

# ボロノイ領域を均一化するドロネーオーバーレイネットワークの階層化手法

小西 佑治<sup>†</sup> 寺西 裕一<sup>†\*</sup> 春本 要<sup>††</sup> 竹内 亨<sup>†</sup> 下條 真司<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 <sup>††</sup> 大阪大学大学院工学研究科 \* 独立行政法人情報通信研究機構

## 概要

ドロネーオーバーレイネットワークはリンク構造にドロネー三角形分割を利用したオーバーレイネットワークである。広域にわたるセンサ情報を収集するためにドロネーオーバーレイネットワークをセンサネットワークに適用する場合、地理的に近いセンサの観測値は類似することが多く、それら全てのセンサ情報を収集することは冗長である。そこで本稿では、収集対象とするセンサを間引き一定距離間隔でセンサ情報を高速に収集できるように、各ピアの保持する情報からピアの分布密度を推測し、ボロノイ領域を均一化するドロネーオーバーレイネットワークの階層化手法を提案する。提案手法をシミュレーションにより評価し、ピア分布の疎密に関わらず各ピアのボロノイ領域を均一化したドロネーオーバーレイネットワークの階層化が行えることを確認した。

## A Technique to Construct Hierarchical Delaunay Overlay Network with Averaging Voronoi Area

Yuji Konishi<sup>†</sup>, Yuuichi Teranishi<sup>†\*</sup>, Kaname Harumoto<sup>††</sup>, Susumu Takeuchi<sup>†</sup>,  
Shinji Shimojo<sup>††</sup>, Shojiro Nishio<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>††</sup> Graduate School of Engineering, Osaka University

\* National Institute of Information and Communications Technology

## Abstract

A Delaunay overlay network is an overlay network which has Delaunay diagram topology. In this research, we assume to apply Delaunay overlay network to construct a sensor network using sensor nodes distributed in the wide area. While collecting sensing data to grasp the overview of the observed values in the sensor network, redundant sensing data will be collected when the sensors are located densely since the adjacent sensors tend to have similar values. In this paper, we propose a technique to construct hierarchical Delaunay overlay network with averaging Voronoi area by estimating a density of peers. Our proposal adjusts a peer density of high level networks and users can collect sensing data with a constant density. The simulation result confirms its effectiveness.

## 1 はじめに

近年ブロードバンド常時接続環境が普及し、生活の隅々にまで情報通信が溶け込んで「いつでも、どこでも、何でも、誰とでも」ネットワークにつながるユビキタス環境への関心が高まり、様々な研究開発が行なわれてきている。ユビキタス環境では、様々な情報発信元がネットワークでつながることにより、遠隔地の情報や広範囲にわたる情報を自由に取得することが可能となる。そのような情報発信元のひとつとしてセンサが挙げられる。例えば、Live E! [1]では個人や組織が自律的に設置運営するデジタル百葉箱をネットワークにより接続し、従来以上の密度と精度、リアルタイム性のある情報を提供しようとしている。このように、ネットワークを通じて様々な場所に設置されたセンサ

からデータを収集できれば、これまでは得られなかった粒度で情報を利用可能となる。

しかし、このような環境ではネットワークに接続されるセンサは膨大な数となることが考えられ、頻繁に更新されるセンサデータをサーバに集約して管理することは困難であると考えられる。そこで本研究では、センサ、もしくはセンサ機器が接続されたノード（ピア）を相互接続し、協調してデータの共有や検索を行えるP2Pアーキテクチャによってセンサ情報を分散管理する。これにより、負荷集中やリアルタイム性の欠如の問題を解決し、システム構築を容易とすることができると考えられる。

このような環境におけるセンサネットワーク活用の一例として、広域にわたる観測値情報を得ることで観

測値の分布の全体像を把握するということが考えられる。特定の地点の情報を得る場合と異なり、広域にわたる観測値を得る場合、対象とする領域内には膨大なピアが存在する。しかし、地理的に近い観測値は類似する可能性が高いため、すべての対象ピアからデータを収集すると類似したデータを多数含む膨大なデータを扱わなければならない。そこで、地理的に近い類似した冗長なデータを削減するために、収集対象となるピアを間引くことを考える。

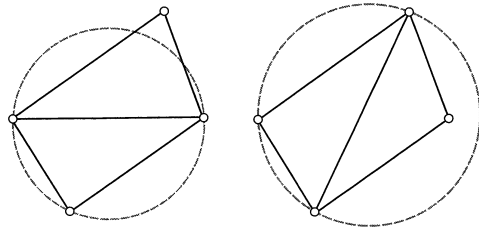
単純にすべてのピアから等確率でピアを間引くと、間引く前のピア分布の疎密の傾向が維持されたままとなってしまう。したがって、ピア分布が密な領域ではピアを間引いても冗長なセンサ情報が得られてしまい、逆にピア分布が疎な領域ではピアを間引くことによって必要な位置からセンサ情報が得られなくなってしまう可能性がある。よって、ピアの間引き方はピアの分布と必要とするセンサ情報の地理的密度に応じて変える必要がある。このとき、P2P ネットワークでは広域にわたるピアの分布状況を各ピアが把握することは困難であるため、各ピアの隣接ピアから得られる情報により、適切にピアの間引き方を決定できることが望ましい。

本研究では地理的探索のためのオーバレイネットワークのひとつであるドロネーオーバレイネットワークを想定し、各ピアのボロノイ領域を均一化することで、指定したピアの分布密度以上にピアが密に分布しない上位ドロネーネットワークを構築する階層化ドロネーオーバレイネットワーク構成手法を提案する。

## 2 階層化ドロネーオーバレイネットワーク

### 2.1 ドロネーオーバレイネットワーク

まず、本研究において前提とするドロネーオーバレイネットワークについて説明する。ドロネーオーバレイネットワークはリンク構造が計算幾何学のドロネー三角形分割となるオーバレイネットワークである[2, 3]。ドロネー三角形分割とは平面上に分布している点群に対して、図1に示す条件を満たすよう点同士を結び、平面を三角形分割するものである。条件を満たす場合とは、図1(a)のように任意の3点を通る三角形の外接円内に他の点が存在しないように点を結ぶ場合である。逆に、図1(b)のように点を結んだ場合、これはドロネー三角形分割の条件を満たさない。ドロネー三角形分割の特徴としては、点群の分布や数によらず各点の次数が平均6になることや、結ばれている点は他の点よりも近傍に存在することなどが挙げられる。また、平面上の任意の点を最も近い母点に属する領域として分割するボロノイ図と双対な関係にある。図2にドロネー三角形分割とボロノイ図を示す。ここで、実線はドロネー辺、破線はボロノイ境界を表して



(a) 条件を満たす場合 (b) 条件を満たさない場合

図1 ドロネー三角形分割の条件

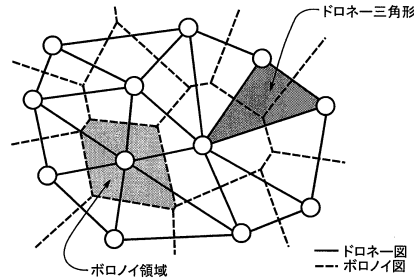


図2 ドロネー三角形分割とボロノイ図

いる。

ドロネーオーバレイネットワークでは、ドロネー三角形分割における点がピア、ドロネー辺がピア間を結ぶオーバレイネットワーク上のリンクにあたる。検索は目的地により近いピアへと転送されるマルチホップ通信により行われる。また、範囲検索にも対応可能である。ドロネーオーバレイネットワークはドロネー三角形分割の特徴を維持するため、ネットワーク全体のピア数によらず各ピアの次数が平均6以下となる。また、あるピアに対してリンクしているピアは他のピアよりも近いため、近隣ピア同士の連携が容易であるという特徴を持つ。これらの特徴は、ドロネーオーバレイネットワークをセンサネットワークに適用する場合に有用であると考えられている。

### 2.2 ドロネーオーバレイネットワークの階層化時の問題

ドロネーオーバレイネットワークにおいて、ピアを間引いた上位ネットワークを構築すると、各ピアが平均6のショートカットリンクを保持できる。したがって、検索範囲が広域な場合に素早くセンサ情報を取得できる。ピアを間引く場合に、すべてのピアを等確率で間引くと、図3のように間引く前のピア分布の傾向が保持される。したがって、間引いた後の上位ネットワークでは間引く前に密だった箇所は冗長なセンサ情報を十分に削減できず、間引く前に疎だった箇所は上位ネットワークにピアが存在しないためセンサ情報

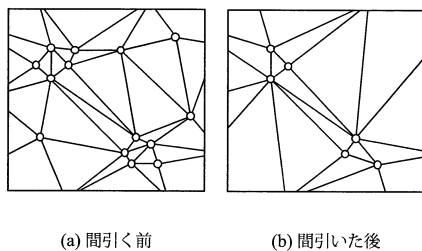


図3 ピアを等確率に間引いたドロネーオーバーレイネットワーク

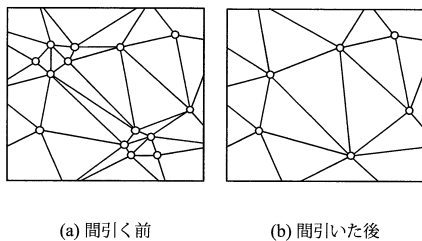


図4 本研究の目指すオーバーレイネットワーク

を取得できなくなってしまう。そこで、図4に示すように、下位ドロネーネットワークのピア分布の偏りを解消し、指定されたピアの分布密度を満たす上位ドロネーネットワークを構築することで、冗長なセンサ情報の取得を抑え、かつ検索範囲全体から一様にセンサ情報を取得可能とすることを旨とする。

ドロネーオーバーレイネットワークの階層化やピアのクラスタリングを行っている研究には次のようなものがある。文献[4]はSkip Graphs[5]を用いて階層化を行い、検索に要するホップ数を削減している。文献[6]はネットワーク仮想環境においてピアの移動により生じるネットワーク維持コストをピアの分布密度から予測し、階層的にクラスタリングすることで維持コストの削減を行っている。しかし、前者はピアの分布密度は考慮されていないため、冗長なピアの削減が十分に行えない。また、後者はピアの分布密度を推測するために2ホップ先のピアの情報を取得する必要がある。

### 3 ボロノイ領域を均一化するドロネーオーバーレイネットワークの階層化手法

本研究では、ピアの分布に疎密があるドロネーオーバーレイネットワークを階層化する場合に、指定した密度よりもピアが密に分布しない上位ネットワークを構築する。このとき、各ピアのボロノイ領域の面積を指標として確率的に上位ネットワークに参加するピアを選出することで、自律分散的に上位ネットワーク構築が可能となる。

#### 3.1 ピアの定義

ドロネーオーバーレイネットワークのピアは次の条件を満たす。条件1：各ピアは等価な計算主体であり、2次元座標を保持する。条件2：各ピアは隣接ピアとの接続関係、および隣接ピアの座標を保持する。

ドロネーオーバーレイネットワークはピアの2次元座標に基づいて構築されるため、条件1が必要である。また、ドロネー三角形分割の条件を満たすかを調べるために条件2が必要である。

#### 3.2 上位ネットワークに参加するピアの選択確率

指定した密度 $\rho$ になるような上位ネットワークを構築するために、上位ネットワークに参加するピアの選択確率 $Pr_{sel}$ について考える。ある領域 $A$ に必要なピア数を $N_{req}$ 、実際に領域 $A$ 内に存在するピア数を $N_{real}$ とすると、 $Pr_{sel} = N_{req}/N_{real}$ と表される。また、 $N_{real}$ は $A$ 内の実際のピアの分布密度を $\rho_A$ 、 $A$ の面積を $V_A$ とすると、 $N_{real} = \rho_A \times V_A$ と表すことができる。

ここで、 $\rho_A$ の推測値 $\rho'_A$ を求めることを考える。3.1節の条件2より各ピアは隣接ピアの情報しか保持しておらず、ネットワーク全体のピアの分布を知るコストは非常に高い。そのため、自身と隣接ピアの情報から $\rho_A$ を推測する必要がある。ドロネー三角形分割の双対関係であるボロノイ図を考えると、各ボロノイ領域には自分自身しか存在しないことが分かる。そして、自身のボロノイ領域は隣接する点の座標から求めることが可能である。そこで、隣接ピアの座標情報から自身のボロノイ領域の面積 $V_{vor}$ を求めると、自身の周囲のピアの分布密度を $1/V_{vor}$ と推測することが可能である。この自身のボロノイ領域の面積から求めた分布密度を $\rho'_A$ とすることで、各ピアが保持している情報のみから $\rho'_A$ を求めることができる。そこで、 $\rho'_A$ を用いた $N_{real}$ の推測値を $N'_{real}$ とすると、 $N'_{real} = \rho'_A \times V_A = V_A/V_{vor}$ となる。

よって、 $Pr_{sel} = V_{vor} \times (N_{req}/V_A) = V_{vor} \times \rho$ となる。以上より、上位ネットワークの密度 $\rho$ が与えられたとき、上位ネットワークに参加するピアの選択確率 $Pr_{sel}$ は近似的に各ピアのボロノイ領域 $V_{vor}$ を用いて求めることができると考えられる。

#### 3.3 階層化の手順

階層化はボトムアップで行い、各ピアが任意のタイミングで上位ネットワークに参加可能とするため、各階層のドロネーオーバーレイネットワーク構築は文献[3]のアルゴリズムを前提とする。階層化の手順を図5に示す。まず、最下位のドロネーオーバーレイネットワークを構築する。その後、①各ピアは自身のボロノイ領域の面積を計算し、与えられた上位ネットワー

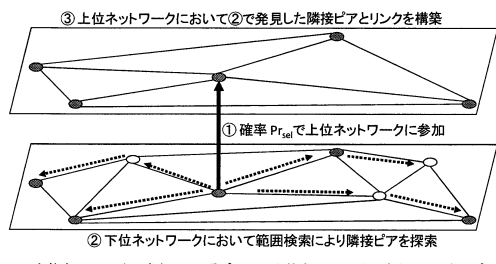


図5 ドロネーオーバレイネットワークの階層化の手順

クの分布密度と合わせて 3.2 節の選択確率により上位ネットワークに確率的に参加する。②上位ネットワークに参加するピアは、既に参加している下位ネットワークにおいて、同じ上位ネットワークに参加しているピアを範囲検索により探索し、③発見したピアとリンクを張りながら上位ネットワークを構築していく。上位ネットワークの構築が終了すると、その階層において各ピアがその階層での自身のボロノイ領域の面積とさらに上位階層のピアの分布密度を用いて、より上位のネットワークに確率的に参加していく。

このように再帰的に上位ネットワークを構築していくことで、上位階層ほど疎なピアの分布となるネットワークが構築される。このとき、各階層のピアの分布密度はその階層の指定された分布密度以上に密になることはない。

## 4 評価

### 4.1 シミュレーション環境と評価項目

提案手法により上位ドロネーネットワークのピアの分布が確認するため、シミュレーションによる評価を行った。想定環境としては、ピアが一様に分布している場合と分布に偏りがある場合を考え、 $-150 \leq x \leq 150$ ,  $-150 \leq y \leq 150$  の 2 次元領域にピアを 1000 配置し、ピアの分布に一様分布と、Zipf 分布を用いた。Zipf 分布については、 $(0, 0)$  をピアの集中する中心点とし、中心点からの距離  $d$  が  $[0, 150]$  の間で小さい  $d$  ほど頻度が多くなるような Zipf 分布となっている。Zipf 分布は

$$f(k; s, N) = \frac{1/k^s}{\sum_{i=1}^N 1/i^n} \quad (k: \text{順位}, N: \text{要素数})$$

のように表される。式中の  $s$  は収束の速さのパラメータであり、 $s$  が大きいほど順位の低い要素が出現しにくくなる。シミュレーションではこのパラメータ  $s$  を 0.5 と 1 の 2 つに設定し、ピアの密集度を 2 段階に変化させた。以降ではこの 2 つの Zipf 分布のうち、密集度が低い  $s = 0.5$  の Zipf 分布を Zipf 分布 1、密集度が高い  $s = 1$  の Zipf 分布を Zipf 分布 2 とする。

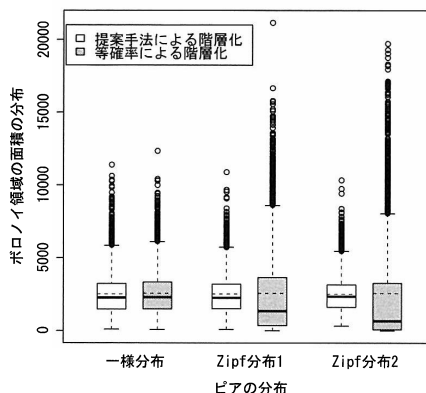


図6 各ピアのボロノイ領域の面積の分布

このドロネーオーバレイネットワークにおいて、提案手法により階層化を行った場合とピアの分布によらず等確率で階層化を行った場合について、上位ネットワークに参加しているピアのボロノイ領域の面積の分布を評価し、各ピアのボロノイ領域の面積が均一化されているかを確認した。等確率の場合における上位ネットワークに参加するピアの選択確率は、ピアが一様に分布していると仮定して、提案手法と同じ上位ネットワークの分布密度により決定した。また、各手法における上位ネットワークの様子を調べ、上位ネットワークのピアが一様に分布しているかについて確認した。さらに、実際にセンサネットワークに適用した場合に得られる観測値分布の様子についても確認を行った。

### 4.2 評価結果

#### 4.2.1 上位ネットワークのピアの分布

提案手法と等確率による階層化による上位ネットワークに参加したピアのボロノイ領域の面積の分布を図 6 の箱ひげ図により示す。図 6 において、箱内の実線は中央値、点線は平均値を表し、ひげ上部の点は外れ値を表している。また、各分布における最下位ネットワーク、提案手法による上位ネットワーク、等確率による階層化を行った場合の上位ネットワークの様子を図 7, 図 8, 図 9 に示す。

図 6 より、各手法ごとにピアの分布による違いに注目すると、等確率による階層化ではピアの分布に偏りがある場合、上位ネットワークにおけるボロノイ領域の面積の分布の歪度が大きくなっておりピアの分布の偏りを解消できていないことが分かる。一方、提案手法ではピアの分布によらず上位ネットワークのボロノイ領域の面積の分布の歪度はほぼ一定であり、ピアの

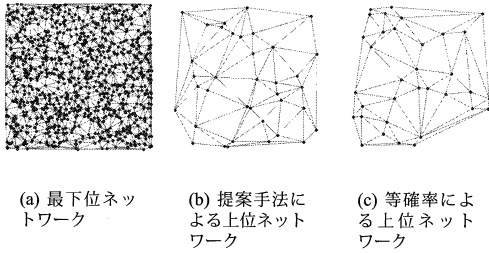


図7 一様分布におけるネットワークの様子

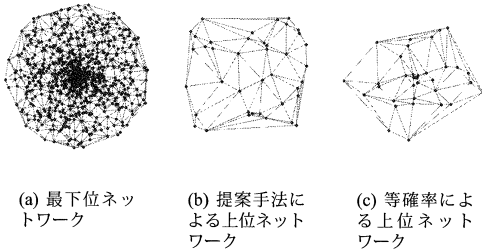


図8 Zipf分布1におけるネットワークの様子

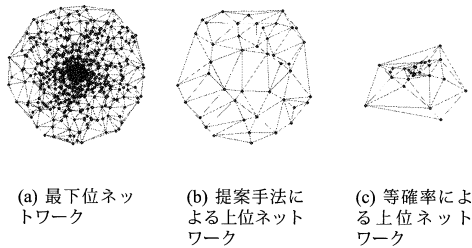


図9 Zipf分布2におけるネットワークの様子

分布の偏りを解消できていることが分かる。このことは、各分布において最下位層のネットワークの様子と各手法における上位ネットワークの様子を比較することでも確認できる。

ここで、各分布において各手法を比較する。まず、一様分布の場合であるが、提案手法による上位ネットワークも等確率による上位ネットワークも各ピアのボロノイ領域の面積の分布に大きな違いはない。これは、間引く前のピアの分布に偏りがないため、すべてのピアを等確率に間引いた上位ネットワークもやはりピアの分布に偏りがなためである。また、提案手法では各ピアの上位ネットワークに参加する確率は異なるが、一様にピアが分布しているため各ピアのボロノイ領域の面積が類似しており、上位ネットワークに参加する確率も各ピアで類似するためピアの分布は一様となる。よって両手法ともに図7のように上位ネットワークのピアの分布は一様である。

次に、Zipf分布1の場合について考察する。等確率

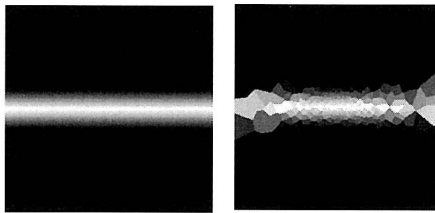
による階層化では、中央値が箱の中央より下部にあり、上位ネットワークにおいてボロノイ領域の面積が小さいピアが多数存在していることが分かる。したがって、上位ネットワークのピアの分布傾向と最下位ネットワークのピアの分布傾向は変わっていない。そのため、図8(c)のように中心部にピアが密集している箇所がある。一方、提案手法では一様分布の場合と同様のボロノイ領域の面積の分布となっている。これは、各ピアがピアの分布密度を推測して上位ネットワークに参加する確率を変化させているためである。そのため、上位ネットワークのピアの分布は図8(b)のように一様な分布となっている。

最後に、Zipf分布2の場合であるが、等確率による階層化の問題点がZipf分布1の場合よりも顕著になっている。すなわち、ボロノイ領域の面積の中央値がより小さくなっており、ボロノイ領域の面積が小さなピアの数がさらに増加している。また、図9から分かるように、最下位ネットワークにおいて外周部のピアの密度が低くなっているため、等確率による上位ネットワークでは外周部のピアが参加しておらず、センサ情報を取得できない状況になっている。しかし、提案手法ではZipf分布1の場合と同様に、各ピアのボロノイ領域の面積の分布に変化がなく、上位ネットワークのピアの分布が一様となっている。

以上のことから、提案手法はピアの分布の偏りの程度によらず、地理的に近いピアを間引きながらも領域全体に一様にピアが分布した上位ネットワークを構築できることが確認できた。

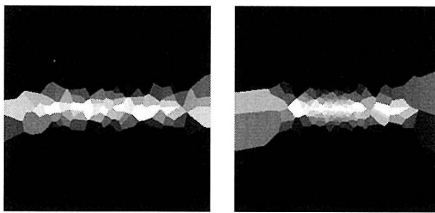
#### 4.2.2 得られる観測値分布

Zipf分布2において提案手法と等確率による階層化により得られる観測値分布を図10に示す。用いた分布は図10(a)である。また、このネットワークにおいて得られる最も詳細な観測値分布は最下位ネットワークを用いた場合であり、図10(b)のようになる。ここで、中心部にピアが密集しており得られる観測値が冗長であるため、各手法により収集ピアを間引いて得られた観測値分布が図10(c)と図10(d)である。等確率による階層化により384ピアから得た図10(d)では、中央部は対象ピアを十分に間引かず周辺部は本来得られる情報を得られていないため、周辺部に行くにしたがって観測値分布が粗くなり、周辺部の観測値分布が歪んでしまっている。一方、提案手法により232ピアから得られた図10(c)では、間引くピア数が中心部は多く周辺部は少ないため、領域全体から一様に情報を収集できており、図10(b)と比較しても観測値の分布が歪むことなく得られている。このように、提案手法を用いることで本来の観測値分布を歪ませることなく、その傾向を把握することが可能である。



(a) 用いた観測値の分布

(b) 最下位ネットワークから得られる分布(1000ピア)



(c) 提案手法による上位ネットワークから得られる分布 (232ピア)

(d) 等確率による上位ネットワークから得られる分布 (384ピア)

図 10 Zipf 分布 2 において得られる観測値分布の様子

## 5 おわりに

本研究では、ボロノイ領域を均一化するドローンオーバレイネットワークの階層化手法を提案した。提案手法により、ネットワーク全体のピアの分布状況を知ることなく、各ピアの保持する情報のみで地理的に近いピアを任意の分布密度まで間引いた上位ネットワークを構築できる。このため、ドローンオーバレイネットワークをセンサネットワークに適用した場合に、膨大なセンサから必要な密度を満たすだけの情報を容易に取得可能となった。

今後の課題として次の3つが挙げられる。まず、上位ネットワークにおける隣接ピアの発見手法である。提案手法はピアの参加・離脱によりボロノイ領域が変化した場合、上位ネットワークの構造も追従して修正する必要がある。しかし、ピアの参加・離脱により生じるリンクの不整合が解消されていない場合、通常の範囲検索では上位ネットワークにおける隣接ピアを発見することが困難になるため、リンクの不整合が存在する場合でも安定して隣接ピアを発見する方法が必要となる。次に、階層化による検索ホップ数削減の検証である。本稿では階層化によるピア分布の偏りの解消に注目したが、階層化により遠距離へのショートカットリンクを持つことができるため、検索に要する

ホップ数を削減できると考えられる。そこで、提案手法によるホップ数削減の効果について検証する必要がある。最後に、観測値の特徴を考慮したセンサ情報の間引きである。実際にセンサネットワークに適用した場合を考えると、特徴的な観測値の場合は上位ネットワークに参加させるなどの観測値に応じてピアを間引きたいという要求が生じるものと考えられる。そのため、ピアの位置情報のみでなく、観測値まで含めて効率的にセンサ情報を取得できる手法についても考えていく必要がある。

今後は以上の課題に取り組み、実用的なドローンオーバレイネットワークによるセンサネットワークの実現を目指したい。

## 謝辞

本研究の一部は、平成 20 年度総務省委託研究「ユビキタスサービスプラットフォーム技術の研究開発」による成果である。また、本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム（研究拠点形成費）および科学研究費補助金・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。

## 参考文献

- [1] 江崎浩, 砂原秀樹, 相原玲二, 中山雅哉, 松本敏文: Live E!プロジェクト: デジタル百葉箱による自律的な気象データの共有, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, Vol. 2006, No. 2, pp. “S-31”-“S-32” (2006).
- [2] Araujo, F. and Rodrigues, L.: GeoPeer: A location-aware peer-to-peer system, DI/FCUL TR 03-31, Department of Informatics, University of Lisbon (2003).
- [3] 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ーン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, pp. 51-64 (2006).
- [4] 奥智照, 坪井新治, 大西真晶, 上島紳一: P2P 型ジオキャストのための階層ネットワークの提案と評価, 電子情報通信学会データ工学ワークショップ (DEWS 2008) 論文集 (2008).
- [5] Aspnes, J. and Shah, G.: Skip Graphs, *ACM Transactions on Algorithms*, Vol. 3, No. 4, p. 37 (2007).
- [6] Varvello, M., Biersack, E. and Diot, C.: Dynamic Clustering in Delaunay-Based P2P Networked Virtual Environments, *Proceedings of Netgames 2007, the 6th ACM SIGCOMM workshop on Network and systems support for games*, pp. 105-110 (2007).