

推薦論文

センサ観測値分布の概要把握を可能とする 階層化ドロネーオーバーレイネットワーク構築手法

小西 佑治^{†1} 寺西 裕一^{†2,†3} 竹内 亨^{†3}
春本 要^{†4} 下條 真司^{†3} 西尾 章治郎^{†2}

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観測値は類似することが多く、すべ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、収集対象となるセンサを要求される密度を満たすように一様に選択し、選択されたピア群からなる上位階層ネットワークを持つ階層化ドロネーオーバーレイネットワークの構築手法を提案する。このとき、各ピアが自律的に情報収集対象となるか判断できるよう、ポロノイ領域の面積に基づいた確率的手法を用いる。提案手法をシミュレーションにより評価し、ピアの分布の疎密にかかわらず領域全体から一様にピアを選択し、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 Hierarchical Delaunay Overlay Network Construction Method for Obtaining Overviews of Sensing Data

YUJI KONISHI,^{†1} YUUCHI TERANISHI,^{†2,†3}
SUSUMU TAKEUCHI,^{†3} KANAME HARUMOTO,^{†4}
SHINJI SHIMOJO^{†3} and SHOJIRO NISHIO^{†2}

In this research, we assume to apply a Delaunay overlay network to construct a sensor network made up of sensor nodes distributed in the wide area. While collecting sensing data to obtain the overview of the observed values in the sensor network, redundant sensing data will be collected because the adjacent sensors tend to have similar values when the sensors are located densely. In this paper, we propose a hierarchical Delaunay overlay network construction method with uniform geographical peer distributions by estimating the density of peers. Our proposal probabilistically adjusts a peer density of upper layers 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われてきている。ユビキタス環境では、様々な情報発信源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源の1つとしてセンサがあげられる。たとえば、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。また、OSOITE プロジェクト²⁾では、都市に配備された気象センサから気温分布などの粒度の細かい情報を収集するシステムの研究開発が行われている。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広域かつ詳細な情報を利用可能となる。

しかし、ユビキタス環境ではネットワークに接続されるセンサは膨大な数になると考えられ、センサを管理する主体も多種多様なものとなる。広域かつ大規模に配置されるこうしたセンサを活用するには、センサやセンサ機器が接続されたノード、無線センサネットワークのシンクノードといった、個人や組織など様々な管理者の下に存在するデータを蓄積した端末（ここではピアと呼ぶ）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りセンサ情報を分散管理できることが望ましい。P2Pアーキテクチャにより分散管理することで、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

†1 株式会社アイ・エム・ジェイ
IMJ Corporation

†2 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

†3 独立行政法人情報通信研究機構
National Institute of Information and Communications Technology

†4 大阪大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University

本論文の内容は2008年9月のマルチメディア通信と分散処理研究会にて報告され、同研究会主催により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

容易とすることができると考えられる。

本研究では P2P ネットワークとして、地理的探索のためのオーバーレイネットワークの 1 つであるドローンオーバーレイネットワークを用いてセンサ情報を分散管理することを前提とする。ドローンオーバーレイネットワークの主な特徴は、ネットワーク内のピア数によらず各ピアの平均次数が 6 となること、リンクしているピアは他のピアよりも近傍に存在することである。これらの特徴によりリンク数にスケーラビリティを確保でき、周囲のセンサとの連携が容易となるなど、大規模なセンサネットワークに適したオーバーレイネットワークであると考えられている。

このように構築される広域センサネットワークの活用例としては、コンピュータの画面上に表示された地図の縮尺にあわせて、センサ観測値の分布の概要を得られるようにするアプリケーションが典型的である。たとえば、気圧センサによる気圧分布図や、温度センサによる温度分布図などがこれにあたる。ここでいうセンサ観測値の分布の概要とは、必要とする粒度に応じた、地理的に一定の間隔でのセンサ観測値の集合を指す。しかし、P2P アーキテクチャによりピアが配備される広域センサネットワーク環境では、ピアが一定間隔で配置されることは想定できず、偏りが生じてしまう。そこで本研究では、こうした偏りのあるピア群のなかから、なるべく地理的に一定間隔で情報収集対象となるピアを領域全体から選択し、観測値分布の概要を得られるようにすることを目指す。

本研究では、センサをピアとして扱い構成されるドローンオーバーレイネットワークを基本とし、分布密度の異なるネットワークを複数上位ドローンオーバーレイネットワークとして持つ階層化ドローンオーバーレイネットワークを構成する手法を提案する。必要な密度に応じて選択された上位階層のドローンオーバーレイネットワークに存在するピアを情報収集対象とすることで、対象とする地理的範囲からの分布の概要を効率的に得ることができる。このとき、上位階層ネットワークに参加するピアを単純に等確率で選択すると、選択前のピア分布の傾向が継承されてしまうため、選択前のピア分布の疎密が変化せず、センサ情報の過不足が生じてしまう可能性がある。そのため、下位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ネットワークを構築することで、検索範囲全体から一様にセンサ情報を取得可能とする。

2. 関連研究

ピアの位置に基づき、階層構造を持つオーバーレイネットワークには次のようなものがある。LL-Net³⁾ は領域をあらかじめ小さな矩形領域に分割し、各領域内に存在するピアから

代表ピアを決定、さらに 4 つの小領域を 1 つの領域として代表ピアを決めることを繰り返した階層構造を持つ。しかし、領域内のピアの分布に偏りがあると、ピアが密集した部分から代表ピアが選ばれる可能性が高く、上位階層においてピアが一様に分布しなくなる。また、動的なエリア分割に拡張した eLL-Net⁴⁾ もあるが、この拡張では LLNet における問題は解決できない。ZNet⁵⁾ は空間充填曲線である Z-ordering⁶⁾ を利用して 2 次元座標を 1 次元化することで本来 1 次元の検索しか行えない Skip Graph⁷⁾ において、多次元の検索を可能としたものである。Skip Graph を利用しているため、Skip Graph の階層構造を利用してピアを間引くことができるが、すべてのピアが等確率でどの上位階層に所属するかが決まるため、ピアの分布の偏りを解消できない。

また、ドローンオーバーレイネットワークによる階層化や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。Skip Geo Network⁸⁾ は Skip Graphs 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 9) 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を考慮しないため、冗長なピアの削減が十分に行えない。後者はピアの分布密度を推測するために 2 ホップ先までのピアの情報が必要であり、また、ネットワークの維持コストに重点がおかれているためピアの分布密度を指定した値に調整することができない。

3. 指定ピア分布密度を満たすドローンオーバーレイネットワークの階層化手法

3.1 ドローンオーバーレイネットワークの階層化とその問題点

ドローンオーバーレイネットワークにおいて、要求される密度を満たすピアの分布となるように選択されたピア群により上位階層ネットワークを構築すると、ある特定の階層のみを利用することで容易に一様にセンサ情報を取得できる。また、上位階層ネットワークにおけるピア間のリンクは下位階層ネットワークよりも長距離であるため、選択されたピアが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クエリを転送することができ、効率的にセンサ情報を取得可能である。

なお、上位階層のネットワークに参加するピアは、問合せへの対応が必要となるため負荷が上昇することとなる。よって、消費電力および処理能力の観点では、電源供給が安定し、処理能力が十分あるピアが上位階層に選択されることが望ましい。本稿では、電源供給、処理能力はいずれのピアも十分に上位階層に参加するに足るものと仮定し、ピアの性能が不均一または不足する状況の想定はスコープ外とする。

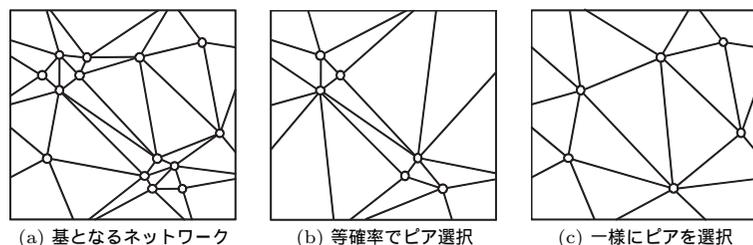


図1 本研究の目指すオーバレイネットワーク
Fig.1 An aimed network.

上位階層ネットワークに参加するピアを選択する場合に、たとえば図1(a)からすべてのピアを等確率で選択すると、図1(b)のように選択前のピア分布の傾向が継承される。したがって、ピア選択後の上位ネットワークでは選択前に密であった箇所は冗長なセンサ情報を十分に削減できず、選択前に疎であ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を取得できなくなってしまう。そこで、図1(c)に示すように、下位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。

3.2 情報収集対象ピアの選択確率

本研究では、情報収集対象となるピアを指定した密度を満たすように領域全体から一様に選択し、上位ネットワークを構築する手法を提案する。ドローンオーバレイネットワークでは、各ピアは、自身の地理的な座標を保持し、隣接ピアとの間の距離、および、ボロノイ領域と呼ばれる担当領域の情報を保持している。提案手法は、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を構築するものである。

ピアの分布密度が ρ となるような上位ネットワークを構築するために、ピアの選択確率 Pr_{sel} について考える。ある領域 A に対して、密度 ρ を満たすために領域 A 内に存在すべきピア数を N_{req} 、実際に存在するピア数を N_{real} とする。このとき、 $Pr_{sel} = N_{req}/N_{real}$ と表すことができる。また、領域 A の面積を S_A 、実際のピアの分布密度を ρ_A とすると、 N_{req} と N_{real} はそれぞれ $N_{req} = S_A \times \rho$ 、 $N_{real} = S_A \times \rho_A$ で表される。よって、 $Pr_{sel} = \rho/\rho_A$ となる。

ここで、 ρ_A の推測値 ρ'_A について考える。各ピアは隣接ピア以外のピア情報を得ることは

困難であるため、 ρ'_A は隣接ピアの情報のみから推測できることが望ましい。ドローンオーバレイネットワークの各ピアは、隣接ピアの情報からボロノイ領域を求めることができる。ここで、ボロノイ領域とは隣接ピアと自身の座標により定義される線分の垂直二等分線により囲まれる領域である。ボロノイ領域の大きさは隣接ピアとの位置関係により変化するため、各ピア周辺のピアの分布の疎密がボロノイ領域の大きさに反映されていると見なすことができる。各ボロノイ領域には対応する1ピアのみしか存在しないため、各ピアのボロノイ領域の面積を S_{vor} とすると、局所的にピアの分布密度は $1/S_{vor}$ であるといえる。よって、本研究では $\rho'_A = 1/S_{vor}$ とする。

ピアの選択確率 Pr_{sel} について再度考えると、 $Pr_{sel} = \rho/\rho'_A$ とすることで、各ピアの保持する情報のみから情報収集対象となるかの選択確率を決定することができ、その確率は $Pr_{sel} = S_{vor} \times \rho$ と表される。本研究では、ピアが保持する情報のみを用いて算出したボロノイ領域の面積に基づく確率 Pr_{sel} でピアを情報収集対象とし、対象となったピア同士が自律的に上位ネットワークを構成する方法を提案する。ただし、ピア分布が疎な場合に $Pr_{sel} > 1$ となる場合があるが、そのときは $Pr_{sel} = 1$ として必ず情報収集対象ピアに選択されるものとする。

3.3 ドローンオーバレイネットワークの階層化手法

3.2節のピア選択確率を利用したドローンオーバレイネットワークの階層化手法として、本研究では、情報収集対象ピア主導による手法と情報収集対象外ピア主導による手法を提案する。すなわち、情報収集対象ピアが上位階層ネットワークにおける隣接ピアを探索し、上位階層ネットワークに参加する手法と、情報収集対象外ピアが現在の階層から離脱することで、情報収集対象ピアのみが現在の階層に残るようにする手法である。

なお、ここではピアがネットワークを離脱する際、離脱ピアは、周囲のピアに再構築要求を通知する想定である。すなわち、ピアの接続が突然切断される場合を想定しない。また、前述のとおり、ピアの性能が不均一または不足する状況の想定はスコープ外であり、頻繁に参加・離脱を繰り返すピアは、オーバレイネットワークに参加させないという想定である。

以降では、上記2つの手法について説明する。また、各ピアが任意のタイミングで新規階層ネットワークに参加可能とするため、各階層のドローンオーバレイネットワーク構築は文献10)のアルゴリズムを前提とする。

3.3.1 情報収集対象ピア主導の階層化手法

情報収集対象ピア主導の新規階層ネットワーク構築の手順を以下に示す。

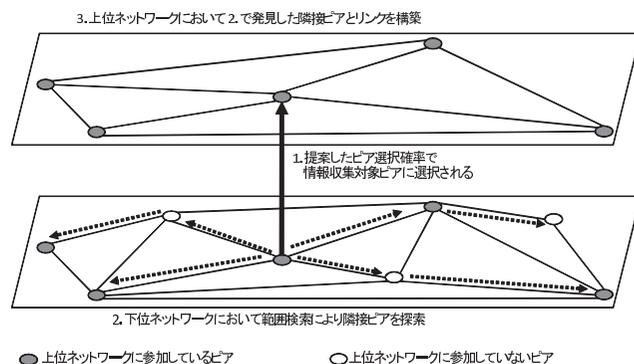


図 2 情報収集対象ピア主導の新規階層ネットワーク構築手順

Fig. 2 New layer network construction method led by selected peers.

新規階層ネットワーク構築の手順

- (1) ドローンオーバーレイネットワークのメンテナンス時に、提案したピア選択確率により情報収集対象ピアとなることが決定する。
- (2) 現在参加している階層において、すでに上位階層ネットワークに参加しているピアを探索する。
- (3) 探索の結果発見されたピアに仲介してもらい、上位階層ネットワークに参加、リンクを構築する。
- (4) 以上の手順を各ピアが行うことにより、上位階層ネットワークに情報収集対象ピアのみからなるドローンオーバーレイネットワークが新たに構築される。

この階層化の様子を図 2 に示す。ここで問題になるのは、上位階層ネットワークに参加しているピアの探索領域の大きさである。ある領域に対して特定の密度 ρ で一様にピアが配置されていると仮定すると、各ピアを中心とし $1/\rho$ の面積を持つ半径 r の円領域内には他のピアは存在しない可能性が高い。したがって、ピア間の距離は平均 $2r$ となる。また、上記と同様に、隣接ピアから半径 r の円領域内にも、他のピアは存在しない可能性が高い。すなわち、隣接ピアは自ピアから $2r$ 離れた地点を中心とした半径 r の円領域内に存在する可能性が高い。したがって、隣接ピアは、自ピアから半径 $3r$ の円領域内に存在する可能性が高いといえる。よって、上位階層ネットワークに参加しているピアの探索領域を、各ピアが自身を中心とする半径 $3r$ の円領域と定める。

しかし、指定されたピア分布密度よりも非常に疎な場合、隣接ピアは上位階層ネットワー

クに参加している可能性が高いにもかかわらず半径 $3r$ の円領域に含まれないため発見できない。よって、半径 $3r$ の円領域内のピアからさらに 1 ホップ外側に存在するピアまで探索領域とすることで、疎な場合でも正しく上位階層ネットワークにおける隣接ピアを発見できる。しかし、ピア分布が密であるほど探索メッセージを中継するピア数が増え、階層化コストが増大する。

ピアの参加、および、ピアの離脱にともなう再構築の手順を以下に示す。

ピアの参加にともなう再構築の手順

- (1) 最下位階層ネットワークに新規ピアが参加する。
- (2) 最下位階層ネットワークにおいて情報収集対象ピアであるかを判断する。
- (3) 情報収集対象ピアである場合は 1 つ上位の階層ネットワークに参加済みのピアを探索して仲介してもらい、1 つ上位の階層ネットワークに参加する。情報収集対象ピアでない場合は再構築作業を終了する。
- (4) 以上の手順を最下位階層ネットワーク、最下位階層の 1 つ上位階層のネットワーク、最下位階層の 2 つ上位階層のネットワークと繰り返し、最終的に情報収集対象ピアに選択されずに再構築作業が終了するまで、または最上位階層ネットワークに参加するまで行うことで、新規ピア参加による再構築が完了する。

ピアの離脱にともなう再構築の手順

- (1) 最下位階層ネットワークにおける離脱ピアの隣接ピアのうち、最下位階層の 1 つ上位階層のネットワークに参加していないピアに階層化の要求を行う。
- (2) 階層化の要求を受けた各ピアが新規ピア参加にともなう再構築の手順を踏むことで、離脱ピアの参加していた各階層における離脱ピアの代替ピアが決定される。

ピアが参加する場合、その領域のピア分布密度は密になり情報収集対象ピアの選択確率は小さくなる。また、少数のピアが離散的に離脱する場合、各ピアのポロノイ領域は分割されて周囲のピアのポロノイ領域に併合されるため、周囲のピアの情報収集対象ピア選択確率の変化は小さい。よって、本手法においてピアの参加や少数のピアの離散的な離脱にともなう再構築は行われにくく、これらの再構築コストが生じる可能性は低い。しかし、多数の密集したピアが離脱する場合は再構築が生じるため、再構築コストが生じる。

3.3.2 情報収集対象外ピア主導の階層化手法

情報収集対象外ピア主導の新規階層ネットワーク構築の手順を以下に示す。

新規階層ネットワーク構築の手順

- (1) ドローンオーバレイネットワークのメンテナンス時に、 $(1 - \text{提案した選択確率})$ により情報収集対象外ピアとなることが決定する。
- (2) 情報収集対象外ピアは現在参加している階層から離脱し隣接ピアに通知する。
- (3) 情報収集対象外ピアは本来参加していた階層の隣接ピアに対して、下位階層でのリンク構築を要求する。
- (4) 情報収集対象外ピアが本来参加していた階層における隣接ピアはドローンオーバレイネットワークのメンテナンスによりリンク修復を行う。
- (5) 下位階層では各ピアがドローンオーバレイネットワークのメンテナンスを行い情報収集対象外ピアが本来参加していた階層と同様の隣接関係が新たに構築される。このとき、隣接ピアの行うメンテナンスでは1つ上位階層ネットワークの隣接ピア情報を下位階層の隣接ピア情報として複製し登録する。
- (6) 以上の手順を各ピアが行うことにより、上位階層ネットワークには情報収集対象ピアのみが存在し、新たに構築された下位階層ネットワークには本来上位階層で構築されていたネットワークがそのまま構築される。

この階層化の様子を図3に示す。この手法では新規階層ネットワークにおける隣接ピアを探索する必要がなく、階層化時の通信はすべて隣接ピア間とのやりとりで済む。そのため、各ピアの通信は局所的となり階層化時のコストを抑えることができる。

また、ピアの参加、および、ピアの離脱にともなう再構築の手順を以下に示す。

ピアの参加にともなう再構築の手順

- (1) 最上位階層ネットワークに新規ピアが参加する。
- (2) 最上位階層ネットワークにおいて情報収集対象外ピアであるかを判断する。
- (3) 情報収集対象外ピアである場合は最上位階層ネットワークから離脱し階層化の手順を踏む。情報収集対象外ピアでない場合は最上位階層ネットワークには参加したままで、1つ下位階層のネットワークにも参加する。
- (4) 以上の手順を最上位階層の1つ下位階層のネットワーク、最上位階層の2つ下位階層のネットワークと繰り返し、最終的に最下位階層の1つ上位階層のネットワークにおいて以上の手順を行うことで、新規ピア参加による再構築が完了する。

ピアの離脱にともなう再構築の手順

- (1) 最下位階層ネットワークにおける離脱ピアの隣接ピアのうち、離脱ピアが参加していた最も上位階層のネットワークに参加していないピアをその最も上位階層のネット

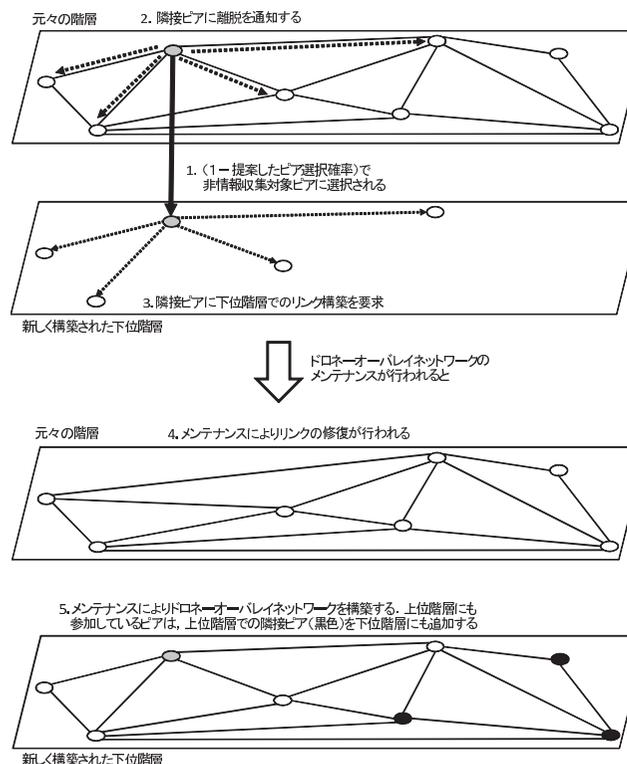


図3 情報収集対象外ピア主導の新規階層ネットワーク構築手順
Fig. 3 New layer network construction method led by unselected peers.

ワークに参加させる。

- (2) 参加させられた各ピアが新規ピア参加にともなう再構築の手順を踏むことで、離脱ピアが参加していた各階層ネットワークにおける離脱ピアの代替ピアが決定される。

この手法ではピアの参加にともないピア分布が密になると、情報収集対象外となる確率が高くなるため再構築が生じる。また、ピアの離脱にともないピア分布が疎になると、下位階層ネットワークから代替ピアを選出する必要があるため、再構築が生じる。そのため、ピアの参加や少数のピアの離脱にともない、つねに再構築コストが生じてしまう。

4. 評価

4.1 シミュレーション環境

提案手法による有効性を検証するため、シミュレーションによる評価を行った。本シミュレーションでは、様々な実環境に適用できるように、距離の単位を特に規定せず、相対的なピアの位置関係を用いている。実際には、座標軸の値に対し、小規模な環境では小さな距離単位（メートルなど）、広域環境では大きな距離単位（キロメートルなど）を割り当ててよい。

シミュレーション環境は以下のとおりである。まず、 $-150 < x, y < 150$ の 2次元平面に 100 ピアをグリッド状に配置する。さらに 100 ピアをランダム、または、Zipf 分布に従い配置する。

ここで Zipf 分布とはある点を中心とし、中心からの距離が小さいほど頻度が高くなる分布であり、この距離の値の分布は次の式で表される。

$$f(k; s, N) = \frac{1/k^s}{\sum_{i=1}^N 1/i^s}$$

式中の k は順位、 N は要素数、 s は頻度の偏りのパラメータである。 s の値が大きいほど距離が小さい値の頻度が高くなる。シミュレーションではこのパラメータ s を $s = 1$ とした。また、中心点の座標を $(0, 0)$ とし、一様に選ばれた方向に対して中心からの距離が Zipf 分布となるようにピアの座標を決定した。

実環境においては、ピアが密に配置されている部分や、一様に分布している部分が混在すると考えられる。たとえば、建物などに配備されるセンサは都市部の密度が高くなる Zipf 分布となるが、研究・調査などで自然散布されたセンサはランダム分布となる。本シミュレーションの設定は、ピアが密に配置されている部分、ランダムに分布している部分をそれぞれ切り出した想定といえる。

この 200 ピア配置されたドローンオーバーレイネットワークにおいて、領域全体から 100 ピアを選択することを目標とする。

4.2 情報収集対象ピア選択確率の評価

3.2 節において提案した情報収集対象ピアの選択確率について評価を行った。比較手法は、指定された密度から求まる 1 ピア存在すべき面積を持つ円領域内のピア数を実際に調査し、そのピア数に基づく確率によるピア選択とした。比較手法では周囲のピアの数を調べるため、正確にピアの選択確率を決定できる。また、等確率によるピア選択の問題点を確認するため、すべてのピアを確率 $1/2$ で選択する場合についても評価を行った。

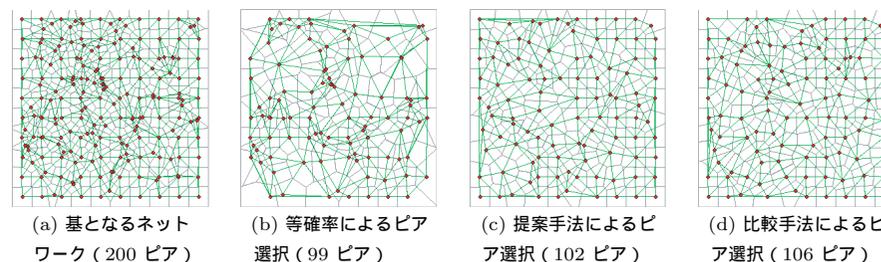


図 4 ランダム分布におけるネットワークの様子
Fig. 4 Upper layers in a random peer distribution.

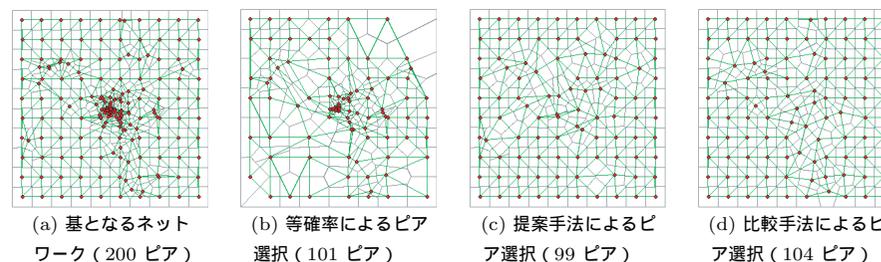


図 5 Zipf 分布におけるネットワークの様子
Fig. 5 Upper layers in a Zipf peer distribution.

ランダム分布におけるネットワークの様子を図 4 に示す。図 4(a) はグリッド上の 100 ピアに対し、残りの 100 ピアをランダムに配置しているため、局所的に密になっている場所が存在している。このネットワークから等確率によりピアを選択した図 4(b) では 100 ピア近くを選択できてはいるが、ピアの疎密の傾向が継承されていることが分かる。一方、比較手法の図 4(d) は周辺のピアを探索することで周囲のピア数を把握しているため、領域全体からほぼ一様に 100 ピア近くが選択できていることが分かる。また、提案手法の図 4(c) はいっさい通信を行っていないにもかかわらず、比較手法と同様の傾向でピアが選択できている。

Zipf 分布におけるネットワークの様子を図 5 に示す。図 5(a) はランダム分布と異なり、領域中心部により多くのピアが配置された、偏ったピア分布を持つネットワークである。図 5(b) はランダム分布よりも、顕著に元々のピア分布の傾向を継承していることが確認で

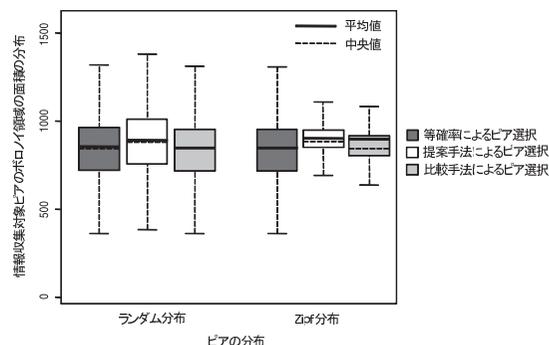


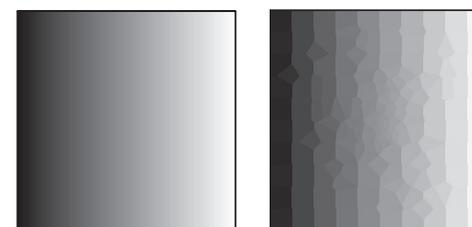
図 6 選択されたピアのボロノイ領域の面積の分布
Fig. 6 Voronoi area distributions of selected peers.

きる．一方，比較手法の図 5 (d) は周囲のピア数を把握するため，ピアが密に存在する領域では各ピアの選択確率が小さくなり，領域全体からほぼ一様にピアを選択している．また，提案手法の図 5 (c) も比較手法と同様の傾向があることが確認できる．

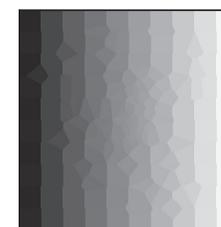
図 6 は，各手法により情報収集対象として選択されたピアの上位ネットワークにおけるボロノイ領域の，面積の分布および分散の違いを示す箱ひげ図である．図 6 において，箱内の実線は中央値，点線は平均値を表す．箱の上端下端は，第 1 四分位点と第 3 四分位点である．

図において，ランダム分布では面積の平均値は 840～880 であり，いずれの選択方法においても，第 1 四分位点と第 3 四分位点の差は 240 程度となっている．また，Zipf 分布では，面積の平均値は 840～890 であるが，等確率によるピア選択のときの第 1 四分位点と第 3 四分位点の差は 238 であるのに対し，提案手法と比較手法における第 1 四分位点と第 3 四分位点の差はともに 110 以内に収まっている．よって，提案手法は，各ピア自身の保持する情報のみに基づいているにもかかわらず，実際に配置されているピア数を調査する比較手法と同程度に一律の分布となっていることが分かる．

次に，Zipf 分布において選択した情報収集対象ピアから得られるセンサ観測値の分布を図 7 に示す．図 7 (a) が本来の観測値の分布であり，すべてのピアの情報から得られる分布が図 7 (b) である．図 7 (b) では中心部が過剰に詳細となっている．ここで冗長な情報を削減するために等確率により選択したピアの情報から得られる分布図 7 (c) では，ピアが領域全体に対して一律には選択されていないため，本来の観測値分布の傾向を歪めてしまってい



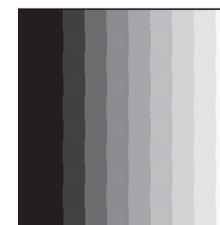
(a) 用いた観測値の分布



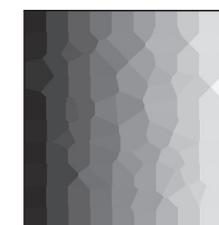
(b) すべてのピアから情報取得 (200 ピア)



(c) 等確率により選択したピアから情報取得 (102 ピア)



(d) 理想的に一律に選択したピアから情報取得 (100 ピア)



(e) 提案手法により選択したピアから情報取得 (103 ピア)

図 7 Zipf 分布において得られる観測値分布の様子
Fig. 7 Obtained overviews of sensing data.

る．図 7 (d) はグリッド上に配置した 100 ピアの情報から得られる分布である．これが 100 ピアによる観測値分布再現の理想値であるが，周囲のピアの分布を把握することが困難な P2P ネットワークではこのように正確にピアを一律に選択することは難しい．提案手法により自律的に選択されたピアから得られる分布図 7 (e) を確認すると，中心部の冗長な情報を削減し，かつ，100 ピアによる観測値分布再現の理想値に近い詳細度の分布が得られていることが分かる．

このことを定量的に評価するため，本来の観測値の分布とそれぞれの方法で得られる観測値の分布との間の差を，画像の劣化を評価する指標の 1 つであるピーク信号対雑音比 (PSNR: Peak Signal-to-Noise Ratio) を用いて計算した．具体的には，もとの観測値分布と，各ピア選択方法により再現された分布それぞれについて，センサ観測値をピクセル値とした画像

表 1 各方法による PSNR

Table 1 PSNR by each selection method.

	PSNR (dB)
(b) すべてのピアを選択	31.354
(c) 等確率により選択	27.126
(d) 理想的に一樣に選択	30.569
(e) 提案手法により選択	29.736

を作成し、画像としてどれだけ劣化しているかを求めている。表 1 は、それぞれの方法における PSNR の値である。提案手法は、等確率で選択した場合と比べて 2.6 dB 改善しており、また、理想的に一樣に選択した場合との差は 0.8 dB 程度と近い値となっていることが分かる。また、(b) においてすべてのピアを選択した場合の PSNR の値が 31.354 と最も高いが、ここで要求されている分布の粒度は (d) の理想的に一樣に選択した場合程度であり、(d) 以上の PSNR の値となる必要はなく、冗長である。

4.3 階層化コストの評価

3.3 節において提案した情報収集対象ピア主導の階層化手法と情報収集対象外ピア主導の階層化手法とで、階層化に要する新規階層ネットワーク構築コストと参加済みピアが離脱した場合の再構築コストを比較した。ドローンオーバーレイネットワーク構造を保つためのメンテナンスに要するメッセージ数は、いずれの手法も同じである。また、再構築処理の完了までにかかる処理時間はメッセージ数に比例する。よって、ここでは、コストをドローンオーバーレイネットワークのメンテナンスに要するメッセージを除いた、各手順に必要なメッセージ数と定義する。

ドローンオーバーレイネットワークにおいては、メンテナンスのためのメッセージのやりとりが基本的にネットワークサイズによらず近隣ピアとのみ行われる点が特徴であり、ピアあたりの負荷の増加を抑えられることが重要となる。よって本評価ではピアあたりのコストを評価した。

再構築については、シミュレーション環境において新規階層ネットワークを構築後、1~5 ピアを離脱させた。このとき、離散した複数ピアの離脱は、各ピアの離脱の影響が局所的であるために 1 ピア離脱の場合と同等である。そこで、複数ピア離脱の場合は隣接した複数ピアを選択している。複数ピアの離脱は同時に起こるものとする。また、ここではピアの参加にともなう再構築コストについては評価を行っていない。これは情報収集対象ピア主導の階層化手法では再構築自体が行われる可能性が低く、また、情報収集対象外ピア主導の階層

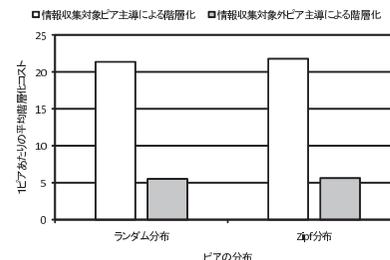


図 8 新規階層ネットワーク構築に要する 1 ピアあたりの平均コスト

Fig. 8 Average new layer construction cost of each peers.

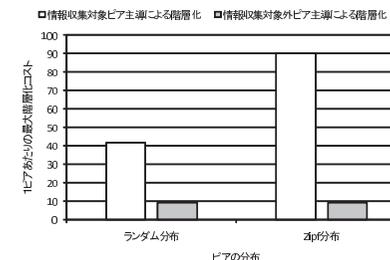


図 9 新規階層ネットワーク構築に要する 1 ピアあたりの最大コスト

Fig. 9 Max new layer construction cost of each peers.

化手法ではピアの参加にともなう再構築コストが新規階層ネットワーク構築時の 1 ピアあたりのコストと同様となるためである。

まず、新規階層ネットワーク構築時の階層化に関与したピアの 1 ピアあたりの平均コストを図 8 に、最大コストを図 9 に示す。図 8 より、どちらの分布においても情報収集対象ピア主導の階層化手法では多くのコストを要している。これは上位階層ネットワークにおける隣接ピア探索が必要となるためである。一方、情報収集対象外ピア主導の階層化手法は各ピアの要するコストは低く抑えられている。これは各ピアが隣接ピア以外とは通信を行わないことによる。

また、図 9 より、Zipf 分布において情報収集対象ピア主導の階層化手法が特にコストを要していることが分かる。これは Zipf 分布では領域の中心部に多数のピアが配置されているために、この密集部に存在する情報収集対象ピアによる上位階層ネットワークの隣接ピア探索のコストが非常に高くなったためである。一方、情報収集対象外ピア主導の階層化手法では、ピア分布の違いによるコストの差はない。これは、ドローンオーバーレイネットワークではピア分布の疎密によらず隣接ピア数が平均 6 となることによる。

次に、再構築コストについて、離脱の影響を受けたピア数を図 10 に、それらのピアの再構築コストの合計を図 11 にそれぞれ示す。図 10 (a)、図 10 (b) から、1 ピア離脱した場合を除けば、情報収集対象外ピア主導の手法の方が影響を受けたピア数が少ないことが分かる。また 1 ピアのみ離脱した場合については、情報収集対象ピア主導の手法では影響を受けたピア数が 0 であることは注目すべきである。これは、周囲のピアがまったく再構築を行っていないことを示している。この理由として、1 ピア離脱した程度では周囲のピアのポロノ

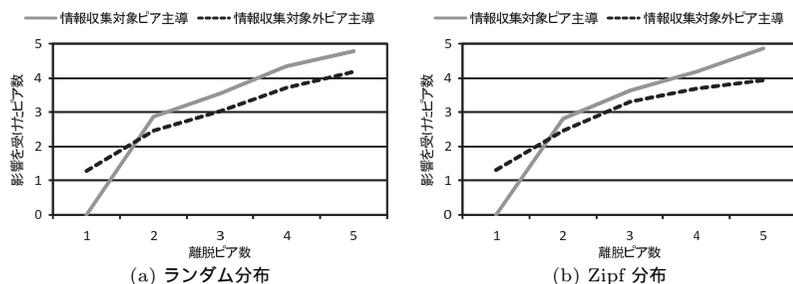


図 10 各分布における離脱の影響から通信を行ったピア数

Fig. 10 Amount of peers which executed reconstruction in each peer distribution.

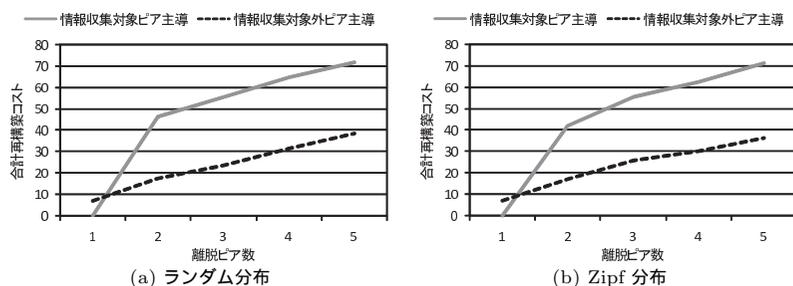


図 11 各分布における合計再構築コスト

Fig. 11 Reconstruction cost of all peers in each peer distribution.

領域の面積の変化が小さく、上位階層に参加するかどうかを判断する確率にほとんど変化がなかったためと考えられる。再構築コストについては、図 11(a)、図 11(b) から読み取れるように、1 ピア離脱した場合を除くと新規階層構築と同様の傾向を示している。1 ピア離脱した場合についてはすでに述べたように、情報収集対象ピア主導の手法では影響を受けたピア数が 0 であるため、再構築コストも 0 となっている。複数ピア離脱した場合、再構築手順は基本的に新規階層構築と同様の手順であることから、情報収集対象ピア主導の手法では各ピアあたりの再構築コストが大きく、情報収集対象外ピア主導の手法では再構築コストが小さいため、合計再構築コストは両手法でおよそ 2 倍の差が生じている。

以上を総合的に考えると、情報収集対象ピア主導の階層化はネットワーク全体に対して階層化による負荷が生じてしまうものの、同時に 2 ピア以上のピアの離脱が発生しない安定したネットワークであれば、ピアの参加にともなう再構築コストが生じないため適している

と考えられる。一方、階層化の初期段階や、参加や離脱が同時に 2 ピア以上発生する環境では、情報収集対象外ピア主導の階層化手法を利用することで、定期的に少量の新規階層ネットワーク構築、および再構築コストが生じるものの、ネットワーク全体に対する負荷を低く抑え、かつ、ピアの離脱に対する再構築コストを抑えることができる。

また、情報収集対象外ピア主導の階層化手法では、上位階層において選択されるピアの数が少ない場合、情報収集対象外ピアが多数存在することとなり、ネットワーク全体としてはコストが累積して大きくなるが、ドローンオーバレイネットワークではメンテナンスメッセージが定期的に発生しているため、階層化処理の対象となるピアの増加は大きな問題とならない。

5. おわりに

本研究では、各ピアが自身のボロノイ領域の面積に基づいて自律的に情報収集対象となるかを判断し階層構造を構築する、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指定した密度を満たすように領域全体から一様に情報収集対象となるピアを選択できる。すなわち、ピアを選択のために必要となる通信メッセージ数を 0 とすることができる。提案するドローンオーバレイネットワーク構築手法をセンサネットワークに適用し観測値分布をシミュレーション評価した結果、Zipf 分布によりピアが配置された環境において、等確率によるピア選択と比較して、PNSR の値として 2.6 dB 改善できることを確認できた。

今後の課題として次の 3 つがあげられる。まず、耐故障性についての検討が必要である。本研究ではピアの離脱にともなう再構築手法について提案しているが、提案した再構築手法は離脱ピアが周囲のピアに再構築要求を通知することで実行される。しかし、ピアの接続が突然切断されるような場合には対応できない。そのため、突然切断されたピアを検知した場合に、周囲のピアによりどのようにネットワークの再構築を行うか検討する必要がある。次に、隣接する階層間にリンクを構築することによるクラスタリング手法の検討である。提案した階層化ドローンオーバレイネットワークでは、各階層が独立してセンサ情報を発信する。しかし、実際の利用を考えると集約された値を要求されることも考えられる。たとえば、上位階層のボロノイ領域に含まれる下位階層のピアが上位階層のボロノイ領域を担当するピアをクラスタヘッドとしてクラスタを構築すると、上位階層のピアは自身のボロノイ領域内のセンサの代表者としてセンサ情報を発信できる。これにより、集約処理以外に外

れ値の除外なども容易に行えると考えられる。また、クラスタヘッドが離脱した場合の代替候補をクラスタ内から選出することで、ピアの離脱にともなう再構築をより効率的に行える可能性もある。最後に、上位階層ネットワークのショートカットリンクとしての利用の検討があげられる。提案した階層化ドローンオーバレイネットワークは上位階層ほどピア間の距離が長くなるため、遠隔地へのセンサ情報問合せ時に上位階層ネットワークを利用し、クエリを転送することで、効率的な問合せが可能になると考えられる。

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 年度および 21 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) Tobe, Y., Thepvilojanapong, N., Iwai, M., Yamada, K., Shiraiishi, Y., Takashio, K., Umeda, K. and Tamura, Y.: Overview of OSOITE, *International Workshop on Advanced Integrated Sensing Technologies for Safety and Security of Daily Life (IWAIST2008)* (2008).
- 3) 金子 雄, 春本 要, 福村真哉, 下條真司, 西尾章治郎: ユビキタス環境における端末の位置情報に基づく P2P ネットワーク, 情報処理学会論文誌: データベース, Vol.46, No.SIG18, pp.1-15 (2005).
- 4) 金子 雄, 春本 要: ノードの位置情報に基づくオーバレイネットワーク LL-Net の拡張, 電子情報通信学会第 19 回データ工学ワークショップ (DEWS2008) 論文集 (2008).
- 5) Shu, Y., Ooi, B.C., Tan, K.-L. and Zhou, A.: Supporting Multi-Dimensional Range Queries in Peer-to-Peer Systems, *Proc. 5th IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P'05)*, pp.173-180 (2005).
- 6) Morton, G.M.: A Computer Oriented Geodetic Data Base; and a New Technique in File Sequencing, Technical Report, IBM Ltd. (1966).
- 7) Aspnes, J. and Shah, G.: Skip graphs, *ACM Trans. Algorithms*, Vol.3, No.4, p.37 (2007).
- 8) 奥 智照, 西出 亮, 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, 日本データベース学会論文誌, Vol.7, pp.97-102 (2008).

- 9) Varvello, M., Biersack, E. and Diot, C.: Dynamic Clustering in Delaunay-Based P2P Networked Virtual Environments, *Proc. 6th ACM SIGCOMM Workshop on Network and Systems Support for Games (Netgames 2007)*, pp.105-110 (2007).
- 10) 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).

(平成 21 年 3 月 23 日受付)

(平成 21 年 11 月 6 日採録)

推 薦 文

本論文は、広域にわたるセンサ情報を効率的に収集するための階層化ドローンオーバレイネットワークの構成手法を提案している。提案手法は、各ピアの保持する情報からピアの分布密度を推測し、確率的にポロノイ領域を均一化するオーバレイ階層を生成するものであり、幾何学的なモデルを用いて数学的に手法の利点が示されている。本手法は今後様々なアプリケーションへの応用が期待でき、有用性も高いと考えられ推薦に値する。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 串田高幸)



小西 佑治

平成 19 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。平成 21 年同大学院情報科学研究科博士前期課程修了。在学中は P2P ネットワークに関する研究に従事。同年、株式会社アイ・エム・ジェイ入社。現在、株式会社 IMJ モバイルに出向中。



寺西 裕一 (正会員)

平成 5 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 7 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。平成 17 年大阪大学サイバーメディアセンター講師、平成 19 年同大学院情報科学研究科准教授、現在に至る。博士 (工学)。マルチメディア情報システム、ユビキタス応用システム等の研究開発に従事。IEEE 会員。



竹内 亨 (正会員)

平成 13 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。平成 15 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。平成 18 年同大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士 (情報科学)。同年同研究科マルチメディア工学専攻助手、平成 19 年同助教、現在に至る。ソーシャルネットワークを活用した情報システムの研究開発に従事。電気学会会員。



春本 要 (正会員)

平成 4 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 6 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻助手。平成 11 年大阪大学大型計算機センター講師、平成 12 年同大学サイバーメディアセンター講師を経て、平成 16 年同大学大学院工学研究科助教授となり、現在に至る。博士 (工学)。データベースシステム、マルチメディア情報システム等の研究に従事。電子情報通信学会、IEEE 各会員。



下條 真司 (正会員)

昭和 56 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 61 年同大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。同年大阪大学基礎工学部情報工学科助手。平成元年同大学大型計算機センター講師。平成 3 年同助教授。平成 10 年同教授。平成 12 年同大学サイバーメディアセンター教授。平成 20 年独立行政法人情報通信研究機構上席研究員。LAN のアクセス方式の性能評価、分散処理システムの性能評価、分散型オペレーションシステムの研究に従事。電子情報通信学会、ACM、IEEE、ソフトウェア科学会各会員。



西尾章治郎 (正会員)

昭和 50 年京都大学工学部数理工学科卒業。昭和 55 年同大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。京都大学工学部助手、大阪大学基礎工学部および情報処理教育センター助教授、大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻教授を経て、平成 14 年より大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻教授となり、現在に至る。平成 12 年より大阪大学サイバーメディアセンター長、平成 15 年より大阪大学大学院情報科学研究科長、その後平成 19 年より大阪大学理事・副学長に就任。この間、カナダ・ウォータールー大学、ビクトリア大学客員。データベース、マルチメディアシステムの研究に従事。現在、Data & Knowledge Engineering 等の論文誌編集委員。本会理事を歴任。本会論文賞を受賞。電子情報通信学会フェローを含め、ACM、IEEE 等 8 学会の各会員。