用した計算処理が可能である。しかし、Smart-Its は位置情報を取得できない。したがって、重要なコンテキストである物の位置関係を取得できない。さらに、自ノード周辺の環境情報を推論するために他のどのノードとコンテキストデータを共有すべきか明確な基準を持たない。その結果、周辺環境の推論に不必要なデータを多く共有することになり、推論処理の効率が悪くなる。

以上の問題を解決するため、著者らは次の 3 つの特徴を持つセンサネットワークシステムを作成し、それを分散推論システムと名付けた。分散推論システムの 3 つの特徴は、1. センサノード上で動作する分散推論エンジン、2. 接触検知機能による物の位置関係の取得、3. 近接ノード間でのコンテキスト共有、である。

分散推論システムは、接触検知機能によって物の位置関係のコンテキストをセンサノード上で簡潔に取得できる。さらに、従来サーバ上で一括して行われていた、コンテキストを利用した推論処理を各々のセンサノードで分散的に実行できる。著者

らは、作成した分散推論システムによってセンサノードの増加に伴った計算処理量の爆発的増加や推論効率の低下を低減できると考えている。

本稿の構成は以下の通りである。2 章で背景と関連研究を述べる。3 章で本研究のアプローチを述べる。4 章で提案システムを説明する。5 章で提案システム効果と実行例を述べる。最後に 6 章でまとめと今後の研究予定を述べる。

2. 背景

2.1 コンテキストについて

Dey らはコンテキストについて従来研究を考察して分類した [1]。Dey らの定義するコンテキストは、実世界情報にアクセスするインタラクティブなシステムにおいて、“エンティティ (人・場所・物) の状況の特徴付けるあらゆる情報”である。Dey らは特に重要なコンテキストとして 1.location 2.identity 3.activity 4.time を挙げている。1.location はエンティティの位置、2.identity はエンティティの ID、3.activity はエンティティ自身やその周囲の状況の特徴付けるイベント、4.time は時間情報を示す。

本研究では、特に日常環境内の“物のコンテキスト”を、物にセンサを取り付けて取得することを研究対象とする。センサにより取得可能なコンテキストは、1.location、2.identity、3.activity であり、本研究ではこれらすべてを取得することひとつの目標とする。表 1 は、物に各種のセンサを取り付けて取得できるコンテキストの例である。

表 1 センサにより取得可能なコンテキスト例

| センサの種類 | 位置 センサ | 加速度 センサ | 照度 センサ | 温度 センサ |
|-----------------|-----------|---------------|-------------|-----------|
| 取得できる コンテキスト | 物の 位置 | 物の動作、 重力方向 | 物周囲の 明るさ | 物の 温度 |
| コンテキストの種類 | location | activity | activity | activity |

2.2 従来のセンサネットワークシステム

物に取り付け可能な小型センサネットワークの例として、超音波 3 次元タグ [3]、MICA MOTE [4]、Smart-Its [2] がある。

超音波 3 次元タグ [3] は物に超音波を送信するタグを取り付け、天井や壁に設置された複数の受信機で超音波を受信して、受信機のデータからタグの 3 次元位置を計算する。超音波 3 次元タグは物の 3 次元位置をセンチメートルのレベルで正確に計測可能である。したがって、超音波 3 次元タグを用いることで、物の ID と位置情報を取得できる。

MICA MOTE [4] は UC Berkeley で開発されたセンサネットワークである。MICA MOTE は、通信機能を持った超小型コンピュータ MICA 上にセンサを搭載し、MICA 同士でアドホックに無線通信し、マルチホップで基地局のサーバにデータを送信する。MICA MOTE は TinyOS という OS で制御され、NesC という言語でプログラム可能である。センサ基板は温度・光・音・2 軸加速度など多くの種類があり、用途によって選択できる。したがって MICA MOTE を用いることで、物の ID と温度・光・加速度などのデータを取得できる。

Smart-Its [2] は日常物に取り付けるために開発されたセンサネットワークである。Smart-Its は周囲環境のセンシング機能、計算機能、RF 通信による近距離通信機能を持つ。1つのノードで加速度・照度・音・湿度・圧力・温度・磁気センシング可能である。Smart-Its はセンサボードとデータ処理用のボードを持ち、各ボードごとにプロセッサを持つ。データ処理用ボードのプロセッサでセンサデータからのコンテキスト取得処理が可能である。Smart-Its は日常環境のコンテキスト取得を目的とするので、MICA MOTE のような広範囲なネットワーク機能をもたない。その代わりに近距離のノードとの peer-to-peer の通信機能を持ち、近隣のノード間でデータを共有できる。したがって Smart-Its はセンサノード上で自分自身と近隣の物の ID、温度、光、加速度などのデータを取得できる。

2.3 従来システムの問題

従来のセンサネットワークを用いてコンテキストを取得し、推論処理を行うと、1. 取得可能なコンテキストの種類、2. コンテキスト利用のためのデータ処理方式、の2点で問題が生じる。

1. 取得可能なコンテキストに関しては、現状では単一のノードで位置データと物理的状況を取得可能なセンサネットワークが存在しないことが問題である。超音波3次元タグは、タグの位置情報から物の 1.location と 2.identity のコンテキストを取得できる。しかし、超音波3次元タグでは 3.activity のコンテキストを取得できない。MICA MOTE は、各種センシング機能により、物の 2.identity と 3.activity のコンテキストを取得できる。しかし、MICA MOTE では 1.location のコンテキストを取得できない。Smart-Its はセンシング機能とノード間通信機能により、自身と周囲ノードに取り付けられた物の 2.identity と温度、照度といった 3.activity のコンテキストをセンサノード上で取得できる。しかし、Smart-Its では物の 1.location のコンテキストを取得できない。

Smart-Its、MICA MOTE、超音波3次元タグが取得可能なコンテキストを表2にまとめる。表2より、従来のセンサノードには物の 1.location、2.identity、3.activity を全て取得可能なものがないことが分かる。それゆえ、3種類のコンテキストを全て取得できるセンサネットワークが必要である。

表2 従来のセンサノードで取得可能なコンテキスト

| | 物の identity | 物の location | 物の activity |
|-----------|----------------|----------------|----------------|
| 超音波3次元タグ | | | x |
| MICA MOTE | | x | |
| Smart-Its | | x | |

2. データ処理方法に関しては、現在のセンサネットワークのデータ処理手法では、センサノード数の増加に伴ってサーバでの計算量が爆発的に増加したり、推論処理効率が低下する問題が生じる。超音波3次元タグはノード上での位置データ取得はできず、サーバでデータ取得とデータ処理を全て行わなければならない。MICA MOTE はノード上でセンサデータを取得できる。しかし、MICA MOTE のノードは電力消費低減のためにプロセッサが 10MHz 程度、プログラムメモリが 100KB 程

度と計算資源が小さい。そのため、ノードでの計算処理が難しく、サーバにデータを集積して計算処理する必要がある。一方、Smart-Its は、RF 無線通信を用いたノード間の近距離通信によってノード上で複数のノードのセンサデータを取得可能である。さらに、Smart-Its は比較的計算資源が大きく、ノードでのデータ処理が可能である。

以上より、それぞれのセンサネットワークが可能なデータ処理手法を表3にまとめる。

表3 従来のセンサノードのデータ処理方法

| | 超音波3次元タグ | MICA MOTE | Smart-Its |
|---------|----------|-----------|-----------|
| データ処理方法 | サーバ上 | サーバ上 | センサノード上 |

表3より、超音波3次元タグと MICA MOTE はデータを全てサーバに集積して計算処理をする必要があるとわかる。そのため、センサデータから環境情報を推論処理する場合、センサノード数の増加に伴ってサーバでの計算量が爆発的に増加する問題が生じる。

一方、Smart-Its はセンサノード上で、周囲ノードのデータを用いた計算処理が可能である。しかし、Smart-Its のノード間の通信方法は、RF 無線通信が届く範囲のセンサノードにデータをブロードキャストしているだけであり、周囲環境の推論の際に他のどのノードとコンテキストを共有すべきか基準を持たない。Smart-Its の通信範囲は 20m ほどであり、日常環境において周囲のノードを選定する基準としては広すぎる。そのため、周囲環境の推論に不必要なデータを通信することになり、各ノードのデータ数が増加し、重複した推論処理が増加する。したがって、Smart-Its のデータ処理手法では推論処理の効率が悪い。

以上より、従来のセンサネットワークでは物の ID、位置情報、物理的状況に関するコンテキストを取得できず、効率的な推論処理を可能にするデータ処理方法を持たない。したがって、様々なコンテキストを効率的に推論するために、センサデバイスとデータ処理手法を改善したセンサネットワークシステムの開発が要求される

3. アプローチ

本研究の目的は、センサノード数が増加した場合にも、効率的に物のコンテキスト取得や推論処理を行うことができるシステムを実現することである。

そのために、著者らは計算処理能力の高いセンサノードを利用して 1. 推論処理のセンサノード上への分散化、2. 接触検知による物の位置関係取得、3. 近接ノード間でのコンテキスト共有、を行うアプローチをとった。以下、それぞれのアプローチを説明する。

3.1 推論処理の分散化

本節ではコンテキストの取得や推論処理を各々のセンサノードに分散化するアプローチについて述べる。

従来のコンテキストアウェアなシステムの多くは、図1のようにコンテキスト取得やコンテキストからの推論処理をサーバ上で行っている [5][6][7][8]。サーバで一括してコンテ

ト取得や推論処理を行う場合、センサノード数が増えたときにサーバでの計算量が飛躍的に増大する。たとえば、2つのノードのデータから比較処理を行ってコンテキストを取得する場合、ノード数の2乗のオーダーで計算量が増加する。物の位置関係など、2項間の関係を求める場合も同様の計算量の問題が生じる。従来のシステムの多くは数十個程度のセンサノード数しか想定しておらず、現在のところコンテキスト取得や推論処理の負担は大きな問題になっていない。しかし、将来、環境内のセンサ数が数百個以上になった場合に、サーバで全処理を行う手法では計算量の増加が運用時の大きな障害になることが予想される。

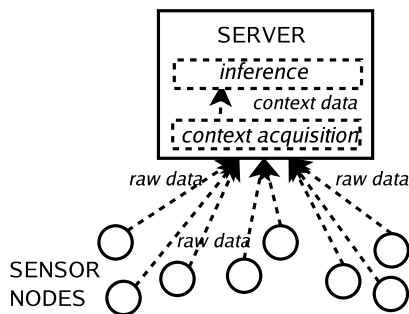


図1 サーバ上の推論処理

ところで、日常環境において特定の物の周囲環境を推論したいときには空間的に近い物のコンテキストを用いるだけで推論が可能なが多く、サーバで全ノードのデータを収集して推論処理する必要はない。

そこで著者らは、コンテキスト取得と推論処理を、センサノード上で分散実行するアプローチをとった(図2)。さらに、各センサノードは、自ノードと近隣ノードの局所的なコンテキストだけを用いて推論を行うこととした。推論処理を各ノード上に分散させるため、センサノード数増加に伴う計算処理量の爆発的増加を低減できる。さらに、空間的に近いノードのコンテキストのみを用いて推論するため、推論が効率化できる。

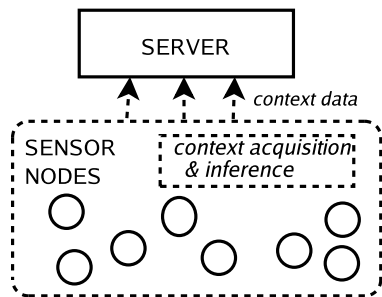


図2 センサノード上の推論処理

3.2 接触検知による物の位置関係の取得

本節では、接触検知によって物の位置関係のコンテキストを取得するアプローチについて述べる。

空間的關係を論理的に推論する代表的な手法として、Region Connection Calculus(RCC)[11]がある。RCCは、多次元空間内で領域同士の接触関係をもとに2つの領域間の多様な空間的関

係を記号的に表現し、領域の空間的關係を論理的に推論する。RCCが示すように、接触情報は領域間の空間關係の表現や空間的推論の基礎となるデータである。

そこで、本研究では日常物を3次元空間内の領域にとらえ、物の接触関係から物の位置関係を取得することとした。著者らはセンサノード上で物の位置関係のコンテキストを取得するために、センサノードに接触検知機能を持たせた。

接触検知により得られる物の位置関係のコンテキストとして、1.物の支持・被支持関係(*on*), 2.物の包含関係(*in*), 3.物の近接関係(*neighbor*), を定義した。これらを、物同士の位置關係を表現し、推論に利用する際の基礎的なコンテキストとした。支持・被支持関係(=重量を支えている/支えられている関係)(*on*)は、2つの物の上下面間の接触により取得される(図3)。包含関係(*in*)は、ある物の外面と、別の物の内面間の接触により取得される(図4)。近接関係(*neighbor*)は、2つの物のその他の任意の接触関係により取得される(図5)。

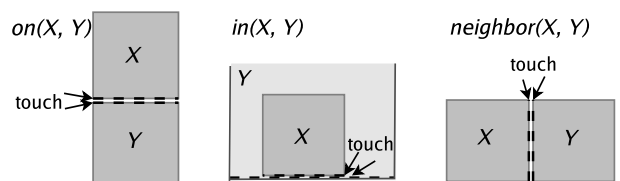


図3 支持・被支持関係
(*on*)

図4 包含関係
(*in*)

図5 近接関係
(*neighbor*)

3.3 近接ノード間のコンテキスト共有

本節では、各ノードが接触関係のある近接ノードとだけコンテキストを共有して、推論に利用するアプローチについて述べる。

あるノードが自ノードの周囲環境を推論する場合、周囲のノードを選定してコンテキストを交換する必要がある。実際、Smart-Itsでは近距離のRF無線通信機能によって空間的に近いノードのデータを利用可能である。しかし、Smart-Itsは各々のセンサノードがRF無線通信の届く範囲のノードにコンテキストをブロードキャストしているだけである。そのため、各ノードが周囲環境を推論する際に、どのノードのデータを利用すべきか明確な基準を持たない。Smart-ItsのRF無線通信の範囲は20mほどであり、周囲のノードを選定する基準としては粒度が粗い。その結果、必要以上のセンサノードとコンテキスト共有を行うことになりノード上のデータ数が多くなる。また、複数のノードで重複した推論処理を行うことになり、計算の無駄が多い。したがって、Smart-Itsの手法では推論を分散処理する利点が少ない。

そこで、著者らは接触関係のある近接ノード間だけで通信してコンテキストを共有することを定めた(図6)。近接するノードとだけコンテキストを共有することで、周囲の最小限のノードのコンテキストを利用して効率的に周囲環境を推論できる。

本研究では、以上の3つのアプローチのもとに分散推論システムを作成した。

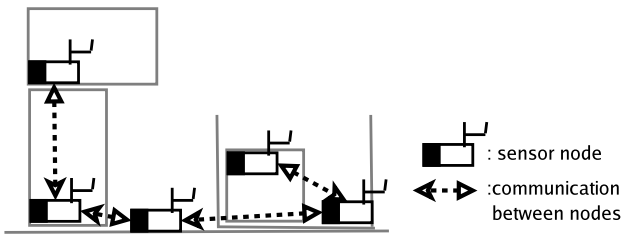


図6 近接ノード間のコンテキスト共有

4. 分散推論システムの提案

本研究では各センサノードが分散的に周囲環境の推論処理を行う，分散推論システムを提案する．提案する分散推論システムは，センサノード上で物の位置関係や物理的状況のコンテキストを取得可能である．分散推論システムはさらに，取得したコンテキストを利用して，センサノード上で効率的に周囲環境の推論を行える．

分散推論システムは，センサノードのハードウェア構成，推論エンジンのソフトウェア構成，センサノード間の通信方式の点で独自性がある．

以下，作成したセンサノードのハードウェア構成，推論エンジンのソフトウェアの構成，推論ルールの記述方法，および近接ノード間の通信方法を説明する．

4.1 センサノード

本研究で作成したセンサノードのハードウェア構成を図7に示す．センサノードは，小型のマザーボードにセンサ基板とネットワークカードを接続して作成した．センサノードは，以上の基板によりセンシング機能，計算処理機能，通信機能を持つ．

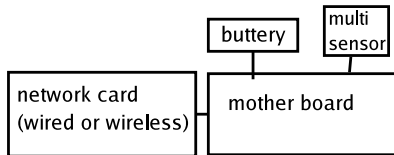


図7 センサノードのハードウェア構成

図8はセンサノードの実際の外観である．奥の基板からネットワークカード，マザーボード，センサ基板が接続されている．

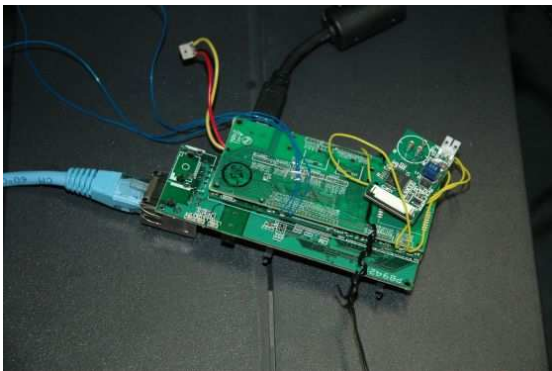


図8 センサノードの外観

マザーボードとして，小型 Linux ボード gumstix [9] を用い

た．gumstix は1枚のチューイングガムサイズの超小型ボードであり，プロセッサとして Intel XScale@PXA255 200Mhz，記憶領域として4MBフラッシュメモリと32KBのキャッシュを持つものを利用した．さらに拡張ボードとして同サイズの有線または無線のネットワークカードを重ねてTCP/IPによる通信機能を持たせた．

1つのセンサノードでさまざまなコンテキストを取得するために，Okadome [12] らの作成した多機能センサを使用した．センサは，1cm*1cm*2cmの基板に3軸加速度センサ，照度センサ，赤外線センサ，温度センサを搭載したものである．3軸加速度センサと温度センサには日立金属のh48c [10] を利用した．この多機能センサとgumstixをRS232Cで接続し，ひとつのノードで多種のセンサデータを一括して取得可能とした(図9)．

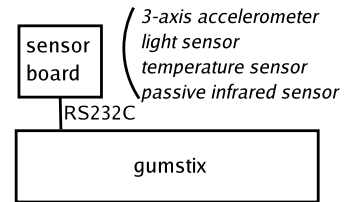


図9 多機能センサの接続

さらに，他センサノードとの接触検知機能を持たせるため，RS232Cから電極を出した．電極から互いのセンサノードのIDを送受することで，ノード間の接触を検知可能とした．今回の実装では暫定的に電極を用いて接触検知を行ったが，将来は電磁誘導による超近距離通信を利用して，ノード間での接触検知と，接触面での通信機能を持たせる予定である．

作成したセンサノードは，物とセンサノードの取り付け関係から物のIDのコンテキストを，接触関係から物の位置関係のコンテキストを，センサデータから物の物理的状況のコンテキストを取得する．各種のセンサデータは，表4のように，データの意味を表すコンテキストに変換される．たとえば，3軸加速度センサからは動作の有無のコンテキスト (*move, stay*) と重力方向のコンテキスト (*normal, upset, lie, lean*) が，照度センサからは明るさのコンテキスト (*bright, dim, dark*) が，温度センサからは温度のコンテキスト (*hot, warm, cool, cold*) が取得される．

表4 使用センサから取得可能なコンテキスト

| センサの種類 | 取得可能なコンテキスト |
|----------|---|
| 接触検知 | <i>on, in, neighbor</i> |
| 3軸加速度センサ | <i>normal, upset, lie, lean, stay, move</i> |
| 照度センサ | <i>bright, dim, dark</i> |
| 温度センサ | <i>hot, warm, cool, cold</i> |
| 赤外線センサ | <i>somebody, nobody</i> |

4.2 分散推論エンジンの構成

本研究で用いた分散推論エンジンは，以前著者が作成したセンサネットワーク用の論理的な前向き推論エンジン [13] に通信機能を追加して拡張したものである．分散推論エンジンはセンサノードで取得された基本的なコンテキストをもとに前向き推論を行って新たなコンテキストを生成するソフトウェアであ

る。加えて、分散推論エンジンは通信機能を持ち、複数のセンサノードのコンテキストを推論に利用できる。

分散推論エンジンの構成を図 10 に示す。分散推論エンジンは 1. コンテキスト入力部, 2. 作業領域, 3. ルールファイル, 4. 推論実行部, 5. コンテキスト出力部, 6. ネットワーク入力部, 7. ネットワーク出力部から成る。

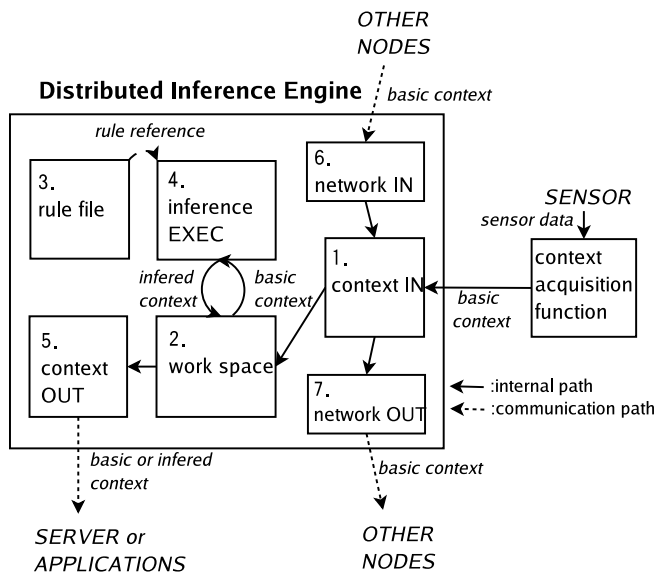


図 10 分散推論エンジンの構成

分散推論エンジンへの入力データは、4.1 節で説明した、センサノードで取得される基本的なコンテキストデータである。まず、コンテキストデータは 1. コンテキスト入力部に入力される。次に、コンテキストデータは 2. 作業領域に送られる。2. 作業領域のコンテキストデータは一定周期ごとに 4. 推論実行部に読み込まれ、3. ルールファイルに記述された推論ルールと照合して推論処理される。以上の推論処理によって取得されたコンテキストデータは、5. コンテキスト出力部を通じてサーバやアプリケーションに送信される。

また、分散推論エンジンは他ノードと通信してコンテキストデータを共有し、推論に利用することが可能である。通信機能を用いる場合は 6. ネットワーク入力部で他ノードからのコンテキストデータを受信し、7. ネットワーク出力部で他センサノードに自ノードで取得したコンテキストデータを送信する。

以上の手順で、分散推論エンジンは複数のセンサノードで取得された基本的なコンテキストから、推論ルールを参照して前向き推論を行う。推論結果としてより高度なコンテキストを取得する。

ここで、各ノードは個別にルールファイルを持つ。そのため、ルールを編集することで、ノードごとのルールを設定できる。たとえば、取り付けられた物の種類に応じて必要なルールのみを設定できる。したがって、ノードに必要なルールのみを設定することで、推論時に参照するルールを少なくできる利点がある。

また、今回の実装ではノード間で共有するコンテキストはセンサデータや取り付け関係から得られた基本的なコンテキスト

だけとし、推論結果のコンテキストはセンサノード間で共有しないこととした。

4.3 近接ノード間通信

本研究では接触関係のある近接ノードとのみコンテキストデータを共有することで、センサノード上で自ノード周辺のコンテキストを利用した局所的な推論を行った。

以下、近接センサノード間の通信手順を説明する。各センサノードは、ノード同士が接触したときに接触面から互いの ID を送受して近接ノードの ID を取得する。センサノード間の接触が検知されれば、それぞれのノード間で TCP/IP 通信によってコンテキスト共有を開始する。ノード間の接触関係が検知されなくなったとき、同時にノード間の TCP/IP 通信を切断してコンテキストの共有を終了する。

以上で述べた、センサノードの構成、推論エンジンの構成、通信手順によって、近接ノードのコンテキストから推論を行う分散推論システムを実現した(図 11)。

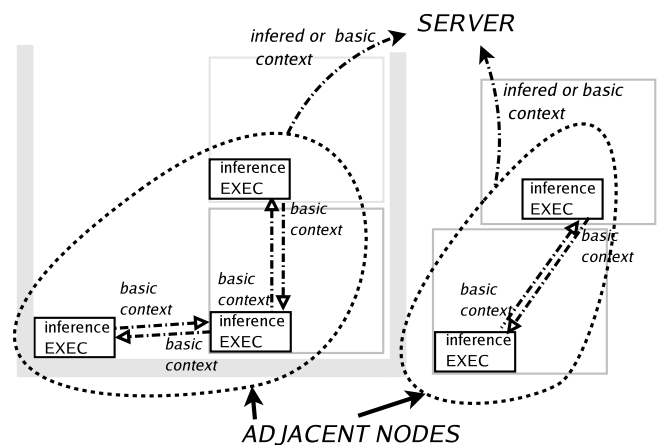


図 11 近接ノードのコンテキストから推論を行う分散推論システム

4.4 推論エンジンを用いた環境情報の推論

本研究では、推論エンジンにコンテキストを入力して一階述語論理形式の前向き推論を行った。推論には、センサデータから取得された物の物理的状況と、接触検知から取得された物の位置関係と、センサノードと物の取り付け関係のコンテキストを利用した。以下、一階述語論理を用いたコンテキストと推論ルールの記述方法について述べる。

4.4.1 一階述語論理によるコンテキストの記述

ひとつのコンテキストは、一階述語論理の述語形式で表現される。

まず、センサデータはセンサの種類ごとに、その意味を表す一階述語論理形式のコンテキストに変換される。センサデータから得られるコンテキストの述語名は、センサデータの意味を表す文字列である。たとえば、照度センサなら“bright”, “dim”, “dark”, 温度センサなら“hot”, “warm”, “cold”などの文字列が述語名となる。述語の引数は、そのコンテキストが言及するセンサノードの ID である。たとえば、センサノード#20 に“move”のコンテキストが成り立っているとき、“move(20)”と、引数としてセンサノード ID を指定する。

また、センサノード間の接触関係もコンテキストとして表現される。接触関係のコンテキストは 2 項の述語で表現される。たとえば、“センサノード#5 がセンサノード#7 に支持されていること”は、“*on(5,7)*”と表される。

さらに、センサノードと物の取り付け関係も述語として表現される。たとえば、“センサノード#15 のコップへの取り付け”は、“*attach(cup, 15)*”と表現される。

4.4.2 推論ルールの記述

作成した推論エンジンの推論ルール形式は、論理型プログラミング言語、prolog の記法に準じた。たとえば、“容器の中にブロックがあってブロック周辺が暗ければ、容器がブロックを隠している”というルールは

hide(X,Y):-attach(container,X)&attach(block,Y)&in(X,Y)&dark(Y).
と表される。各推論ルールの“:-”より前の部分が結論部，“:-”以降が条件部である。条件部に 1 個以上の述語を記述し、結論部に 1 個の述語を記述する。述語の引数は、大文字で始まる変数であり、推論時には定数としてセンサノードの ID が代入される。代入の結果、条件部に示された述語が全て成立すれば、結論部の述語が生成される。上記のルールでは、コンテキストとして“*attach(container,20)*”、“*attach(block,10)*”、“*in(20,10)*”、“*dark(10)*”という述語が成立すれば、結論部にセンサ ID を代入して“*hide(20,10)*”という述語が推論結果として生成される。

5. 効果と実行例

5.1 分散推論システムの効果

分散推論システムが推論エンジンを用いて論理的な推論を行うことにより、基本的なコンテキストからより高度なコンテキストを取得できる。まだ研究開始段階であり運用例を示すことはできないが、著者らは作成した分散推論システムによって以下の節で説明する推論が可能になると考えている。

5.1.1 相対的な空間関係の推論

接触検知によって取得された基本的な位置関係のコンテキストを用いて、2 つの物間の相対的な空間関係を推論可能である。

接触によって得られる物の基本的な位置関係のコンテキストは *on*, *in*, *neighbor* である。これらのコンテキストの組み合わせから、直接接触関係のない物間の空間関係を推論可能である。一例を挙げると、

in(X,Y):-in(X,Z) & in(Z,Y).

がある。これは、図 12 のように X,Y が *in* 関係、Y,Z が *in* 関係のとき、X は Z にもさらに包含関係 *in* が成立していることを推論する例である。

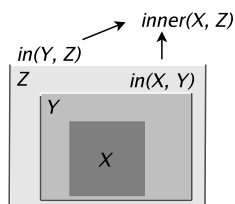


図 12 空間関係の推論例

表 5 に、基本的な位置関係のコンテキストの組合せから推論

可能なコンテキストをまとめた。接触関係にもとづいた基本的な位置関係のコンテキストの組合せから、直接接触関係のない物同士の空間関係を推論可能であることが分かる。

表 5 物の相対的關係の推論

| $X, Y \setminus Y, Z$ | <i>on</i> | <i>in</i> |
|-----------------------|--------------|-----------|
| <i>on</i> | <i>above</i> | <i>in</i> |
| <i>in</i> | <i>above</i> | <i>in</i> |

5.1.2 物の位置関係や物理的状況を用いた定性的推論

物の位置関係や物理的状況のコンテキストを用いて、我々の常識を反映した定性的な推論が可能である。

一例として、接触関係のある 2 つの物が“一緒に動いている”ことを、推論ルールを用いて定性的に推論する例を示す。推論には接触検知によって取得される *in*, *on* のコンテキストと、加速度センサから取得される、物の動作 *move* のコンテキストを用いる。推論ルールは以下の通りである。

moveTogether(X,Y):-in(X,Y) & move(Y).

moveTogether(X,Y):-on(X,Y) & move(Y).

このルールは、図 13 のように

“X が Y の内側 (*in*) にあって、Y が動作 (*move*) しているなら、X は Y と一緒に動いて (*moveTogether*) いる”

という我々の常識的な知識を反映したものである。上記のルールにより、2 つの物が一緒に動いている状況を、複雑な数値処理を必要とせず論理的推論によって簡潔に推論できる。

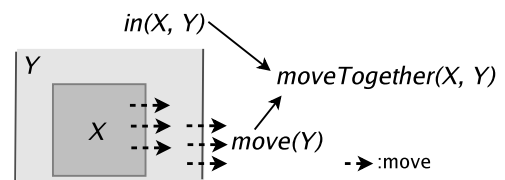


図 13 物理状況の定性的推論の例

上の例以外にも、物の位置関係と物の静止・動作のコンテキストから、“ある物が別の物の表面上を動いている状況”や“ある物が別の物を押し動いている状況”を推論ルールを用いて定性的に推論できる。

5.1.3 ユーザ指定の推論

ルールファイルを編集することで、アプリケーション開発者がアプリケーションに必要な推論ルールを設定できる。

ここでは、コンテキストを利用して危険検知を行うアプリケーション例を考える。想定する危険検知アプリケーションは、熱いものが可燃物に接したときや、割れ物が不安定な場所に置かれたときなどに、危険状況としてユーザに提示するアプリケーションとする。

たとえば、テーブルが傾いたときに、テーブルの上にあるものが落ちる危険がある、というルールは

danger(drop,X):-attach(table,Y) & on(X,Y) & lean(Y).

と、接触検知機能と加速度センサによって得られる基本的なコンテキストを用いて記述できる。また、熱いものに人が近付けば、怪我をさせる危険がある、というルールは

$danger(hurt, X) :- hot(X) \& somebody(X).$

と、温度センサと赤外線センサにより得られる基本的なコンテキストで記述できる。これらの推論ルールをルールファイルに書き込むことで、センサノードが個々に危険状態を推論して、即座に危険検知アプリケーションに知らせることができる。

以上のように、コンテキストを用いた推論ルールを設定することで、アプリケーションが必要とする特定の状況を取得することができる。これにより、分散推論システムはアプリケーションの環境認識モジュールとして利用できる。

5.2 実行例

現実のセンサを用いてデータ取得を行う際には、センサのデータ特性やエラー特性によって、想定外の不具合が生じる可能性がある。著者らは分散推論システムを実環境で動作させたときにエラーや遅延がなく、想定した通りの推論を正しく実行できるか、簡単な実行例を作成して確認した。

(1) ブロックが箱にしまわれたことの推論

ブロックが箱にしまわれたことを、ブロックと箱にセンサノードを取り付けて推論した(図14)。“ブロックが箱の中であってブロックの周囲が暗ければ、箱がブロックを隠している”ことを以下の推論ルールとして設定し、実際に推論できた。

$hide(X, Y) :-$

$attach(box, X) \& attach(block, Y) \& in(X, Y) \& dark(Y).$

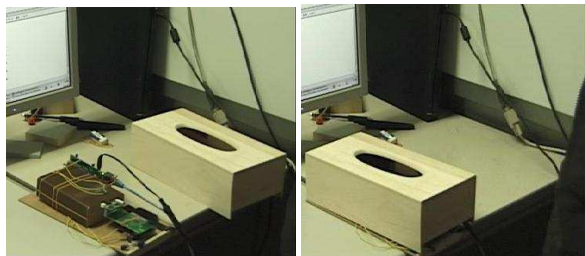


図14 ブロックが箱にしまわれたことの推論実行例

(2) ブロックの不安定な積み方の検出

上下に重ねられたブロックが傾いたとき(図15)に、支持されているブロックが不安定であることを以下の推論ルールとして設定し、実際に推論できた。

$unstable(X) :-$

$attach(block, X) \& attach(block, Y) \& on(X, Y) \& lean(Y).$

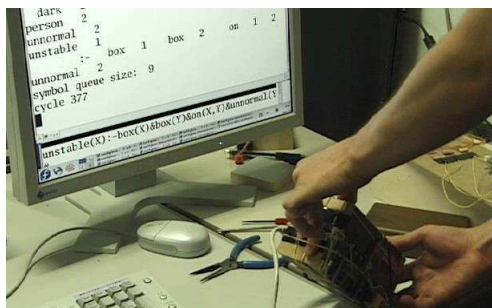


図15 ブロックの不安定な積み方の推論実行例

以上により、分散推論システムを実環境で動作させたときに想定通りの推論を正しく実行できることを確認した。

6. まとめ

本稿では、環境情報をコンテキストを用いて効率的に推論するために、センサノード上で動作する分散推論システムを提案した。分散推論システムは、1. センサノード上での推論エンジンの実行、2. 接触検知によるノードの位置関係の取得、3. 近接ノード間でのコンテキスト共有、の特徴を持つ。分散推論システムにより、1. 相対的な空間関係の推論、2. 物の位置関係や物理的状況を用いた定性的推論、3. ユーザ指定の推論、をセンサノード上で実行できることを示した。さらに、簡単な実行例を作成して、分散推論システムの動作を確認した。

今後、まず理論的課題として、分散推論システムの計算量や推論の完全性を検証する予定である。検証結果をもとに、推論形式やコンテキストの共有方法(推論結果のコンテキストをいくつ隣のノードまで共有するか等)を改良することを考えている。

また、実装の課題として、現在 NTT で作成中の TherBlock という電磁誘導により接触面での通信が可能なセンサノードに推論エンジンを搭載し、無線通信を用いずにノード間でコンテキストを通信可能にする予定である。

文献

- [1] A.K. Dey and G.D. Abowd, "Towards a better understanding of context and context-awareness," In *Proc. CHI 2000 Workshop on the What, Who, Where, When, and How of Context-Awareness*, 2000
- [2] M. Beigl and H. Gellersen. "Smart-Its: An Embedded Platform for Smart Objects," In *Proc. Smart Objects Conference (SOC 2003)*, Grenoble, France, May 2003
- [3] Y. Nishida, H. Aizawa, T. Hori, N. Hoffman, T. Kanade and M. Kakikura, "3D Ultrasonic Tagging System for Observing Human Activity," In *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2003)*, pp.785–791, October 2003
- [4] <http://www.xbow.jp/motemica.html>
- [5] K. Minami and D. Kotz, "Scalability in a Secure Distributed Proof System," In *Proc. 4th International Conference on Pervasive Computing (PERVASIVE2006)*, pp.220–237, May 2006
- [6] H. Chen, T. Finin and A. Joshi, "An Ontology for Context-Aware Pervasive Computing Environments," *Special Issue on Ontologies for Distributed Systems, Knowledge Engineering Review*, 18(3):pp.197–207, May 2004
- [7] E. Katsiri and A. Mycroft, "Knowledge representation and scalable abstract reasoning for sentient computing using first-order logic," In *Proc. Challenges and Novel Applications for Automatic Reasoning (CADE-19)*, pp.73–87, July 2003
- [8] A. Ranganathan and R. Campbell, "An infrastructure for context-awareness based on first order logic," *Personal Ubiquitous Computing*, 7(6):pp353–364, 2003
- [9] <http://www.gumstix.com/platforms.html>
- [10] http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod14/p14_03_a.html
- [11] A. Cohn, S. Hazarika, "Qualitative Spatial Representation and Reasoning: An Overview", *Fundamenta Informaticae*2(1), pp.1–29, 2001
- [12] T. Okadome, T. Hattori, K. Hiramatsu, Y. Yanagisawa, "A Real-World Event Search System in Sensor Network Environments," In *Proc. of the 7th Intl. Conf. on Mobile Data Management(MDM)*, CD-ROM, 2006
- [13] 神田 武, 佐竹 聡, 川島 英之, 中村 学, 今井 倫太, "セマンティック・センサネットワークにおける推論機構 JUSTO の研究," 人工知能学会第 20 回全国大会論文集, June 2006