

## センサネットワークにおける 接触関係を用いたルール記述手法の提案

神田 武<sup>†</sup> 柳沢 豊<sup>††</sup> 今井 倫太<sup>†</sup> 前川 卓也<sup>††</sup> 岡留 剛<sup>††</sup>

<sup>†</sup>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

<sup>††</sup>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}@ayu.ics.keio.ac.jp, ††{yutaka,maekawa}@cslab.kecl.ntt.co.jp,

†††houmi@idea.brl.ntt.co.jp

あらまし 本論文では物どうしの接触情報を基礎的なデータとして利用し、スマートオブジェクトの通信や計算処理を規定するルール記述方式, contact-based notation (CbN) を提案する. CbN の定める通信方法では, 各スマートオブジェクトは直接接触関係を持つスマートオブジェクトのみと通信, データ共有することになる. そのため, CbN を利用してアプリケーション開発を行うことで, 狭い範囲に物が密集した環境においても少ない通信量でスマートオブジェクトを動作させられる. 本論文では, コンピュータシミュレーションによって複数のスマートオブジェクトを仮想的に動作させ, CbN によって規定される通信方法と, 近距離のブロードキャスト通信との, スマートオブジェクト間の通信量を測定した. 測定結果より, 狭い範囲に多数の物が密集した環境でも, CbN の規定する通信方法によってスマートオブジェクトの通信量を十分に小さく抑えられることを確認した.

### Contact-based Notation for Describing Rules on Sensor Nodes

Takeshi KANDA<sup>†</sup>, Yutaka YANAGISAWA<sup>††</sup>, Michita IMAI<sup>†</sup>, Takuya MAEKAWA<sup>††</sup>,  
and Takeshi OKADOME<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Technology, Keio University Hiyoshi 3-14-1, Kohoku-ku, Yokohama,  
223-8522 Japan

<sup>††</sup> NTT Communication Science Laboratories Hikaridai 2-4, Souraku-gun, Kyoto, 619-0237 Japan

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

†††houmi@idea.brl.ntt.co.jp

**Abstract** This paper proposes a contact-based notation (CbN) to describe rules for developing application systems using smart objects. Our proposed CbN enables us to reduce cost to communicate between smart objects with wireless network, because a smart object only communicates with the neighbor objects indicated by CbN. In other words, the CbN reduce the distance between objects to communicate with. We have an experiment to evaluate the performance of our proposed mechanism. The result of the experiment shows that our mechanism can reduce communication costs of smart objects.

#### 1. はじめに

近年, スマートオブジェクトに関する研究が盛んに行われている. スマートオブジェクトとは, センサ, アク

チュエータ, 小型コンピュータが埋め込まれた家具, 日用品, 電化製品といった物のことであり, スマートオブジェクト自身が計算処理や通信を行うことで, 物を用い

た実世界上のアプリケーションの実現を可能にしている。たとえば、センサによって知能化されたコップ [1] や、センサで自身の状況を把握し表示できるディスプレイ [8] などが提案されている。スマートオブジェクトは、各々の物がセンシング、計算処理、通信といった機能を持つため、既存のセンサネットワーク技術を用いて実現できる。そのため、スマートオブジェクトのアプリケーション開発の際にはセンサネットワークのためのプログラム記述方式が用いられることが多い。

センサネットワークを用いて実現されるアプリケーションとしては、野生生物の生体観測、車両の追跡、災害の検知が代表例である。このようなアプリケーションを構築する際には、屋外の広範な範囲に配置された複数のセンサノードがアドホックにネットワークを構成し、近隣のセンサノード間で協調的にデータ収集を行う処理<sup>(注1)</sup>を記述することになる。その際、センサノードは計算資源が限られているため、各々のセンサノードがデータを受渡するセンサノードを適切に決定し、少ない通信量で通信する必要がある。

そのため、従来からセンサノード間での通信方法を規定するための API を提供し、複数のセンサノードに関連する協調的な処理を記述可能なプログラム記述方式が多数提案されている。代表的なものに Kairos [6], Regiment [14], SICL [16] がある。Kairos, Regiment, SICL では、いずれもセンサノード間の通信方法としてブロードキャスト方式を採用している。Kairos [6] は、オブジェクト指向型のプログラム記述方式であり、個々のセンサノードをインスタンスとして ID や属性値を設定できる。さらに、1 ホップ以内の近隣センサノードとの通信や他のセンサノードのデータへのリモートアクセスについて API を提供している。Regiment [14] は、関数型のプログラム記述方式であり、Kairos と同様にセンサノード単位でのデータタイプを用意している。さらにホップ数やセンサノードの属性値を用いて周囲のセンサノードをグルーピングし、各グループに対してデータを送受信できる。SICL [16] は手続き型と宣言型を組み合わせた高度な記法を持ち、ダブルスペースと呼ばれる共有データを用いて通信を管理している。センサノードの場所やセンサ値の範囲といった、特定の状況にあるセンサノードどうしが同一のダブルにまとめられ、それらの間でブロードキャスト通信を行う。

しかし、センサネットワークとスマートオブジェクトでは想定する動作環境、特に一定範囲内でのセンサノードの個数が大きく異なる。スマートオブジェクトのアプリ

ケーションは家、オフィス、倉庫といった室内環境での利用が想定されるため [17] [12] [9]、屋外での動作が想定されるセンサネットワークに比べて格段に狭い範囲に数十個のノードが密集する。そのため、各スマートオブジェクトの通信圏内には多数のスマートオブジェクトが存在することになり、従来のプログラム記述方式によってスマートオブジェクト間でブロードキャスト通信を行なった場合、スマートオブジェクト間の通信量が膨大になる問題が生じる。

そこで本論文では、スマートオブジェクトにおける通信量の問題を解決するため、物の接触情報をもとに通信するスマートオブジェクトのペアを規定できるルール記述方式、contact-based notation (CbN) を提案する。CbN は、スマートオブジェクト上の計算処理やスマートオブジェクト間の通信を、一階述語論理にもとづいたルールによって記述する論理型のルール記述方式である。CbN の定める通信方法では、各スマートオブジェクトは直接接触関係を持つスマートオブジェクトのみと通信、データ共有する。スマートオブジェクト間の通信を規定するために接触関係の情報を用いることで、以下の利点がある。

- 狭い範囲に多くの物が密集する環境でも、接触関係のあるスマートオブジェクト間のみで通信すれば、各スマートオブジェクトを少ない通信量、メモリ量で動作させられる。

- 室内環境では、環境内に存在する物は必ず壁、床、または他の物と接する。したがって、接触関係を辿ってデータを受渡することで、直接的に接触関係のないスマートオブジェクト間でもデータを共有できる。

- 物の接触関係は、物理的かつ可視的な情報である。したがって、接触関係の情報を用いてアプリケーションを構築することで、ユーザやアプリケーション開発者にとって挙動を理解しやすいアプリケーションが実現される。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2章で関連研究の動向と問題について説明する。3章では、CbN のアプローチとアプリケーション例を述べる。4章で CbN の設計について述べる。さらに5章ではシミュレーション実験の結果から、CbN によって規定される通信方法と近距離のブロードキャスト通信との通信量の比較を行う。最後に6章でまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 従来研究と課題

本章では、まずセンサネットワークのプログラム記述方式における、センサノード間の通信コスト削減方法の方針を述べる。次に、従来のプログラム記述方式をスマートオブジェクトのアプリケーション開発に適用した際に生じる、通信量の問題について説明する。

(注1): たとえば、Great Duck Island でセンサネットワークを用いて野鳥の生態観測を行った研究では、237 エーカーの範囲に 32 個のノードを配置し、データを収集している [10]。

## 2.1 センサノード間の通信コスト削減方法

従来からセンサノード間での通信方法を記述可能なプログラム記述方式が多数提案されている[2]・[5],[11],[13],[15],[19]。これらのプログラム記述方式では、センサノード間の通信量を削減するための工夫として以下の3種類の方法を用いている。

(1) ネットワークトポロジ上の近隣性を考慮する方法[19]:

あるセンサノードは一定のホップ内にある近隣のセンサノードのみとデータ共有する。

(2) センサノードの属性値を用いる方法[2],[4],[5],[13]:

あるセンサノードは、センサ値やセンサノードIDといった属性値を判定することで通信するセンサノードを決定する。たとえば、温度センサの値が20度以下のセンサノード間でブロードキャスト通信を行なう、といった動作を行う。

(3) センサノードの物理的位置を考慮する方法[3],[11],[15]:

各センサノードの位置情報を考慮し、位置に応じたトポロジ構成やルーティングを行なう。位置情報としては、GPSや無線強度によって地理情報や部屋のIDを取得することが多い。

## 2.2 通信量の問題

2.1節で、従来のプログラム記述方式では(1)ネットワークトポロジ上の近隣性、(2)センサノードの属性値、(3)センサノードの物理的位置、の基準によって通信するセンサノードのペアを制限できることを述べた。しかし、スマートオブジェクト環境ではワンルームのアパートのような狭い室内環境に数十個のノードが密集することが想定されるため<sup>(注2)</sup>、従来の通信方法ではスマートオブジェクト間の通信量を十分に小さく抑えられない。以下、詳しく説明する。

まずネットワークトポロジ上での近隣性を用いる方法を検討する。たとえば、最も単純なモデルとして各センサノードが無線通信で一定の距離内のセンサノードとメッシュ状のネットワークトポロジを形成し、それらの間でブロードキャスト通信を行うことを考える。この場合、あるセンサノードの通信量は、通信圏内のセンサノード数に比例して増加する。そのため、ノードが密集するスマートオブジェクト環境では、1ホップ内で通信可能なスマートオブジェクトのペア数が膨大になり、スマートオブジェクト間の通信量が急激に増加する。

(注2): たとえば、MITで行われた室内の状況検知に関する研究では、1ルームのアパートの様々な場所や物に77個から84個のセンサノードを配置し、データ収集している[18]。

次に、センサノードの属性値を利用する手法を検討する。たとえば、温度センサのセンサ値を属性値として、温度が20度以下のセンサノード間のみブロードキャスト通信を行う、といったシナリオが考えられる。一般にこのような属性値の判定では、通信圏内のセンサノード数が増加すればそれに合わせて条件を満たすセンサノードの数も一定の割合で増加する。したがってこの手法でも、スマートオブジェクト環境ではスマートオブジェクト間の通信量を十分に小さくできない。

最後に、物理的位置情報を用いてセンサノード間の通信を制限する手法を検討する。たとえばGPSで得られたセンサノードの3次元位置情報に対して2次元、あるいは3次元の領域データを適用し、ノードの位置を分類することを考える。しかしこの方法を用いても、スマートオブジェクト環境ではひとつの領域内のノードの数が多く、領域内のスマートオブジェクト間でブロードキャスト通信を行った際には通信量が膨大になる。

したがって、上記のいずれの方法を用いても、室内にセンサノードが密集するスマートオブジェクト環境では通信量増加の問題が生じる。

## 3. 提案手法とアプリケーション

本章では、提案するルール記述方式CbNのアプローチと、CbNによって記述可能と考えられるアプリケーション例を述べる。

### 3.1 物どうしの接触情報を利用したルール記述方式の提案

本論文では、物どうしの接触情報をもとに、スマートオブジェクト間の省コストな通信を実現するルール記述方式CbNを提案する。通信量の問題に対するCbNのアプローチを以下にまとめる。

- CbNは、“物どうしの接触情報”を用いて通信するスマートオブジェクトのペアを規定する。通信するスマートオブジェクトのペアを接触関係を持つものに限定することで、通信量の問題を解決する。

### 3.2 想定するアプリケーション例

提案手法によって下記のアプリケーションが実現可能と考えられる。下記のアプリケーションに共通しているのは、1. 生活環境で動作すること、2. 狭い範囲に複数のノードが密集すること、3. 様々な種類の物が協調して動作すること、である。

- グループ推定

グループ推定のアプリケーションでは、スマートオブジェクトは物どうしの位置関係や組合せをもとにグループを推定する。たとえば、宴会場では、給仕はトレイに様々な食器をのせて客にサービスする。ここで、トレイの役割は、上に乗る食器の種類で異なる。図1はトレイの異

なる役割を示している。トレイは、上に乗る食器の種類や積み重なり方から、食べ物のトレイ、飲み物のトレイ、片付け用のトレイ、と分類できる。これらの役割を知るためには、接触情報をもとにした物の位置関係や組み合わせを知る必要がある。

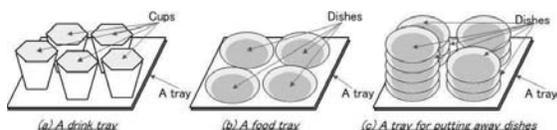


図1 グループ推定

● 整列支援

小売店では、店の棚が整理されていなければならず、配置の誤りや欠品があると売り上げの損失につながる。想定する整列支援アプリケーションでは、スマートオブジェクトが棚と商品の位置関係や商品の並びの情報を接触情報をもとに取得し、商品の配置違いや欠品を見つけて知らせてくれる。整列支援は、たとえば大型の本屋などで利用できる。なぜなら、一般の本屋では、本はその種類(書籍、雑誌、文庫)や著者名、巻数などで分類され、一定の並びで整列されているからである。

● モニタリング

モニタリングアプリケーションでは、スマートオブジェクトは周囲の物の位置関係や物の温度、照度、加速度といった物理状況を監視し、ユーザに状況の変化を知らせる。たとえば、壊れやすい物が傾いたテーブルに置かれたら、危険状態として人に知らせる(図2)、といった利用が考えられる。モニタリングアプリケーションは、生活環境でのセキュリティシステムなどに応用でき、警備員の監視コストを下げられると考えられる。

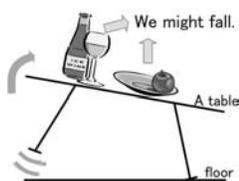


図2 モニタリング

● 機器の自動化

電気機器にセンサードとアクチュエータをとりつけ、状況に応じて機器を動作させることができる。電気機器を自動化すると、手作業で動かすよりもコストを下げられる。ここでは、周囲の物の種類に応じて異なった動作をする知的照明システムについて説明する。知的照明システムでは、ユーザがテーブルの上に雑誌やノートを置くとテーブルランプが明るく点灯し、ユーザがテーブルの上に酒類を置くと、テーブルランプが薄暗く点灯する。こ

のような知的証明システムを実現するには、照明機器自身が室内での物の種類や位置関係を把握する必要がある。

## 4. CbN の記法

本章では、物どうしの接触情報をもとにスマートオブジェクトの通信、計算処理を規定する論理型のルール記述方式 CbN の記法について説明する。

### 4.1 物やセンサデータを項にとる述語表現

CbN はスマートオブジェクトの推論ルールと通信ルールを記述するための論理型の記述方式である。CbN の基本的なモデルは一階述語論理に準ずる。

CbN の基本表現は述語である。そこで、まず述語の項となる変数と定数について説明する。変数は  $x_1, x_2, \dots, x_n$  と表記される。定数は  $A_1, A_2, \dots, A_n$  と表記される。1つの変数は1つの文字列、1つの数字、あるいは1つのスマートオブジェクト(以下、オブジェクトと表記)を表す。変数がオブジェクトであることを明記したい場合は、 $o_1, o_2, \dots, o_n$  が用いられる。変数には、ユーザが自由に定義できるユーザ変数と、システムによって定義されるシステム変数がある。予約変数については、後で説明する。変数と定数は、項と呼ばれ、 $X_1, X_2, \dots, X_n$  と表記される。項どうしを算術演算  $+$ ,  $-$  で結合したのも、また項である。たとえば、 $A_1$  と  $A_2$  が項のとき、 $A_1 + A_2$  も項である。

次に、述語の表現を述べる。1つの述語は、 $p(X_1, X_2, \dots, X_n)$  と表記される。n個の項を持つ述語はn項述語と呼ばれる。ある述語は、真か偽かの真理値を1つ持つ。真理値は、述語ごとに項の値に応じて決定される。本稿では、しばしば述語  $p(X_1, X_2, \dots, X_n)$  を  $p$  と省略する。CbN は2種類の述語を提供する。ユーザが自由に定義できる述語と、システムが自動的に真偽を与える予約述語である。予約述語については後で説明する。1つの述語は他の述語と論理演算子  $\wedge, \vee$  によって結合される。

### 4.2 予約述語

CbN では、システムによって管理される予約述語を持つ。その形式は  $p(o_1, o_2)$  か  $p(o_1, X_1, \dots, X_n)$  である。 $p(o_1, X_1, \dots, X_n)$  は1つ以上のシステム変数を項にとる。表1はCbNの予約述語を示す。

表1 予約述語

spatial relation	$sr\_on, sr\_in, sr\_neighbor$
sensor value	$sn\_temperature, sn\_luminance$ $sn\_acceleration, sn\_humidity$
property	$pr\_owner, pr\_edition, pr\_author$ $pr\_weight$
category	$category$

$sr\_on(o_1, o_2)$ ,  $sr\_in(o_1, o_2)$ ,  $sr\_neighbor(o_1, o_2)$  は図3に示すように、オブジェクトの位置関係を表す。これらは接触関係をもとにしている。(a)  $sr\_on$  は2つのオブジェクト間の支持、被支持関係を表す。(b)  $sr\_in$  は2つのオブジェクト間の包含関係を表す。(c)  $sr\_neighbor$  は2つのオブジェクト間の近隣関係を表す。

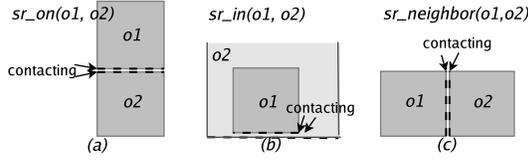


図3 オブジェクトの位置関係: (a) $sr\_on$  (b) $sr\_in$  (c) $sr\_neighbor$

$category(o_1, A_1)$  はオブジェクト  $o_1$  のカテゴリ情報を表す。たとえば、 $category(o_1, book)$  は  $o_1$  のカテゴリが“book”であることを示す。CbN では、推論ルールと通信ルール内でスマートオブジェクトのカテゴリを明記する必要がある。

#### 4.3 推論ルール

CbN は上記の述語表現を用いて、以下のように推論ルール  $R_{inf}$  を定義する。

$$R_{inf} = p_1 \wedge p_2 \wedge \dots \wedge p_n \rightarrow p.$$

#### 4.4 通信ルール

CbN ではまた、述語の真理値はオブジェクトごとに異なってもかまわないこととしている。たとえば、オブジェクト  $o_1$  内で述語  $p$  が真をとり、オブジェクト  $o_2$  内で述語  $p$  が偽となることがありえる。各々のオブジェクト内での真偽を指定するために、CbN では  $p@o$  という記法を用意している。 $p@o$  はオブジェクト  $o$  での述語の真理値を表す。この記法は、通信ルールで用いられる。

通信ルールは、ある述語をスマートオブジェクト間でコピーする方法を記述する。通信ルールによって、あるスマートオブジェクトは複数のスマートオブジェクトの述語を取得し、推論に利用することができるようになる。

ある通信ルール  $R_{com}$  は、下の形式で記述される。

$$R_{com} = p_1@o_1 \wedge p_2@o_1 \wedge \dots \wedge p_n@o_1 \rightarrow p@o.$$

ここで、 $\rightarrow$  の前の述語  $p_1, p_2, \dots, p_n$  には、 $o_1$  と  $o$  の間に接触関係があることを示す述語を1つ以上含まなければならない。

#### 4.5 CbN のルール例

CbN では、通信ルールと推論ルールを組み合わせたルール記述によって、複数のオブジェクトにまたがった協調的な処理を実現する。以下、CbN によって実現する2つの処理例を説明する。

#### ● 複数のオブジェクトに関する位置関係

CbN では、推論ルールと通信ルールを組み合わせた再帰的なルール記述により、CbN は「皿が並んでいる」、「本が整列されている」といった複数のオブジェクト間の位置関係を簡潔に定義できる。

下記のルールは、図4のように複数のスマートオブジェクトが積み重なっていることを記述した例である。これらのルールを複数のスマートオブジェクト上で前向き実行することで、

この例では、CbN は2項述語である述語  $stacked$  を  $sr\_on$  の接触関係を持つスマートオブジェクト間で伝播させることで、オブジェクトが積み重なっている状況を推論する。

#### - 推論ルール

$$sr\_on(o_1, o_2) \rightarrow stacked(o_1, o_2, 1),$$

$$stacked(o_1, o_2, x_2) \wedge stacked(o_2, o_3, x_3) \wedge x_1 = x_2 + x_3 \rightarrow$$

$$stacked(o_1, o_3, x_1).$$

#### - 通信ルール

$$sr\_on(o, o_1)@o_1 \wedge stacked(o_1, o_3, x_1)@o_1 \rightarrow$$

$$stacked(o_1, o_3, x_1)@o,$$

$$sr\_on(o_3, o_4)@o_3 \wedge stacked(o_1, o_3, x_1)@o_3 \rightarrow$$

$$stacked(o_1, o_3, x_1)@o_4.$$

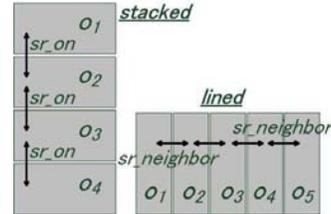


図4 複数のオブジェクトに関する位置関係

#### ● 離れたオブジェクトの指定

CbN は、図5のように複数の位置関係を組み合わせることで、あるオブジェクトが接触関係を辿って離れた位置にある別のオブジェクトを指定し、データ共有することができる。下の例では、オブジェクト  $o_1$  が離れたオブジェクト  $o_5$  を指定し、データを送信することを表している。この例では、スマートオブジェクトが周囲の物どうしの位置関係から、 $path\_A$ ,  $path\_B$  という新たな述語を生成している。さらに、生成された述語は通信ルールにしたがって伝搬される。

#### - 推論ルール

$$stacked(o_1, o_3, 2) \wedge sr\_on(o_4, o_3) \rightarrow$$

$$path\_B(o_1, o_4),$$

$$path\_B(o_1, o_4) \wedge sr\_in(o_5, o_4) \rightarrow$$

$$path\_A(o_1, o_5).$$

## 通信ルール

$sr\_on(o_4, o_3)@o_3 \wedge path\_B(o_1, o_4)@o_3 \rightarrow$   
 $path\_B(o_1, o_4)@o_4,$   
 $sr\_in(o_5, o_4)@o_4 \wedge path\_A(o_1, o_5)@o_4 \rightarrow$   
 $path\_A(o_1, o_5)@o_5.$

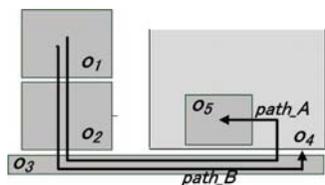


図5 離れたオブジェクトの指定

## 5. 実験

本研究では、コンピュータシミュレーションによって複数のスマートオブジェクトを3次元空間上で仮想的に動作させ、各スマートオブジェクトがCbNによって規定される接触情報にもとづいた通信方法で通信する場合と、近距離ブロードキャスト通信によって通信する場合との、スマートオブジェクト間の通信量を測定した。

### 5.1 シミュレーション環境

本研究では、1台のLinuxマシン上でのマルチスレッド実行により、複数のスマートオブジェクトを仮想的に動作させた。まず、一辺の長さを1とする3次元空間内に一辺の長さ0.1の立方体状スマートオブジェクトを複数配置した<sup>(注3)</sup>。さらに、各スマートオブジェクト上で推論エンジンを並列的に動作させた。なお、推論エンジンには、著者らが以前に開発したセンサノード上で動作可能な前向き推論エンジン[7]を利用した。それぞれのスマートオブジェクトは温度センサ、照度センサ、加速度センサ、接触センサを搭載し、各センサから述語データを取得し、推論処理に利用できる。さらに、各スマートオブジェクトは近隣のスマートオブジェクトと通信、データ共有することで、複数のスマートオブジェクトのデータを推論処理に利用できる。スマートオブジェクト間の通信方法としては、センサネットワークにおける従来型の通信方式である近距離のブロードキャスト通信と、提案手法である接触情報にもとづいた通信方式を用意した。各々のスマートオブジェクトは内部の時刻データを用いて周期的に通信-推論処理を繰り返す。各オブジェクトがデータ送信する周期は、1秒とした。

### 5.2 オブジェクト数を変えたときの平均データ受信量の測定

本研究ではまず、空間内のオブジェクト数を変えたと

きの、1つのスマートオブジェクトあたりのデータ受信量の変化を測定した。図6のようにシミュレーションによってオブジェクトをランダムに配置し、オブジェクト数を5個から40個まで変化させて、それぞれの環境でのスマートオブジェクトごとのデータ受信量を測定した。

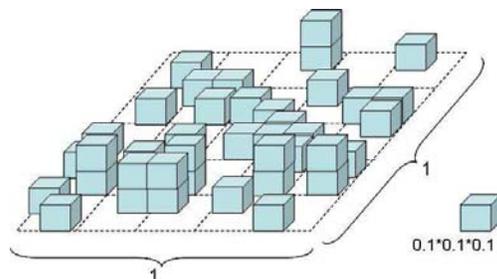


図6 シミュレーションによる物のランダムな配置

測定結果をもとに、スマートオブジェクトが1周期ごとに受信するデータ量の平均値を求めたものが表2である。この結果をグラフ表示したものが図7である。

測定結果より、従来のブロードキャストによる通信では、スマートオブジェクト数が増えたときに平均データ受信量が急激に増加することが分かった。さらに、距離0.3のブロードキャスト通信と、距離0.45のブロードキャスト通信での平均データ受信量を比較すると、ブロードキャストの距離が長くなることで平均データ受信量が急激に増加することが分かった。一方、CbNによる接触情報にもとづいた通信方法では、受信量の増加はブロードキャスト方式に比べて小さいことが分かった。特にスマートオブジェクトの数が増えるほど、CbNによる通信では、ブロードキャストに比べて、より小さい受信量で動作可能であるといえる。

表2 ブロードキャスト方式と接触関係を考慮した通信方式のコスト比較 (単位: byte)

物の数	10	20	30	40
broadcast(距離 0.3)	21	70	193	321
broadcast(距離 0.45)	119	488	986	1687
contact	88	91	93	90

### 5.3 オブジェクトの配置を変えたときの平均データ受信量の測定

次に、空間内のオブジェクト数を固定し、オブジェクトの配置を様々に変化させてスマートオブジェクト間の通信量を測定した。まず、本論文ではオブジェクトの配置を定量的に分類するための指標として次の2つのパラメータを用意した。

グループ数: 接触関係によってまとめられるオブジェクトの集合の数。

(注3): この配置は、たとえば4メートル四方のワンルームアパート内に一辺40センチメートルの物を複数配置する場合に相当する。

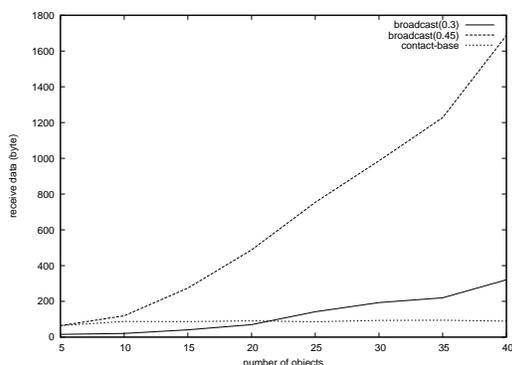


図7 ブロードキャスト方式と接触関係を考慮した通信方式の受信量比較

平均接触数：各オブジェクトに接触するオブジェクト数の平均値。

スマートオブジェクトの数を50個に固定したうえで、2つのパラメータが極端な値をとる配置として、図8から図11に示す4通りの配置を生成した。さらにそれぞれの配置をHill(図8)、Shuriken(図9)、Mountain(図10)、Chain(図11)と名付けた。

(a)Hillは、グループ数が多く(10グループ)、平均接触数が多い(2.0個)例である。(b)Shurikenは、グループ数が多く(10グループ)、平均接触数が少ない(1.6個)例である。(c)Mountainは、グループ数が少なく(1グループ)、平均接触数が多い(4.1個)例である。(d)Chainは、グループ数が少なく(1グループ)、平均接触数が少ない(2.1個)例である。

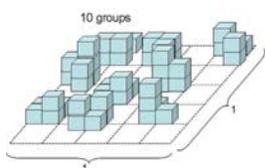


図8 (a)Hill

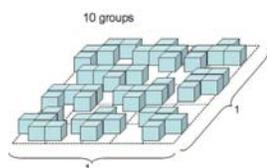


図9 (b)Shuriken

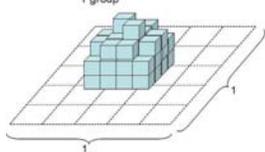


図10 (c)Mountain

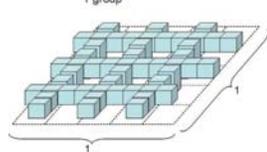


図11 (d)Chain

それぞれの配置において、6.1.2節での測定と同様に、ブロードキャスト通信を行った場合と、CbNの接触情報にもとづいた通信を行った場合の1周期あたりのデータ受信量を測定した。測定結果を表3に示す<sup>(注4)</sup>。測定結果

(注4)：Mountainの配置においてスマートオブジェクトがブロードキャスト通信(距離0.4)を行ったときのデータ受信量については、シミュレ

から、スマートオブジェクトの配置を変えた際の、データ受信量の比較として以下のことが観察される。

- 4種類のいずれの配置においても、接触情報にもとづいた通信の方がブロードキャストによる通信よりも通信量が少ない。
- 接触情報にもとづいた通信とブロードキャストによる通信のいずれの通信方法でも、グループ数が少ない配置(Mountain, Chain)の方がグループ数の多い通信(Hill, Shuriken)よりも、データ受信量が大きくなる。
- ブロードキャストによる通信では配置によってデータ受信量の差が非常に大きい。たとえば、距離0.2のブロードキャストでは、351 byteから3741 byteまで幅がある。一方、接触情報にもとづいた通信では、配置ごとの通信量の差が比較的少ない。

表3 4種類の配置における1オブジェクトあたりのデータ受信量(平均値)

配置	Hill	Shuriken	Mountain	Chain
broadcast(0.2)	414	351	3741	489
broadcast(0.4)	5116	3514	N/A	4633
contact-base	95	73	300	109

つまり、同じ密度の配置を比べたとき、グループ数が多く平均接触数が少ないときにブロードキャストによる通信では通信量は比較的少ないが、グループ数が少なく平均接触数が多いときには、ブロードキャスト通信では通信量が膨大になってしまうといえる。一方、接触情報にもとづいた通信では、いずれの配置でもブロードキャストに比べて小さい通信量で通信可能であり、グループ数が少なく平均接触数が多い配置においても比較的小さい通信量で通信可能だといえる。

## 6. まとめと今後の課題

本論文では物の接触情報を利用してスマートオブジェクト上での通信や計算処理を規定する記述方式CbN(contact-based notation)を提案した。CbNでは、物の接触情報をもとに通信するオブジェクトのペアを規定する。各オブジェクトは接触関係のあるオブジェクトのみと通信するため、全体としてオブジェクト間の通信量を小さく抑えられる。

本論文ではスマートオブジェクトの数と配置を様々な変化させたシミュレーション実験を行い、CbNでスマートオブジェクト間の通信を規定した場合と従来のブロードキャストによる通信を行った場合の、スマートオブジェクトごとのデータ受信量を測定した。測定結果から、ワ

シミュレーションでのデータ容量を超えてしまったため測定できなかった。そのため表中ではN/Aと表記している。

ンルームアパートのような狭い範囲に 50 個のスマートオブジェクトが密集する環境でも, CbN によってスマートオブジェクト間の通信量を十分に小さく抑えられることを示した.

以上により, 物どうしの接触情報を利用してスマートオブジェクト間の通信方法を規定することで, スマートオブジェクト間の効率的な通信を実現する, 新たなプログラム記述方法を提案できたといえる.

今後の課題として, CbN によって記述できるアプリケーションの適用範囲を考察することが挙げられる. 室内環境では様々な物の配置がある. 一方, CbN では通信するスマートオブジェクトのペアを接触情報によって限定するため, アプリケーションの挙動が制限される. たとえば, 直接接触関係を持たず, 複雑な位置関係にある物どうしを適切に連携して動作させることは, 記述上難しい. そこで, 室内における物の様々な配置状況を観察し, CbN によってどのようなアプリケーションが容易に記述可能で, どのようなアプリケーションは記述が難しいのか, CbN によるアプリケーション開発の有用性を見極める必要がある.

#### 文 献

- [1] M. Beigl, H.-W. Gellersen, and A. Schmidt. Mediacups: experience with design and use of computer-augmented everyday artifacts. *Computer Networks (Amsterdam, Netherlands: 1999)*, 35(4):401–409, 2001.
- [2] M. Beigl, A. Krohn, T. Zimmer, C. Decker, and P. Robinson. Awarecon: Situation aware context communication. In *UbiComp '03: Proceedings of the 5th International Conference on Ubiquitous Computing*, pages 132–139, 2003.
- [3] C. Borcea, C. Intanagonwivat, P. Kang, U. Kremer, and L. Iftode. Spatial programming using smart messages: Design and implementation. In *ICDCS '04: Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'04)*, pages 690–699, 2004.
- [4] D. Ganesan, D. Estrin, and J. Heidemann. Dimensions: why do we need a new data handling architecture for sensor networks? *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 33(1):143–148, 2003.
- [5] B. Greenstein, D. Estrin, R. Govindan, S. Ratnasamy, and S. Shenker. Difs: A distributed index for features in sensor networks. *Elsevier Journal of Ad Hoc Networks*, pages 163–173, 2003.
- [6] R. Gummadi, O. Gnawali, and R. Govindan. Macro-programming wireless sensor networks using kairios. In *Proceedings of the First International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'05)*, pages 126–140, 2005.
- [7] T. Kanda, Y. Yanagisawa, T. Maekawa, M. Imai, H. Kawashima, and T. Okadome. A distributed inference system on sensor nodes using neighbors' context data. In *SWOD'07: Proceedings of the 3rd IEEE International Workshop on Databases for Next-Generation Researchers*, pages 116–121, 2007.
- [8] N. Kohtake, R. Ohsawa, T. Yonezawa, Y. Matsukura, M. Iwai, K. Takashio, and H. Tokuda. u-texture: Self-organizable universal panels for creating smart surroundings. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp'05)*, pages 32–43, 2005.
- [9] G. Kortuem, D. Alford, L. Ball, J. Busby, N. Davies, C. Efstathiou, J. Finney, M. Iszatt, and W. Kinder. Sensor networks or smart artifacts? an exploration of organizational issues of an industrial health and safety monitoring system. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp'07)*, 2007.
- [10] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *WSNA '02: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 88–97, 2002.
- [11] R. Meier and V. Cahill. Steam: Event-based middleware for wireless ad hoc network. In *ICDCSW '02: Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems*, pages 639–644, 2002.
- [12] D. Molyneaux and H.-W. Gellersen. Cooperatively augmenting smart objects with projector-camera systems. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp'07)*, 2007.
- [13] L. Mottola and G. P. Picco. Logical neighborhoods: A programming abstraction for wireless sensor networks. *Distributed Computing in Sensor Systems*, 4026(2006):150–168, 2006.
- [14] R. Newton, G. Morrisett, and M. Welsh. The regiment macro-programming system. *IPSN '07: Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, pages 489–498, 2007.
- [15] S. Ratnasamy, B. Karp, L. Yin, F. Yu, D. Estrin, R. Govindan, and S. Shenker. Ght: a geographic hash table for data-centric storage. In *WSNA '02: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, 2002.
- [16] F. Siegemund. A context-aware communication platform for smart objects. In *Pervasive '04: Proceedings Second International Conference on Pervasive Computing*, pages 69–86, 2004.
- [17] M. Strothbach, H. W. Gellersen, G. Kortuem, and C. Kray. Cooperative artefacts: Assessing real world situations with embedded technology. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp'04)*, 2004.
- [18] E. M. Tapia, S. S. Intille, and K. Larson. Activity recognition in the home using simple and ubiquitous sensors. In *Pervasive '04: Proceedings 2nd International Conference on Pervasive Computing*, pages 158–175, 2004.
- [19] K. Whitehouse, C. Sharp, E. Brewer, and D. Culler. Hood: a neighborhood abstraction for sensor networks. In *MobiSys '04: Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 99–110, 2004.