

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

JUSTO: A Inference System on Semantic Sensor Network

神田 武*¹ 佐竹 聡*² 川島 英之*³ 中村 学*⁴ 今井 倫太*⁵
 Takeshi Kanda Satoru Satake Hideyuki Kawashima Manabu Nakamura Michita Imai

*¹*²*⁴ 慶應義塾大学大学院理工学研究科 *³*⁵ 慶應義塾大学理工学部
 Graduate School of Science and Technology, Keio University Faculty of Science and Technology, Keio University

We are proposing and designing the *Semantic Sensor Network (SS)*. *SS* is an interface between Ubiquitous applications and environment. *SS* generates logical representations of environment from sensor data acquired by small wireless sensors which are attached to many daily life objects and environments. As a result, *SS* provides Ubiquitous applications a logical model of environment. In this paper, we explain the *JUSTO*, the inference system which works on logical representations provided by *SS*. Since inferences from changed logical representations are erased immediately, *JUSTO* is able to correspond dynamic change on logical representations. We think that applying *JUSTO* to *SS* can make the inference suited to real world environment, which is dynamically changing environment. In addition, *JUSTO*'s inference algorithm can generate the expression based on stable logical representations.

1. はじめに

本稿では、セマンティック・センサネットワークにおいてセンサデータから得られる論理表現をもとに推論を行う機構 JUSTO について述べ、実世界上で JUSTO を用いて推論実行する際の振舞いを考察する。

セマンティック・センサネットワーク (以下、SS) とは、環境中に存在する物に小型無線センサを取り付け、環境内の物の情報やセンサデータの解釈から物と環境間や物同士の関係をシンボル表現として生成し、環境を論理表現として記述するミドルウェアである。SS はユビキタスアプリケーションや実世界環境にアクセスする知的システムと環境間のインタフェースとして働き、複数のアプリケーション間で共通して参照され、統一した環境表現のモデルとなることが期待される。さらに SS では、物とセンサの関係をもとに環境の状態をシンボル表現で記述するので従来 AI の分野で行われてきた推論等の記号処理技術が実世界上で使用可能となる。

センサデータから論理表現を生成し、実世界の環境を推論する研究として以下の従来研究がある。服部らは RFID を付与したモノに対して、モノ間の関係についてセンサ情報をもとに OWL を用いてシンボルで表現し、さらに推論を行うアルゴリズムをオントロジの観点から考察している [服部 04]。広田らのメタデータ管理機構 MeT は、センサデータに対してデータの意味を表すメタデータを付与して記憶管理し、メタデータの監視、問い合わせ、また、メタデータの成立条件による単純な推論機能を持たせた [広田 05]。これは SS に関する先行研究である。

SS による環境の論理表現に推論を適用する場合、センサデータの変化に対応して成立するシンボルが変化するため、シンボルの時間変化を考慮した推論が必要となる。しかしながら、服部らの研究は推論実行時に時間変化するセンサデータへの対処方法が考察されておらず、実際の推論実行時に問題が生じる。また、広田らの MeT においては、実装している推論はプログラムレベルでの作り込みでありルールの拡張性がない。そのうえ、推論の結果をもとに再度推論を行うという 2 段階以上の推論を行う機能を有していない。

また、SS の対象とする日常環境は動的であり、推論の際に実世界のどの関係に注目するかを決定するモデルが必要である。しかし、実世界を表す論理表現の複雑さ— m 項関係を表すシンボルの総数は物の数 N に対して $O(N^m)$ となる—と時間変化の速度— $10^{-1} \sim 1$ 秒の間隔で各シンボルが変化する—から、推論の注目点をその都度決定するモデルを作成することが困難である。

本研究で実装した推論機構 JUSTO は、テキスト形式で記述されたルールファイルを読み込み、推論ルールに基づいてシンボル表現の成立条件から新たなシンボル表現を生成する。また、JUSTO は SS の動的なシンボル表現の変化を反映した推論を以下の 2 つの機能により実現する。まず、推論機構内部でシンボル表現を周期的に更新する機能があり、推論実行中に変化したシンボル表現を周期ごとに内部で反映することができる。次に、推論時に成立するシンボル表現の間で、論理的依存関係があるシンボル表現同士を木構造で連結する機能を用いて、既に成立しなくなったシンボル表現に依存する表現を推論機構側で消去する。以上の機能により、センサデータから非同期かつ大量に生成されるシンボル表現に対して、時間変化を反映した正しい推論を行うことができる。以上より、JUSTO は SS における汎用的な前向き推論エンジンとして使用可能である。

時間変化する SS の論理表現において、個々のシンボル表現の成立時間はその表現が指し示す実世界の関係の継続時間を表すと考えられる。したがって、成立時間の長いシンボル表現は成立時間の短いシンボル表現よりも時間的に安定した関係を表すといえる。JUSTO の動的な推論を SS に適用することで、この安定した関係に関する推論がより深く進行する。シンボル表現の時間的な安定性を推論過程に反映することにより、JUSTO は複雑な実世界環境において推論の対象を明示的に決定する機構を持たずとも、実世界の安定した関係をもとにした状況表現を生成することができる。

本書の構成は以下の通りである。2 章で JUSTO の前提となる SS について、3 章で JUSTO の構成、4 章で JUSTO の評価について述べ、5 章で SS で JUSTO の推論実行したときの安定性をもとにした推論の進行について考察する。

A: 神田武, 慶應義塾大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻, takeshi@ayu.ics.keio.ac.jp

2. セマンティック・センサネットワーク

2.1 セマンティック・センサネットワークとは

セマンティック・センサネットワークとは、センサネットワーク環境において壁や床などの環境中や、コップや本等の日常の物に対してセンサを取り付け、センサデータのデータ値、複数のセンサ間のデータ比較、物の登録情報から、環境内での物の状態や個々の物の性質、物同士の関係をシンボル表現として生成するミドルウェアである。SS はコピキタスセンサネットワーク環境において複数のアプリケーションに共通して参照可能な環境の解釈モデルを提供する。SS の環境解釈モデルを用いることで、アプリケーション毎に環境解釈モジュールを実装する手間が省け、さらに複数のアプリケーション間での環境モデルの統一化が実現される。

2.2 センサデータからシンボルの生成

センサデータから実世界環境の論理表現を生成することは、SS の先行研究、MeT[広田 05] で行われている。MeT はセンサデータから論理表現を生成するために以下の 2 種類のデータベースを持つ。

- 環境に存在するセンサの ID と、センサと装着関係がある物の情報との対応を格納する DB(物情報 DB)。^{*1}
- 各種センサのデータ値やデータ比較により、物や環境間に成り立つ関係を解釈し、シンボル表現を生成する関数を定義する DB (解釈関数 DB)。

センサデータが到着すると MeT は上記の DB へ問い合わせを行う (図 1)。まず物情報 DB よりセンサと物との装着関係がシンボル表現として生成される。例えば、センサ 11 番がコップ A に装着されているなら *cupA(11)* というシンボルで表される。次に解釈関数 DB にアクセスし、データ値より 1 項以上のセンサ間の関係がセンサ ID を項にとる 1 項以上の述語として表現される。例えば、*ID: 12* と *ID: 13* の 2 つの位置センサの座標軸データより、解釈関数 DB の式にアクセスして条件を満たせば *near* や *on* などの表現が成立し、*on(13, 12), near(12, 13)* とシンボルで表される。

以上の方法で、SS ではセンサと物の装着関係のシンボル表現とセンサデータから生成される物や環境間の関係を表すシンボル表現により、実世界環境を一階述語論理形式の論理表現で表す。

2.3 環境の論理表現の例

SS の論理表現について、物や環境中に取り付けられた位置センサのデータから空間的关系をシンボルで表す例を挙げる。位置センサの三次元座標軸データから解釈関数を通して得られるシンボルとして、以下の種類が考えられる。シンボル内の変数 A, B には個々のセンサ ID が代入される。

1. センサを装着した物と環境間の位置関係
例: *onFloor(A), onDesk1(A)*
2. センサを装着した物間の位置関係
例: *on(A, B), near(A, B)*
3. センサを装着した物の移動パターン
例: *move(A), goUp(A), fall(A), shake(A), round(A)*

*1 SS は物の概念階層 (クラス) の情報を知識ベースとして持ち、実世界上の物に対応するクラス (コップクラス, 椅子クラス 等) のインスタンスとして扱う。物の情報には個体名 (*cup1, chair2* 等), クラスの情報 (分類, 用途 等), およびインスタンスに特有の情報 (大きさ, 素材, 色 等) がある。

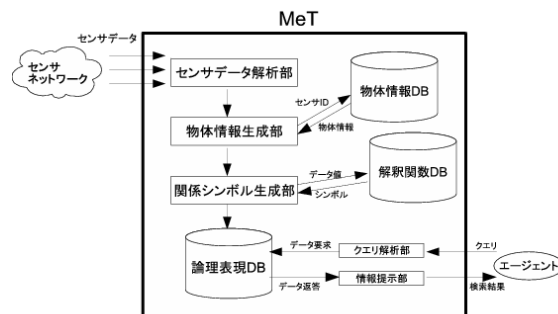


図 1: MeT によるセンサデータからシンボルの生成

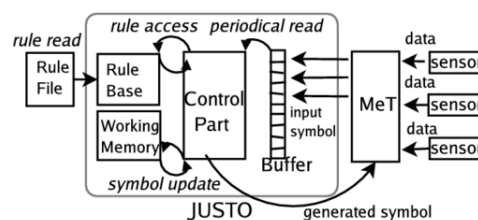


図 2: システム構成

4. センサを装着した物と環境間の移動関係
例: *moveOnFloor(A), moveAlongWall1(A)*
5. センサを装着した物間の移動関係
例: *moveToward(A, B), moveAround(A, B), moveOver(A, B)*

3. 推論機構 JUSTO の設計

3.1 JUSTO のシステム構成

JUSTO は、テキスト形式のルール記述ファイルを読み込んで推論ルールとし、MeT に代表される SS の管理システムによって生成された実世界の状況を表すシンボル表現を入力にとって推論を行う。もしルールの条件部を満たすシンボル表現の組合せがあれば、推論の結果として結論部のシンボルに記述されたシンボル表現を新たに生成し、管理システムに出力する。JUSTO はルールベース、推論制御部、作業領域、シンボル更新待ちバッファから構成される。図 2 にシステム構成を示す。

3.2 推論ルールの記述形式

JUSTO の推論ルールの記述形式は Prolog と同様に一階述語論理の Horn 節を用いた。ルールは条件部と結論部から成り、任意のセンサ ID を変数で表現する。まず推論の結果生成されるシンボルを記述し、次に含意を表す “:-” を記述し、次に条件となる複数のシンボルを記述する。条件のシンボル同士は “&” で接続される。例えば、「一杯になったコップの下に物があり、コップが動いたとき、物が濡れる危険がある。」というルールは、
wetDanger(B) :- on(A, B)&cup(A)&full(A)&move(A).
と記述される。

3.3 推論の実行

JUSTO は前向き推論機構である。つまり、ルールの条件部を満たすシンボル表現を順次検査し、ルールが成立する場合は結論部のシンボル表現を推論機構内に追加するプロセスを繰り返す。

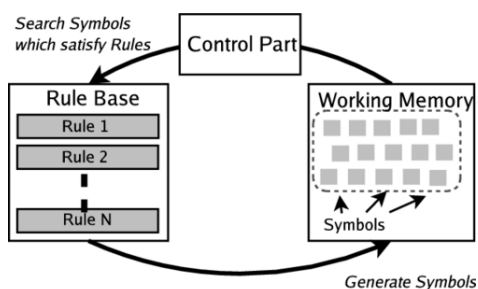


図 3: 推論実行部分の構成と動作

返す。JUSTO による前向き推論を SS に適用し、基本的なシンボル表現の成立条件から、より複雑なシンボル表現を導くことで現実のセンサネットワーク環境に成立する環境の状態を広く表現することが可能となる。

以下、JUSTO の推論の実行方法を詳述する。図 3 ではルールベースに推論ルールが、作業領域にその時点で成立しているシンボル表現が格納されている。

ルール 1 からルール N に対して、条件部と作業領域内のシンボル表現とのマッチングをとり、条件部を満たすシンボル表現の組合せがあれば結論部に記述されているシンボル表現が生成されて作業領域に追加される。JUSTO は全ルールに対して作業領域内の全シンボル表現とマッチングをとってこの作業を行うことで推論を実行する。

したがって、JUSTO は一度の推論によって各ルールと作業領域との間に一度ずつマッチングがとられる。したがって、JUSTO の推論方式は特定のルールのみが進行するのではなく、全ルールに対して幅方向に推論の制御が移る。全ルールに対するマッチングが終了すると、次のサイクルの推論が行われる。次の推論の際には新たに生成されたシンボルを含めてマッチングが行われる。こうして、一度推論を行う度に、成立している全シンボル表現に対して幅方向に一段ずつ推論が進行する。

3.4 変化するシンボル表現への対応

SS の環境ではセンサデータの変化に応じてシンボル表現が刻々と変化するため、推論機構側でシンボル表現の時間変化に対応しなければならない。

JUSTO はこの問題に対してシンボル表現の周期的更新機能を用いて対処した。JUSTO は、推論実行時に SS から入力されるシンボル表現を、まずバッファに格納して一時保存する。これは SS のシンボル表現はセンサデータの発生に伴って非同期に大量に入力されるので複数のシンボル表現をまとめて処理するためである。次に、バッファ内のシンボル表現を周期的に読み込み、作業領域内でシンボル表現の更新を行う。ここで、シンボル表現の読み込み周期はセンサデータの入力周期よりも大きい値をとる必要がある。

JUSTO はシンボル更新作業として、入力されたシンボル表現の種類ごとに異なった処理を行う。シンボル表現の種類は以下の 3 種類に分類される。

1. 以前の周期にも現在の周期にも入力があるシンボル表現
2. 以前の周期には入力がなかったが現在の周期で新たに入力が生じたシンボル表現
3. 以前の周期には入力があったが現在の周期では入力がなくなったシンボル表現

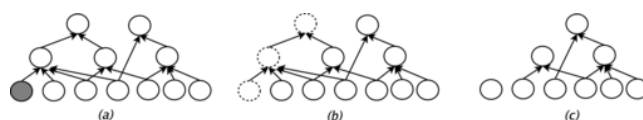


図 4: 依存関係を示す木構造を利用したシンボル消去

JUSTO は 1 を“変化しないシンボル表現”, 2 を“新たに生成したシンボル表現”, 3 を“消滅したシンボル表現”として扱う。

そしてシンボル表現の更新作業で、変化しなかったシンボル表現は継続して作業領域に保持し、新たに生成されたシンボル表現は作業領域に追加し、消滅したシンボル表現は作業領域から消去する。しかし、最後に述べた作業領域からのシンボル表現の消去には 1 つ問題がある。単に SS からの入力がなくなったシンボル表現のみを消去するのではなく、消去されるシンボル表現に依存して成立したシンボル表現群も同時に作業領域から消去されなければならない。

そこで、JUSTO は作業領域内のシンボル表現同士を条件-結論の依存関係を表す木構造で連結して表現する。推論実行時に、新たにシンボル表現が生成されたとき、生成されたシンボル表現と、生成の成立条件となったシンボル表現とを木構造で連結して保持する。シンボル表現を消去するときは、まず消去したいシンボル表現を指定し、指定したシンボル表現から木構造を再帰的に辿り、辿った先のシンボル表現群を全て消去する。このシンボル表現の消去の流れを図 4 に表す。図 4 では消滅したシンボル表現を条件として成立していたシンボル表現を全て消去できている。

JUSTO は推論実行時に一定周期ごとに以上のシンボル表現の更新作業を行う。以上の処理によって、シンボル表現の変化を随時反映した動的な推論を実現する。

4. 評価

4.1 JUSTO の推論性能

表 1 は JUSTO の推論実行時間の測定結果である。ルール数、シンボル表現数を変化させ、一度の推論に要する時間を測定した。使用したマシンは Dell Inspiron 700m(CPU: Intel Pentium M 1.60 GHz, Memory: 1GByte), OS は Linux(Fedora Core 3, kernel 2.6.12) である。

表 1 より、 10^2 個のオーダーのルール数、シンボル表現数に対して 10^{-1} 秒のオーダーで推論を実行可能であることが分かる。この推論実行時間は、3.4 節で説明した読み込み周期 ($10^{-1} \sim 1.0$ 秒) より小さければ良く、SS で想定されるのは $10^1 \sim 10^2$ 個センサに対して 10^{-1} 秒のオーダーでセンサデータが到着する環境なので、JUSTO は SS での実世界の推論にある程度対応可能だといえる。

| rule\symbol | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 100 | 7 | 14 | 17 | 28 | 36 |
| 200 | 15 | 24 | 42 | 54 | 68 |
| 300 | 22 | 40 | 53 | 77 | 110 |
| 400 | 30 | 52 | 72 | 108 | 145 |
| 500 | 36 | 64 | 90 | 131 | 180 |

表 1: 推論実行時間の測定結果 (単位:msec)

5. 考察

5.1 JUSTO の推論時の振舞い

JUSTO は 3.3 節と 3.4 節で説明した通り、入力されるシンボル表現の変化に応じて、JUSTO の内部で推論のために保持するシンボル表現を動的に追加/消去可能な、幅方向に進行する前向き推論機構である。

JUSTO の推論方式によって動的に変化するシンボル表現から推論を行った場合、3.4 節で説明した更新作業の結果として、消滅したシンボル表現に関する推論はシンボル表現の消滅と同時に終了するのに対して、複数回の推論周期の間で変化しないシンボルに関してはさらに推論が進行し続ける。結果として、シンボル表現の成立時間に応じて推論で生成されるシンボル表現群が異なる。つまり、成立時間の短いシンボル表現に関しては推論が頻繁に終了して推論が進行しないのに対して、成立時間の長いシンボル表現に関しては深く推論が実行されて推論結果としてより詳細で多様な論理表現が得られることになる。

以上の通り、JUSTO はシンボル表現の成立時間に応じて推論進行の深さが異なるという、特徴的な振舞いを行う。

5.2 シンボル表現の時間変化を考慮した論理表現の設計

SS では、実世界の状況を表す複数のセンサデータに対して、データとの対応付けによりシンボル表現を生成し、推論の対象とする。そのため、センサデータから得られるシンボル表現が長時間変化しないということは、そのシンボル表現により表現される物や環境間の関係が実世界において継続していることを表す。どのような状況を継続状態として扱うかは、SS の設計者による時間変化を考慮した論理表現の構築に依存する。

以下、シンボル表現の成立時間と実世界の状況について例を用いて考察し、JUSTO を SS に適用した際の、安定した関係を表すシンボル表現に関して推論が深く進行する振る舞いを説明する。

5.3 関係の安定性の、シンボル表現の成立時間への反映

本節では位置センサより得られるシンボル表現を例にして動的な環境における関係の安定性を考える。2.3 節で述べた、位置センサを用いたシンボル表現をもとに実世界を推論する場合、静止した物間に関してはデータ値自体に変化がないので、2.3 節で説明した物-物間、物-環境間の位置関係を表すシンボル表現は長時間成立し、関係が実世界において安定性を持つことがいえる。さらに、常に動いていてデータ値が様々に変化し、一見安定していないように見える物間の関係にも解釈関数の定義から安定性が生じる。

例えば、図 5 のようなある人がトレイにのせたコップをテーブルに運んでいる環境を考える。なお、以下に現れる物や環境中にはすべて位置センサが装着されているとする。このときコップ、トレイとも移動し、位置センサにより得られるデータ値は常に変化していても、コップがトレイにのっている限り両者のデータ値を解釈すると常に $on(A, B)$ のシンボル表現が成立する。また、コップ-テーブル間には、コップがテーブルに向かって移動している限り $moveToward(A, B)$ のシンボル表現が成立し、関係は安定のだといえる。一方、移動時に通り過ぎてしまうもの、例えば経路の脇にあるテレビは一時的にコップと $near(A, B)$ の関係が成立しても、通過するとすぐにこのシンボル表現は消滅する。ここで、人が動きを止めたり方向を変えたりすると、コップとテーブル間の $moveToward(A, B)$ シンボルは消滅し、新たな動きに応じたシンボル表現の生成が行われ、別の物間に安定した関係が生じ得る。

以上の例より、SS においては時間変化するシンボル表現から成る論理表現上で、長時間成立し、物や環境間で時間的に安

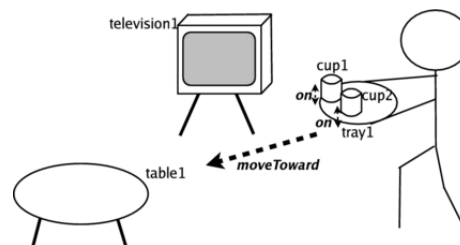


図 5: シナリオ例

定的な関係を表すシンボル表現と、安定的でない関係を表し、一時的にしか成立しないシンボル表現が現れることが分かる。

ここで、推論機構 JUSTO は実世界の物間の関係がどのようなときに安定的になるかには直接関与しない。関係がどのような状況で安定性を持つか、というのは SS の下位レベルにあるセンサデータとシンボル表現間の解釈関数に依存する。したがって、変化するシンボル表現に対して推論することを前提にしたとき、SS の設計者は解釈関数の定義時に各シンボル表現に関してどのような状況を安定的であるとみなすかを意識する必要がある。つまり、どのようなデータの変化をシンボル表現の継続条件として許容する/しないかを予め良く考慮して環境モデルを設計する必要がある。

シンボル表現の成立時間と実世界に現われる関係の安定性を正しく接地できれば、安定した関係に関して深く推論を行う推論が JUSTO の単純な推論方式によって実現されると考える。

5.4 安定性をもとにした状況表現

本節では関係の安定性と、JUSTO による安定性を反映した状況表現を説明する。5.1 節で説明したように、JUSTO はシンボル表現の成立時間に応じて推論進行の深さが異なるという特徴がある。それゆえ、SS に JUSTO の動的な前向き推論機構を適用することで 5.3 節で述べた安定した関係に関して推論が深く進行する。こうして、特別に推論対象を選択する機構を持たなくても、自動的に一時的で安定性のない関係よりも時間的に安定した関係に対してより詳細な表現を生成することができる。以上より、JUSTO を SS に適用して動的な推論を行うことで、実世界上で安定的な関係をもとにした状況表現方法が実現されると考える。

6. おわりに

本稿では、SS 上で動作する推論機構 JUSTO の設計と動作を述べ、動作の結果として動的に変化する実世界の SS 環境において安定した物や環境間の関係に対して推論が深く進行し、安定性に基づいた状況表現を得られることを考察した。今後、安定性に基づいた推論に関して、より多くの推論ルールの作成を行い、実世界に適用して発展させたい。

参考文献

- [服部 04] 服部 正嗣, 平松 薫, 柳沢 豊, 山田 辰美, 岡岡 剛, 佐藤 哲司: 環境の多様な利用のための実世界セマンティクスに関する考察. 人工知能学会研究会, SIG-SWO-A403-02, 2004.
- [広田 05] 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. 情報処理学会報告, 2005-ICS-141, pp.29-36, 2005.