

# ユビキタスセンサ環境におけるセンシング周期および位置情報に基づく オーバーレイネットワークの構築

小坂 佳弘<sup>†</sup> 神崎 映光<sup>†</sup> 原 隆浩<sup>†</sup> 西尾章治郎<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †{kosaka.yoshihiro,kanzaki,hara,nishio}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 本稿では、ユビキタスセンサ環境における効率的なセンサデータ収集のためのオーバーレイネットワーク構築手法を提案する。提案手法では、センサデバイスをピアとし、ピアの位置およびピアに設定されたセンシングの周期に基づいてオーバーレイネットワークを構築する。まず、ピアの位置を考慮して階層的なオーバーレイネットワークを構築する。次に、各階層ごとに、ピアに設定されたセンシングの周期に基づくオーバーレイネットワークを構築する。これにより、領域および時刻を指定するようなデータ要求を、対応する情報を観測するピアにのみ効率よく伝播する。キーワード ユビキタスセンサ環境、オーバーレイネットワーク、センシング周期、位置情報、クエリ伝播

## An Overlay Network Construction Method based on Cycle of Sensing and Location in Ubiquitous Sensor Environments

Yoshihiro KOSAKA<sup>†</sup>, Akimitsu KANZAKI<sup>†</sup>, Takahiro HARA<sup>†</sup>, and Shojiro NISHIO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Dept. of Multimedia Eng., Grad. Sch. of Information Science and Technology, Osaka Univ.

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan

E-mail: †{kosaka.yoshihiro,kanzaki,hara,nishio}@ist.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

近年のセンサデバイスの高性能化およびネットワーク技術の発展に伴い、さまざまなセンサデバイスがネットワークに接続し、それらが取得したデータを活用するユビキタスセンサ環境への期待が高まっている [2]。ユビキタスセンサ環境では、さまざまな組織および個人により、膨大な数のセンサデバイスが設置され、各センサデバイスがセンサデータを蓄積する。これらのセンサデータのうち、自宅付近の気象データや、玄関先や店舗前のカメラ画像など、センサデバイスの設置者が他のユーザーに提供することを許容できるセンサデータを活用することで、詳細な気象予測や渋滞予測、人の居場所検索といったサービスが提供されるものと考えられる。一方、このような環境では、センサデバイスによって取得されたセンサデータが分散して配置されるため、センサデータの管理および検索を集中的に行うことが難しい。そのため、センサデータの管理および検索は、センサデバイスをピアとした P2P 型のネットワークが適している。

ユビキタスセンサ環境において、ピアは、設置者によって設定された周期に基づいて、設置された位置の環境情報を定期的

にセンシングを行うことが一般的であるが、さまざまな組織および個人が独自にピアを設置するため、設置者の意図によって設定されるセンシングの周期がピアごとに異なるものと考えられる。一方、このような環境が普及すると、ピアの位置やデータがセンシングされた時刻などを指定して、データを要求するようなアプリケーションが考えられる。その中でも、「大阪駅付近の 12 時現在の交通情報が欲しい」といった、ある特定の時刻にセンシングされ、かつ特定の領域内におけるデータ収集があげられる。ここで、膨大な数のピアがネットワークに参加する環境では、クエリが指定した領域に位置しないピアや、クエリが指定した時刻でセンシングを行わないピアが多数存在する。既存のオーバーレイネットワークでは、時刻および領域を指定した検索を考慮していないため、ユーザが指定した時刻および領域でセンシングを行っていないピアにもクエリが伝播され、余分な検索トラフィックが発生してしまう可能性がある。

ここで、領域を指定したクエリを対象となるピアへ効率よく伝播するオーバーレイネットワークの構築手法は、これまでにいくつか提案されている [1], [3]。一方で、周期的にセンシングされるセンサデータを想定し、時刻を指定したクエリを考慮したオーバーレイネットワークに関する研究は存在していない。その

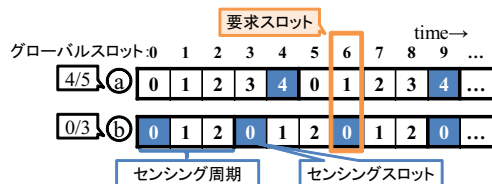


図1 ピアのセンシング例と要求スロット

ため、筆者らは、指定された時刻にセンシングを行うピアへ効率よくクエリを伝播するためのオーバーレイネットワーク構築手法として、PCCS (P2P network Construction method based on Cycle of Sensing) を提案した [4]。PCCS では、各ピアに設定されるセンシングの周期に着目し、同時刻にセンシングを行うピア間に論理リンクを生成することで、指定された時刻にセンシングを行うピアにのみクエリを伝播させる。

本稿では、PCCS を拡張し、センシングを行う時間のみでなく、ピアの位置も考慮することで、時刻および領域を指定するクエリを、対応するピアへ効率よく伝播するためのオーバーレイネットワーク構築手法である PCCSL (P2P network Construction method based on Cycle of Sensing and Location) を提案する。PCCSL では、ピアの位置情報に基づく階層的なネットワークを構築したうえで、各階層において、PCCS に基づくオーバーレイネットワークを構築する。これにより、指定された領域内に位置し、かつ指定された時刻でセンシングを行うピアにのみクエリを伝播させ、検索トラフィックを抑制する。

以下では、2. において、本稿の関連研究および想定環境を説明する。3. において、従来手法である PCCS について述べ、4. において、本稿の提案手法である PCCSL について述べる。5. において、シミュレーション実験の結果を示し、最後に 6. において、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究と想定環境

### 2.1 関連研究

ユビキタスセンサ環境を想定したオーバーレイネットワークに関する研究として、ピアが配置された位置を考慮したものがいくつか行われている [1], [3]。たとえば文献 [3] では、領域全体をエリアと呼ばれる部分領域に分割し、エリア単位でピアをクラスタリングする。これにより、領域を指定したクエリに対し、その領域内に位置するピアへ効果的にクエリを伝播できる。しかし、これらの研究では、各ピアがセンシングを行う時刻を考慮していないため、クエリに時刻が指定される場合、効果的な検索が行えない。

### 2.2 想定環境

本稿では、ネットワーク上に 1 台のゲートウェイを配置し、そのネットワーク上の位置 (アドレス) は、全てのピア、およびユーザにとって既知であるものとする。システム内の時間系は、固定長の時間幅をもつタイムスロット (以下、スロット) によって表現されるものとし、本稿では、システム全体で共通の時間系を表すスロットを、グローバルスロットと定義する。

ピアは、ネットワーク内で一意の識別子が与えられており、自身の位置情報として、二次元座標で表現される情報を保持する。各ピアは、その設置者によってあらかじめ設定された周期

に従ってセンシングを行い、取得した情報を自身の記憶領域に蓄積する。ピアに設定される周期は、上述したスロット単位で表されるものとし、これをセンシング周期と定義する。また、ピアがセンシング周期内でセンシングを行うスロットをセンシングスロットと定義する。さらに本稿では、各ピアに設定されたセンシング周期の最初 (0 番目) のスロットは、グローバルスロット 0 と一致するものとする。図 1 に、ピアがセンシングを行う時刻の例を示す。図において、青色のスロットは、各ピアのセンシングスロットを示し、ピアの横の数字は、左側がセンシングスロット、右側がセンシング周期を示す。

クエリは、ユーザによって、対象となる領域および時刻が指定されるものとする。時刻はグローバルスロットで表されるものとし、これを要求スロットと定義する。また、要求スロットでセンシングを行うピアを、時間的該当ピアと定義する。例えば図 1 では、要求スロットとしてグローバルスロット 6 が指定されており、このスロットでセンシングを行うピア *b* が時間的該当ピアとなる。一方、対象となる領域を検索領域と定義し、検索領域内に位置するピアを、地理的該当ピアと定義する。

## 3. PCCS

本章では、筆者らが文献 [4] において提案したオーバーレイネットワーク構築手法である PCCS について説明する。

### 3.1 ネットワーク構造

PCCS では、各ピアのセンシング周期およびセンシングスロットに着目し、任意のクエリに対して、同時に時間的該当ピアとなるピアのみで構築される部分ネットワークが存在するようなオーバーレイネットワークを構築する。

まず、センシング周期およびセンシングスロットがともに等しいピアは、常に同時にセンシングを行うため、PCCS では、これらのピアで構成されるクラスタを形成する。また、各クラスタにおいて、そのクラスタを代表するクラスタヘッドを 1 台選出する。次に、あるグローバルスロットで同時にセンシングを行う可能性があるクラスタヘッド間に論理リンクを生成する。ここで、あるクラスタのクラスタヘッドは、自身のセンシング周期の約数長の周期が設定されており、最も長い周期が設定されたものと論理リンクを生成するものとする。さらに、素数長のセンシング周期が設定されたクラスタヘッドは、ゲートウェイと論理リンクを生成する。これにより、図 2 のように、ゲートウェイを根とする木構造のオーバーレイネットワークが構築される。PCCS では、この木構造オーバーレイネットワークを CH 木 (Cluster Head Tree) と定義する。CH 木では、あるクラスタヘッドがクエリの要求スロットでセンシングを行う場合、接続している親ノードも必ずセンシングを行う。

### 3.2 ネットワークへの参加

新たにピアが参加する場合、参加するピア (以下、新規ピア) は、新規ピアの識別子と、センシング周期、およびセンシングスロットを含む参加パケットをゲートウェイへ送信する。参加パケットを受信したゲートウェイおよびクラスタヘッドは、新規ピアと同時にセンシングを行うクラスタヘッドを介して参加パケットを伝播し、常に同時にセンシングを行うクラスタヘッドのクラスタへ新規ピアを参加させる。

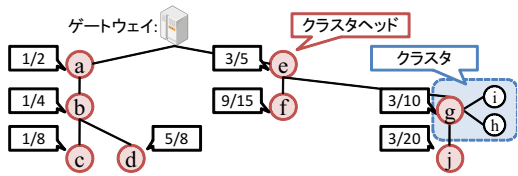


図 2 CH 木 (Cluster Head Tree)

### 3.3 ネットワークからの脱退

ピアが脱退する場合、脱退するピア（以下、脱退ピア）は、自身がメンバピアかクラスタヘッドが確認する。メンバピアである場合は、自身が所属するクラスタから脱退し、処理を終了する。クラスタヘッドである場合は、自身のクラスタに参加しているメンバピアから、自身の代理となる新たなクラスタヘッドを選出する。選出されたメンバピアは、クラスタから脱退したのち、新たなクラスタヘッドとして CH 木に参加する。脱退ピアのクラスタにメンバピアが存在しない場合は、CH 木上における自身の子ノードとの論理リンクを削除し、それらのノードと自身の親ノードを接続させる。

### 3.4 クエリ処理

データを要求するユーザは、ゲートウェイへクエリを送信する。クエリを受信したゲートウェイは、CH 木における子ノードのうち、時間的該当ピアにのみクエリを転送する。クエリを受信したクラスタヘッドは、自身のクラスタ内にクエリをフラッシングした後、ゲートウェイと同様の処理により、CH 木における子ノードにクエリを転送する。これにより、PCCS は、時間的該当ピアのみを介してクエリを効果的に伝播できる。

## 4. PCCSL

本章では本稿で提案する PCCSL について述べる。PCCSL は、時刻および領域を指定するクエリに対し、対応するピアのみに効率よくクエリを伝播する。以下では、時間および位置をともに考慮したオーバーレイネットワークの設計方針について議論したのちに、PCCSL におけるオーバーレイネットワークの構造を述べる。その後、ピアがネットワークに参加および脱退する際の手順とクエリの処理手順について述べる。

### 4.1 設計方針

PCCSL では、クエリに設定された要求スロットおよび検索領域をともに考慮したクエリ伝播を行うためのオーバーレイネットワークを構築する。ここで、ピアの位置情報およびクエリの検索領域を考慮したオーバーレイネットワークとしては、2.1 項で述べたものをはじめとして、いくつか提案されている。PCCSL では、これらのうち、文献 [3] などで提案されている階層的なオーバーレイネットワークを用いる。このオーバーレイネットワークでは、領域全体をエリアと呼ばれる部分領域に分割する。また、レベルと呼ばれる階層を定義し、あるレベルにおける複数のエリアを、1 階層上位のレベルにおいて統合する。この階層的なエリアの情報を用いて、各ピアが、1 階層下位のレベルにおいて検索領域内に位置するピアへのみクエリを伝播することで、クエリの伝播範囲を、地理的該当ピアにのみ絞り込める。

PCCS による CH 木および上述した階層的オーバーレイネットワークを併用し、時間的にも地理的にも該当するピアへクエリ

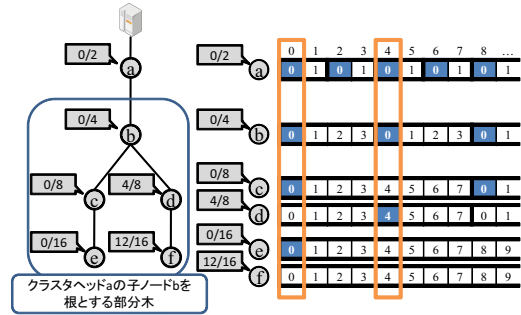


図 3 要求スロットによる時間的該当ピアの変化

を伝播する単純な方法として、要求スロットおよび検索領域のうち、一方のみに該当するピアにクエリの伝播範囲を限定したのちに、その中で他方の要素に該当するピアへクエリを伝播する方法が考えられる。以下では、それぞれの方法について考察したのち、PCCSL で構築するオーバーレイネットワークの設計方針について述べる。

#### (1) 要求スロットのみを先に考慮する場合

領域全体において、PCCS に基づく CH 木を構築し、各クラスタ内においてピアの位置情報に基づく階層的オーバーレイネットワークを構築する。この場合、要求スロットでセンシングを行うクラスタヘッドのみにクエリを伝播したのちに、各クラスタにおいて検索領域内に位置するピアへクエリを伝播できる。ここで、PCCS では、ピアの位置情報を考慮せずに CH 木を構築するため、あるクエリに対し、時間的に該当しているが、地理的に該当していないクラスタヘッドにまでクエリが伝播する可能性がある。

#### (2) 検索領域のみを先に考慮する場合

ピアの位置情報に基づく階層的オーバーレイネットワークを構築し、その最下層となるレベルの各エリア内において、PCCS に基づく CH 木を構築する。この場合、検索領域を含むエリアのみにクエリを伝播したのちに、各エリアにおいて要求スロットでセンシングを行うピアへクエリを伝播できる。ここで、地理的な階層的オーバーレイネットワークを単純に構築した場合、検索領域を含む最下層のエリアまでクエリを伝播する際、検索領域によってクエリの伝播範囲を絞り込む過程で、時間的に該当していないピアにまでクエリが伝播する可能性がある。

以上の議論より、要求スロットまたは検索領域のうち一方の要素のみを考慮してクエリの伝播範囲を限定する場合、伝播範囲を絞り込む際に、クエリに該当しないピアにまでクエリが伝播してしまう可能性がある。PCCSL では、このような無駄なクエリ伝播を抑制するため、一方の要素でクエリの伝播範囲を限定する際、クエリを転送するごとに伝播範囲内に含まれるピア数がどの程度削減されたか、その絞込みの効果を推測し、十分な絞込みができたと判断した時点で他方の要素に基づく絞込みに切り替える。以下では、絞込みの効果を推測する方法について考察する。

まず、要求スロットのみを先に考慮する場合、CH 木上のクラスタヘッドにおいて、絞込みの効果を推測する必要がある。ここで、ある要求スロットに対して同時に時間的該当ピアとなるピア群は、CH 木におけるピアの深さなどに関係なく、要求

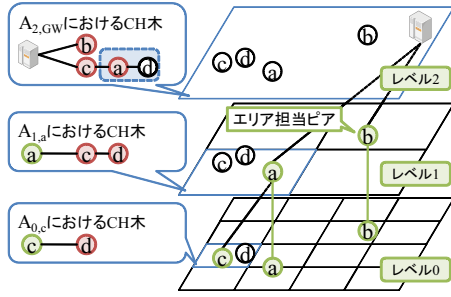


図4 PCCSLにおけるネットワーク例

スロットごとに大きく変化する。これは、クラスタヘッド間の論理リンクが、それらに設定されたセンシング周期に基づいて生成されており、時間軸上におけるスロットの近さに依存しないためである。例えば、図3に示すように、クラスタヘッド  $a$  のCH木における子ノード  $b$  を根とする部分木内において、グローバルスロット0における時間的該当ピアはピア  $b, c, e$ 、グローバルスロット4における時間的該当ピアはピア  $b, d$  といったように、スロットごとに時間的該当ピアとなるピア群が大きく変化する。そのため、クエリを受信したクラスタヘッドは、CH木における子ノードの情報から、その子ノードを根とする部分木内に存在する時間的該当ピア数を推測できない。

一方、検索領域のみを先に考慮する場合、ある検索領域に対し、地理的に近い位置に存在するピア群は、同時に地理的該当ピアとなる可能性が高い。そのため、各レベルにおけるエリアごとに、どれだけピアが地理的該当ピアとなるか、検索領域の面積などにに基づき容易に推測できる。

以上より、PCCSLでは、検索領域のみを先に考慮する方法を元にし、クエリ伝播の途中でPCCSに基づくクエリ伝播に切り替えるオーバーレイネットワークを構築する。

#### 4.2 ネットワーク構造

PCCSLでは、各レベルにおけるエリア内に位置するピアのうち、そのエリアを代表するエリア担当ピアを1台選出する。最上層であるレベル  $(N_L - 1)$  のエリア担当ピアは、ゲートウェイが兼ねるものとする。ここで、エリア担当ピアが担当するエリアを担当エリアと定義し、エリア担当ピア  $p$  のレベル  $N$  における担当エリアを  $A_{N,p}$  と定義する。また、エリア担当ピアは、レベル  $N$  のエリアを担当する場合、下位のレベル（レベル  $[0, N - 1]$ ）において自身が位置するエリアも同時に担当する。さらに、エリア担当ピアが担当するエリアに位置するエリア担当ピア以外のピアを、そのエリアのエリア所属ピアと呼ぶ。

あるレベルにおけるエリア担当ピアは、1階層下位のレベルにおいて、自身の担当エリアに含まれる全てのエリアを担当するピアと論理リンクを生成する。これにより、ゲートウェイを根とし、エリア担当ピアによって構成される木構造のオーバーレイネットワークが構築される。本稿では、この木構造オーバーレイネットワークをAM木 (Area Manager Tree) と定義する。

さらに、PCCSLでは、各レベルにおけるエリアごとに、エリア担当ピアを根とし、そのエリア内に位置するピアで構成されるCH木を構築する。ここで、エリア担当ピアは、自身が担当するエリアのレベルより下位のレベルで構築されるCH木に

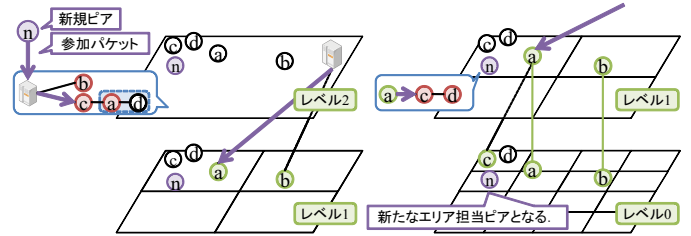


図5 ネットワークへの参加例 ( $N_L=3$ , 新規ピア:  $n$ )

参加しない。これにより、4.6節で述べる通り、クエリの重複受信や、冗長な論理リンクの生成を抑制する。PCCSLによって構築されるネットワークの例を図4に示す。図4では、レベル0において16個のエリアが存在し、四つのエリアが一つ上位のレベルで統合されている。

#### 4.3 ネットワークへの参加

PCCSと同様に、新規ピアは参加パケットをゲートウェイに送信する。ここで、参加パケットには、PCCSにおける参加パケットに含まれる情報に加え、新規ピアの位置情報を含む。参加パケットを受信したゲートウェイは、以下の手順に従って参加処理を行う。

- (1) PCCSにおける参加処理に基づき、新規ピアをレベル  $(N_L - 1)$  における自身の担当エリアのCH木へ参加させる。
- (2) AM木における自身の子ノードの担当エリアを参照し、新規ピアの位置を含むエリアを担当する子ノードが存在するか検索する。そのような子ノードが存在する場合は、その子ノードへ参加パケットを転送する。
- (3) そのような子ノードが存在しない場合は、新規ピアを新たなエリア担当ピアとし、AM木における子ノードとして、自身に接続させる。新たにエリア担当ピアとなった新規ピアは、レベル  $[0, N_L - 2]$  において、自身が位置するエリアのエリア担当ピアとなる。

参加パケットを受信したレベル  $N$  におけるエリアを担当するエリア担当ピアは、以下の手順に従って参加処理を行う。

- (1) ゲートウェイと同様、新規ピアを現在のレベル  $N$  における自身の担当エリアのCH木へ参加させる。
- (2) AM木における自身の子ノードの担当エリアを参照し、新規ピアの位置を含むエリアを担当する子ノードが存在するか検索する。そのような子ノードが存在する場合は、その子ノードへ参加パケットを転送する。
- (3) そのような子ノードが存在しない場合は、新規ピアを新たなエリア担当ピアとし、AM木における子ノードとして、自身に接続させる。新たにエリア担当ピアとなった新規ピアは、レベル  $[0, N - 1]$  において、自身が位置するエリアのエリア担当ピアとなる。

ここで、 $N = 0$  であった場合、参加パケットを受信したエリア担当ピアは、AM木の葉ノードであるため、上記の手順(2)、(3)は行わない。

この動作例を図5に示す。まず、新規ピア  $n$  からの参加パケットを受信したゲートウェイは、PCCSに従い、自身の担当エリアにおけるCH木(レベル2)へ新規ピアを参加させる。

また、AM 木における子ノードのうち、新規ピア  $n$  の位置を含むエリアを担当しているピア  $a$  に、参加パケットを転送する。参加パケットを受信したピア  $a$  は、ゲートウェイと同様の処理を行い、自身の担当エリアにおける CH 木（レベル 1）に新規ピアを参加させる。ピア  $a$  は、AM 木における子ノードのうち、ピア  $n$  の位置を含むエリアを担当しているピアが存在しないため、ピア  $n$  を AM 木の子ノードとして自身に直接接続させる。

#### 4.4 ネットワークからの脱退

PCCSL では、各ピアは、少なくとも一つのレベルにおいて、エリア所属ピアとして、そのエリアに構築された CH 木に参加している。そのため、脱退ピアは、PCCS と同様の手順により、まずエリア所属ピアとして参加しているすべての CH 木から脱退処理を行う。

また、脱退ピアがエリア担当ピアとなっている場合、自身の担当するいずれかのエリアにおいてエリア所属ピアが存在するか確認する。自身の担当するすべてのエリアにおいて、CH 木上で隣接するクラスタヘッドが存在しない場合、脱退ピアは、AM 木における親ノードとの論理リンクを削除し、脱退処理を終了する。

一方、隣接するクラスタヘッドが存在する場合は、そのなかで最も下位のレベルにおいて隣接しているクラスタヘッドのうち 1 台を選出し、そのクラスタヘッドへ、自身の識別子を含む交代ピア検索パケットを送信する。交代ピア検索パケットを受信したクラスタヘッドは、自身のクラスタ内に存在するメンバピアのうち 1 台を選出し、交代ピア検索パケットを送信する。交代ピア検索パケットを受信したメンバピアは、自身の識別子を脱退ピアへ返送する。クラスタ内にメンバピアが存在しない場合は、クラスタヘッドは、CH 木における子ノードのうち 1 台を選出し、交代ピア検索パケットを転送する。この動作は、いずれかのクラスタにおいて交代ピア検索パケットがメンバピアに転送されるか、CH 木の葉ノードに交代ピア検索パケットが到達するまで繰り返す。CH 木における葉ノードが交代ピア検索パケットを受信し、自身のクラスタにメンバピアが存在しない場合は、葉ノードであるクラスタヘッド自身が交代ピアとなり、自身の識別子を脱退ピアへ返信する。

交代ピアの識別子を受信した脱退ピアは、AM 木および CH 木において自身と隣接する全てのピアに対し、交代ピアの情報を含むリンク張替えパケットを送信する。リンク張替えパケットを受信したピアは、脱退ピアとの論理リンクを削除し、交代ピアと新たな論理リンクを生成する。新たにエリア担当ピアとなった交代ピアは、脱退ピアが担当していたすべてのレベルにおいて自身が位置するエリアを担当する。また、PCCS における脱退処理に従い、自身がエリア担当ピアとなったすべてのレベルにおける CH 木から脱退する。

上記の手順の例を図 6 に示す。この例では、レベル 1 および 0 においてエリア担当ピアとなっているピア  $a$  を脱退ピアとする。まず、脱退ピア  $a$  は、PCCS における脱退処理に従い、エリア  $(0,0)_2$  における CH 木から脱退する。次に、自身が担当するエリアにおいて隣接しているクラスタヘッド  $c, d$  のうち、最も下位のレベルにおいて隣接しているピア  $d$  へ、交代ピア検索

パケットを送信する。交代ピア検索パケットを受信したピア  $d$  は、自身のクラスタにメンバピアが存在しないため、受信したパケットを子ノードであるピア  $e$  へ転送する。パケットを受信したピア  $e$  は、自身が CH 木の葉ノードであり、かつ自身のクラスタにメンバピアが存在しないため、自身が交代ピアとなる。脱退ピア  $a$  は、隣接する全てのピアへ、リンク張替えパケットを送信する。最後に、交代ピア  $e$  は、脱退ピア  $a$  が担当したすべてのレベルにおいて、自身が位置するエリアを担当し、それらのエリアにおける CH 木から脱退する。

#### 4.5 クエリの処理

4.1 節で述べたとおり、PCCSL では、AM 木を用いて検索領域に基づくクエリの転送を行い、クエリの地理的な伝播範囲を十分に絞り込んだのちに、CH 木を用いて時間的該当ピアへクエリを転送する。ここで、伝播範囲を地理的に十分に絞り込めたかどうかを判断するために、クエリを受信したエリア担当ピアは、自身の担当エリアと検索領域との重複面積から重複度  $D$  を算出する。ここで、クエリを受信したエリア担当ピアを  $m$ 、レベルを  $N$  とし、検索領域を  $A_S$  とした場合、ピア  $m$  の担当エリア  $A_{N,m}$  における重複度  $D_{N,m}$  は次式で算出される。

$$D_{N,m} = \frac{|A_S \cap A_{N,m}|}{|A_{N,m}|} \quad (1)$$

また、システムが与える閾値  $T$  を定義し、重複度が閾値  $T$  以上である場合、自身の担当エリア内に位置するピアの多くが検索領域内に位置すると判断し、AM 木を用いた地理的な絞り込みを停止し、そのエリアにおける CH 木を対象としたクエリ伝播に切り替える。そうでない場合は、クエリ伝播先の切替えを行わず、AM 木を用いた絞り込みを継続する。以下に、クエリの処理の手順を示す。

まず、ユーザは、PCCS と同様、ゲートウェイへクエリを送信する。クエリを受信したゲートウェイは、以下の手順に従って、処理を行う。

(1) 式 (1) に従って、重複度  $D_{N_L-1,GW}$  を算出し、 $D_{N_L-1,GW} \geq T$  の場合、レベル  $(N_L - 1)$  における CH 木を対象に、PCCS に基づくクエリ処理を行う。

(2)  $D_{N_L-1,GW} < T$  の場合、AM 木における子ノードのうち、担当エリアと検索領域が重複するものにクエリを転送する。

クエリを受信したレベル  $N$  のエリアを担当するエリア担当ピア  $m$  は、以下の手順に従って、処理を行う。

(1) 式 (1) に従って、自身の担当エリアにおける重複度  $D_{N,m}$  を算出し、 $D_{N,m} \geq T$  の場合、レベル  $N$  における CH 木を対象に、PCCS に基づくクエリ処理を行う。

(2)  $D_{N,m} < T$  の場合、AM 木における子ノードのうち、担当エリアと検索領域が重複するものにクエリを転送する。ここで、 $N = 0$  である場合、エリア担当ピアは、AM 木の葉ノードであるため、重複度に関わらず、自身の担当エリアにおける CH 木を対象に、PCCS に基づくクエリ処理を行う。

#### 4.6 考 察

PCCSL では、レベル  $N$  におけるエリアを担当するピアは、レベル  $[0, N-1]$  におけるエリアも担当する。これにより、クエ

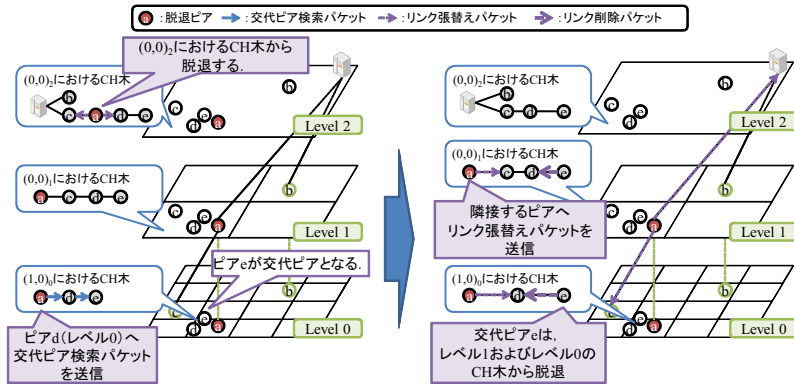


図6 ネットワークからの脱退例

りを受信したエリア担当ピアは、AM木における子ノードへのクエリ転送を行う場合、下位のレベルにおいて自身が担当するエリアに対しては、他のピアへクエリを伝播させる必要がない。

また、PCCSLでは、レベル $N$ におけるエリアを担当するピアは、レベル $[0, N]$ におけるエリアで構築されるCH木に参加しない。これにより、AM木上でクエリを受信したエリア担当ピアが、下位のレベルにおけるエリアで構築されているCH木において、同じクエリを重複して受信することを防ぐ。

### 5. 性能評価

本章では、提案手法の有効性を検証するために行ったシミュレーション実験の結果を示す。シミュレーション実験では、以下に示す手法の性能を比較した。

**PCCSL:** 本稿の提案手法である。CH木における各クラスタ内のネットワークはスター型とし、メンバピアは、自身が所属するクラスタのクラスタヘッドと直接接続するものとした。

**PCCS:** 筆者らが文献[4]において提案した手法である。各クラスタ内のネットワークはスター型とした。

**PCL (P2P network Construction method based on Location):** ピアの地理的な位置および検索領域のみを考慮し、階層的オーバーレイを構築する手法である。具体的には、PCCSLにおけるAM木のみ構築し、レベル0の各エリアにおいて、エリア担当ピアに他のピアが直接接続するスター型のネットワークを構築する。ピアが新たに参加する際の処理は、各エリアにCH木を構築しない以外はPCCSLと同様である。また、レベル0のエリアを担当するピアが参加パケットを受信した場合、エリア担当ピアは、新規ピアと自身との間に論理リンクを生成する。一方、エリア担当ピアが脱退する場合、AM木の葉ノードまで交代ピア検索パケットを転送する。交代ピア検索パケットを受信した葉ノードは、担当エリア内のエリア所属ピアのうち1台へ交代ピア検索パケットを送信する。エリア所属ピアが存在しない場合は、自身が交代ピアとなる。クエリが発行された場合、ゲートウェイおよびエリア担当ピアは、AM木における子ノードのうち、担当エリアと検索領域が重複するものにクエリを転送する動作を、レベル0のエリア担当ピアにクエリが到達するまで繰り返す。レベル0のエリアを担当するピアは、自身の担当エリアにおける、すべてのエリア所属ピアへクエリを転送する。

**Extended-PCCS:** 4.1節で述べた単純な手法のうち、要求

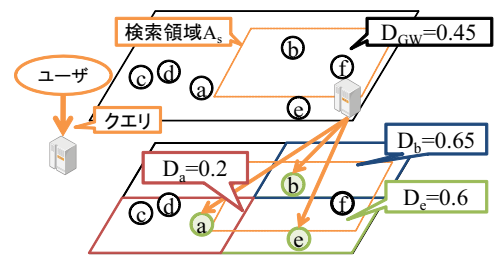


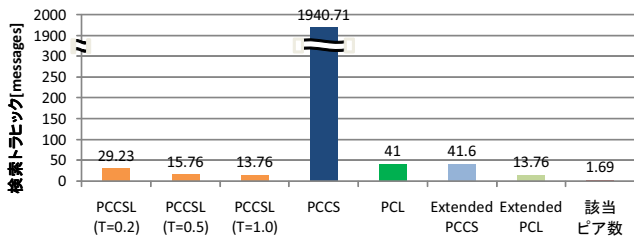
図7 クエリ伝播の例

スロットのみを先に考慮するものである。具体的には、PCCSに基づくCH木を構築し、各クラスタ内においてAM木を構築する。各クラスタヘッドは、レベル $(N_L - 1)$ におけるエリアを担当するエリア担当ピアとして振る舞う。また、各クラスタ内のAM木におけるレベル0の各エリアにおいて、エリア担当ピアが他のピアと直接接続するスター型のネットワークを構築する。ピアが新たにネットワークに参加する場合、まず、PCCSにおける参加処理に基づき、CH木上で参加パケットを転送する。新規ピアと常時一致の関係にあるクラスタヘッドが参加パケットを受信した場合、PCLにおける参加処理に基づき、自身のクラスタ内におけるAM木へ新規ピアを参加させる。一方、クラスタヘッドが脱退する際、クラスタ内にAM木が構築されていないならば、PCCSにおける脱退処理を行う。AM木が構築されている場合は、PCLにおける脱退処理と同様に、交代ピア検索パケットを伝播し、交代ピアを選出する。クエリが発行された場合、まず、PCCSにおけるクエリ処理に基づき、時間的該当ピアとなるすべてのクラスタヘッドへクエリを伝播する。クエリを受信したクラスタヘッドは、PCLにおけるクエリ処理に基づき、自身のクラスタ内におけるAM木へクエリを伝播する。

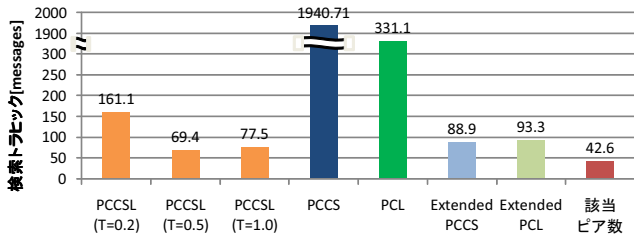
**Extended-PCL:** 4.1節で述べた単純な手法のうち、検索領域のみを先に考慮するものである。具体的には、PCCSLにおけるAM木を構築し、レベル0の各エリア内において、エリア担当ピアを根とするCH木を構築する。ピアの参加および脱退に関しては、レベル0のエリア以外でCH木を構築、維持しない点以外は、PCCSLと同様の処理を行う。また、クエリが発行された場合、まず、PCLにおけるクエリ処理に基づき、レベル0のエリアを担当するピアは、PCCSにおけるクエリ処理に基づき、エリア内のCH木へクエリを伝播する。

#### 5.1 シミュレーション環境

シミュレーション実験では、 $10,000[m] \times 10,000[m]$ の二次元平面上にピアを設置した。各ピアの位置は、領域内からランダムに設定した。タイムスロットあたりの時間は $30[sec]$ とし、各ピアに設定するセンシング周期は、現在運用されているサービス[5],[6]をもとに、実環境において多く設定されている周期である $\{2, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 120, 240, 360, 720, 1440\}[slot]$ からランダムに設定した。各ピアに設定されるセン



(a) 300[m]×300[m]



(b) 1,500[m]×1,500[m]

図 8 検索トラヒック

シングスロットは、設定されたセンシング周期内からランダムに設定した。PCCS 以外の手法におけるエリアの分割は、あるレベルのエリアを四つの正方形領域に等分割したものを 1 階層下位のエリアとするものとし、レベル 0 におけるエリアの分割数を 1,024 とした。すなわち、階層数  $N_L$  は 6 となる。

## 5.2 検索トラヒック

まず、検索トラヒックとして、1,000 回の検索を行い、検索 1 回あたりにネットワーク内を伝播したクエリの総数の平均を比較した。クエリが指定する要求スロットは、 $[0, 10,000]$  の範囲内でランダムに設定した。クエリが指定する検索領域は正方形領域で表されるものとし、その位置は領域全体からランダムに設定した。また、検索領域の大きさは、 $300[m] \times 300[m]$  と、 $1,500[m] \times 1,500[m]$  の 2 種類とした。PCCSL における閾値  $T$  は、 $\{0.2, 0.5, 1.0\}$  の 3 種類の場合を比較した。

評価結果を図 8 に示す。この図では、該当ピア数として、検索 1 回あたりに時間的かつ地理的に該当するピア数の平均値も示している。これらのピアには必ずクエリを伝播させる必要があるため、この値が検索トラヒックの下限值となる。

図 8(a) の結果より、PCCS における検索トラヒックが他の手法と比較して非常に大きいことがわかる。これは、ピアの位置に関わらず、領域全体に位置するすべての時間的該当ピアにクエリを伝播するためである。Extended-PCCS では、クラスター内で AM 木を用いたクエリ伝播を行うことにより、PCCS と比較して検索トラヒックを抑制している。しかし、時間的該当ピアとなるすべてのクラスターヘッドにクエリを伝播するため、他の手法と比較すると検索トラヒックが大きくなる。一方、PCL および Extended-PCL では、まず、AM 木を用いてクエリの伝播範囲を地理的に絞り込むため、検索領域が全領域に対して小さい場合、検索トラヒックを効果的に削減できる。特に Extended-PCL では、レベル 0 の葉ノードまでクエリが伝播されたのちに、エリア所属ピアによって構成される CH 木を用いて時間的該当ピアにのみクエリを伝播するため、検索トラヒックをさらに削減できる。PCCSL では、他の手法と比較して検

索トラヒックを小さく抑えられており、特に閾値  $T$  が 1.0 の場合にもっとも小さい値を示している。一方、閾値  $T$  が小さい場合、検索トラヒックが増大し、Extended-PCL より大きくなるのがわかる。閾値  $T$  が小さい場合、上位のレベルにおいて CH 木へのクエリ伝播の切替えが行われやすくなる。これにより、検索領域との重複度が比較的小さく、検索領域内に位置しないエリア所属ピアが多数存在する場合においても、エリア内の時間的該当ピアすべてにクエリを伝播してしまう。

一方、図 8(b) の結果より、検索領域が大きい場合、PCL および Extended-PCL における検索トラヒックが、図 8(a) の場合に比べて大きくなるのがわかる。これは、検索領域の拡大により地理的該当ピアが増大し、多くのエリアヘクエリが伝播されたためである。Extended-PCCS における検索トラヒックも、図 8(a) と比較して大きくなるが、その増分は PCL および Extended-PCL と比較して小さい。これは、要求スロットに基づく検索対象の絞込みを先に行うことで、検索領域の拡大による影響が時間的該当ピアによって構成されるクラスター内のみに限定されるためである。なお、PCCS では、すべての時間的該当ピアにクエリを伝播するため、検索トラヒックは図 8(a) と等しくなる。PCCSL では、閾値が小さい場合を除き、検索トラヒックが他の手法より小さく抑えられている。特に、図 8(a) の結果と異なり、閾値  $T$  が 0.5 のときに、検索トラヒックが最小となるのがわかる。これは、検索領域が大きい場合、閾値  $T$  を過度に大きく設定すると、下位のレベルにまで AM 木を用いたクエリ伝播を継続してしまい、時間的に該当しないエリア担当ピアへの無駄なクエリ伝播が増加してしまうためである。

## 5.3 参加トラヒック

次に、参加トラヒックとして、ピア数が 10,000 になるまで 1 ピアずつネットワークに参加させ、1 ピアの参加あたりにネットワーク内を伝播したメッセージの総数を比較した。

評価結果を図 9 に示す。図のプロットは、過去 100 台ピアが参加した際に発生した 1 台あたりの参加トラヒックを示している。結果より、PCCSL における参加トラヒックは、他の手法と比較して非常に大きくなるのがわかる。これは、複数のレベルにおいて新規ピアを CH 木に参加させる必要があるためである。

PCCSL における参加トラヒックを詳細に確認するため、図 9 の結果に対し、AM 木および各レベルの CH 木において発生したトラヒックの内訳を調査した。結果を図 10 に示す。結果より、各レベルの CH 木においてトラヒックが発生しており、特に上位のレベルにおけるトラヒックが大きいことが分かる。これは、上位のレベルほどエリアが大きく、多くのエリア所属ピアにより CH 木が構築されるためである。

## 5.4 脱退トラヒック

最後に、脱退トラヒックとして、ピア数が 10,000 のネットワークにおいて、ピア数が 5,000 になるまで、ランダムに 1 ピアずつネットワークから脱退させ、1 ピアの脱退あたりにネットワーク内を伝播したメッセージの総数を比較した。

評価結果を図 11 に示す。図のプロットは、過去 100 台ピアが脱退した際に発生した 1 台あたりの脱退トラヒックを示してい

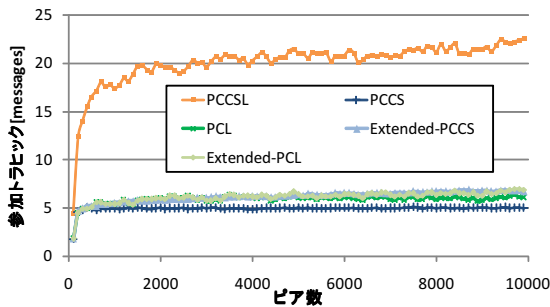


図 9 参加トラヒック

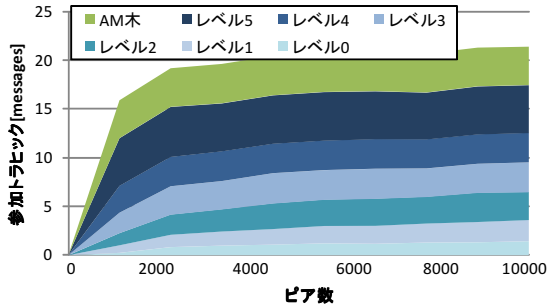


図 10 PCCSL における参加トラヒックの内訳

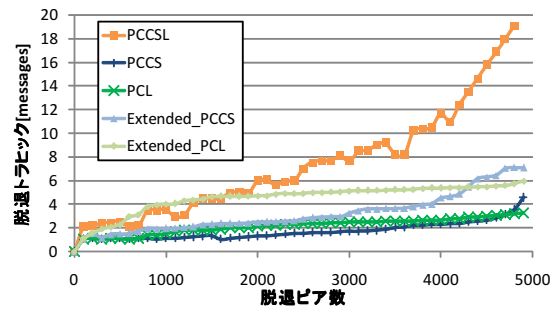


図 11 脱退トラヒック

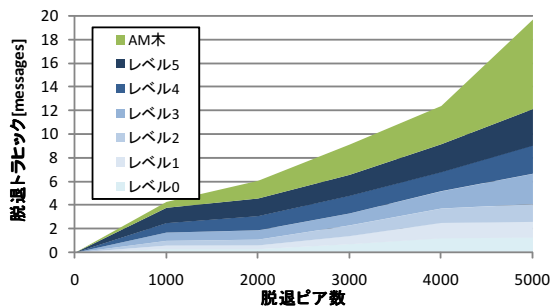


図 12 PCCSL における脱退トラヒックの内訳

る．結果より，脱退ピアの増加に伴い，脱退トラヒックが増大することがわかる．これは，ピア数が減少することで，クラスタヘッドやエリア担当ピアの割合が相対的に増加し，これらのピアが脱退ピアとなる割合も増加するためである．これらのピアが脱退する場合，CH 木や AM 木の再構築のために多くのパケット交換が必要となり，メンバピアやエリア所属ピアが脱退する場合と比較して，トラヒックが大きくなる．特に PCCSL では，脱退ピア数の増加に伴う脱退トラヒックの増加が大きい．これは，PCCSL において複数のエリアにおいて CH 木が構築されており，クラスタヘッドとして振る舞うピアの数が他の手法より大きくなるためである．

PCCSL における脱退トラヒックを詳細に確認するため，図 11 の結果に対し，AM 木および各レベルの CH 木において発生した脱退トラヒックの内訳を調査した．結果を図 12 に示す．結果より，参加トラヒックと同様，各レベルの CH 木において脱退トラヒックが発生しており，特に上位のレベルにおける脱退トラヒックが大きいことがわかる．また，ピア数が減少するにつれて，AM 木において発生する脱退トラヒックの割合が大きくなる．これは，ピア数の減少にともない，エリア担当ピアが脱退する割合が相対的に大きくなり，交代ピア検索パケットなどが伝播されているためである．

### 5.5 考察

5.2 節で述べたとおり，PCCSL において，検索領域の大きさによって，検索トラヒックが最小となる閾値  $T$  が変化することがわかった．そのため，クエリが指定する検索領域の大きさに応じて，適切な閾値  $T$  を設定する必要がある．

また，5.3 節および 5.4 節で述べたとおり，PCCSL における参加トラヒックおよび脱退トラヒックが，他の手法と比較して大きくなる．そのため，クエリが発行される頻度に対し，ピアの参加や脱退が発生する頻度が大きくなる環境では，PCCSL においてネットワーク内を伝播するトラヒッ

クの総量が，他の手法より大きくなるものと考えられる．

## 6. おわりに

本稿では，ユビキタスセンサ環境において，時刻および領域を指定するクエリに対し，所望のセンサデータを効果的に取得できるオーバーレイネットワーク構築手法である PCCSL を提案した．さらに本稿では，シミュレーション実験によって評価を行った．結果より，PCCSL によって，他の手法と比較して検索トラヒックを削減できることを確認した．一方で，ピアの参加および脱退においては，他の手法と比較してトラヒックが増大することを確認した．

今後は，検索領域の大きさに応じて，検索トラヒックが最小となるような適切な閾値  $T$  を動的に設定する手法について検討する予定である．また，ネットワークの維持にかかるトラヒックを抑制する手法の拡張についても検討する．

謝辞 本研究の一部は，文部科学省科学研究費補助金・特定領域研究 (18049050) の研究助成によるものである．ここに記して謝意を表す．

### 文献

- [1] K. Aleksandra, L. Nicolas, S. Ralf, "Globase.KOM: A P2P overlay for fully retrievable location-based search," *Proc. IEEE P2P 2007*, pp. 87–96, 2007.
- [2] J. Hightower and G. Borriello, "Location systems for ubiquitous computing," *Proc. IEEE Computer 2001*, Vol. 34, No. 8, pp. 57–66, 2001.
- [3] Y. Kaneko, K. Harumoto, S. Fukumura, S. Shimojo, and S. Nishio, "A location-based Peer-to-Peer network for context-aware services in a ubiquitous environment," *Proc. Int'l Symposium on Applications and the Internet Workshops*, pp. 208–211, 2005.
- [4] 小坂佳弘, 神崎映光, 原 隆浩, 西尾章治郎, "ユビキタスセンサ環境におけるセンシング周期に基づく P2P ネットワーク," 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 9, pp. 1892–1904, 2010.
- [5] 東京都環境科学研究所, <<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/index.html>>.
- [6] ワイヤレスウェザーステーション, <<http://www.tech-jam.com/items/KN3142110.phtml>>.