

# 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

奥 智照<sup>†</sup> 坪井 新治<sup>††</sup> 大西 真晶<sup>††</sup> 上島 紳一<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 関西大学総合情報学部

大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

<sup>††</sup> 関西大学大学院総合情報学研究科

大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

E-mail: †{fa40100,fb6m126,ueshima}@edu.kansai-u.ac.jp, ††ohnishim@nict.go.jp

あらまし 本稿では、平面上に存在するノード間を同程度のホップ数で結ぶ Skip Geo Network(SGN) とその分散構成アルゴリズムを提案する。SGN は、SkipGraph を用いた論理ネットワークとノードの位置関係により構成されるドローンネットワークのハイブリッドな階層構造を持ち、各ノードは、より近いノードから遠方ノードへのリンクを持つことができる。そのため、平面上に存在するノード間を同程度のホップ数で結ぶことができる特徴を持ち、ポロノイ図を利用した経路選択を行うことにより、マルチキャスト木を構成することができる特徴を持つ。SGN を用いて、相手ノードを指定した通信に加えて、目的地点の位置を指定したジオキャスト (Geocast) を行うことができ、(i) 与えられた平面上の任意地点への問合せや送信、(ii) 領域を指定した範囲内のノードへの問い合わせや送信などを行うことができる。SGN は、ノード間で P 2 P 型通信によりアドホックにネットワークを構成できるため、車両や人などの移動体などへの通信、仮想共有空間でのアバター間の通信、緊急時の情報散布などへ応用することができる。最後に、提案手法の有効性を確認するために数値シミュレーションにより、SGN のネットワークの特性とジオキャストの性能などについて検証する。

キーワード P2P, 階層型ネットワーク, ドローンネットワーク, SkipGraph, 自律分散生成アルゴリズム, ジオキャスト

## Generating Hierarchical Network for P2P GeoCast

Tomoteru OKU<sup>†</sup>, Shinji Tsuboi<sup>††</sup>, Masaaki Ohnishi<sup>††</sup>, and Shinichi Ueshima<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Informatics, Kansai University

Ryuzenji-tyo 2-1-1, Takatsuki-shi, Osaka, 569-1095 Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Informatics, Kansai University

Ryuzenji-tyo 2-1-1, Takatsuki-shi, Osaka, 569-1095 Japan

E-mail: †{fa40100,fb6m126,ueshima}@edu.kansai-u.ac.jp, ††ohnishim@nict.go.jp

**Abstract** In this paper, we propose Skip Geo Network(SGN), which is a scalable geographic network that connects computational entities or nodes in a 2D space by constant P2P hop counts. SGN has a hybrid structure of hierarchical logical networks and Delaunay networks generated by using geographical coordinates. In SGN, each node has a long routing paths compare to method without SGN. We can obtain a feature of Multicast tree by utilizing Voronoi Region to rooting paths. It enables, Geocast to specified points or regions, and range queries with  $\log(N)$  hop counts. SGN can generated by P2P communication among nodes in ad-hoc network, and we expect that it is applicable to locationoriented systems, such as virtual collaborative spaces and MANET. We propose an autonomous generation algorithm of SGN and evaluate network parameters and geocast parameters of SGN by numerical simulations.

**Key words** P2P, Hierarchical Network, Delaunay diagram, SkipGraph, autonomous generation algorithm, GeoCast

# 1. はじめに

最近、ノードの位置を利用した幾何的通信法に関する研究が盛んである [1] ~ [4]. 特に、ジオキャスト [5] は、物理的なノードの位置情報を用いてユニキャストやマルチキャストを行う技術であり、指定された位置に存在するノードにのみ、メッセージを配信する技術として注目を集めている. ジオキャストは、実空間や仮想共有空間での車両や人、アバターなどのモバイルホストへの通信、インターネットなどの基盤ネットワーク上のオーバーレイ、固定資源を持たない MANET 環境でも有効であることが指摘されている [3] ~ [5].

このような背景で、我々は、ノードの位置関係を利用した幾何的ネットワークとして、計算幾何の分野でよく知られるドロネー図をトポロジーとして持つ P2P ドロネーネットワークを提案し、その P2P 方式による自律分散生成アルゴリズムを与えた [6]. このネットワークは、ノードの地理的な近傍関係に基づいて構成されるため、スケーラビリティに優れ、新規ノードの参加・脱退に対して頑健である.

また、遠隔ノードへのアクセスに対して、ボロノイ領域の幅を基準とした 2 次元の遠隔接続経路 (LRC) の P2P 方式による構成法を提案し、通信ホップ数を低減する試みを行った [7]. しかし、ノードが部分的に密集するなど、ノードが平面上に偏って分布する場合に、(i) 転送効率が低下する、(ii) LRC の再構成コストが高い、(iii) 大きなボロノイ領域を持つノードの負荷が大きくなり、特にノードの分布が疎な領域に存在するノード群に負荷が集中しやすい、などの点の改善が課題となっていた. これらは、LRC の実環境への適用を考慮すると問題となると考えられる.

そこで、本稿では、確率的にノードを選択して得られる部分ノード集合を用いてドロネーネットワークを多重に積層化した、Skip Geo Network (以下、SGN とする) を提案する.

SGN は、論理ネットワークと平面ネットワークのハイブリッドな構成を持ち、SkipGraph [8] の論理識別子が作る論理ネットワークと、連携する 2 次元平面空間でノードの位置座標を用いたドロネーネットワークの両者を階層化して構成されている. また、SGN は、論理ネットワークと平面ネットワークの両方ともノードの自律分散的な通信によって生成される. これにより、階層的なネットワーク構造が積層的に構成され、上位層になるほど、より地理的な遠隔ノードと接続関係を持つドロネーネットワークが構成される.

本稿では、SGN を利用したノード間の幾何的ルーティング法を定義し、地理的座標や地理的範囲を指定した P2P 型ジオキャストの実現法を与える.

さらに、提案ネットワーク構造の幾何学的データ特性、ならびに幾何的ルーティングに関する遠隔ノードへのアクセス特性について数値的に評価し、提案手法の有効性を検証する.

2 章では、SGN の基本的な考え方、および構成法について述べる. 3 章では、本手法を用いたルーティングの特性、4 章で任意領域への P2P 型ジオキャストについて述べる. 5 章でシミュレーション評価を示し、6 章で関連研究について述べる.

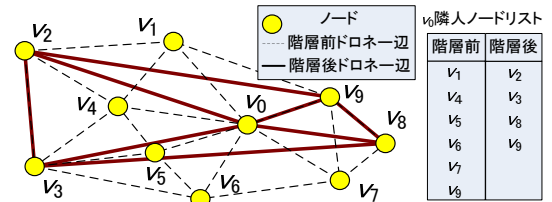


図 1 ドロネーネットワーク階層化  
Fig. 1 Delaunay network for base nodes and Delaunay network after probabilistic node selection

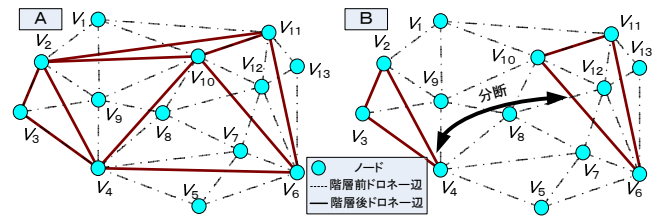


図 2 [A] 正常な上位階層 [B] 分断した上位階層  
Fig. 2 [A] Proper Delaunay networks for selected nodes  $v_2, v_3, v_4, v_6, v_{10}, v_{11}$  [B] Invisibility between two separate Delaunay networks for selected nodes  $v_2, v_3, v_4$  and  $v_6, v_{10}, v_{11}$

## 2. 提案手法

### 2.1 ノードの前提

ノードは以下の条件を満たすものとする. すなわち、

(1) ノードは、自律的で等価な通信主体であり、基盤ネットワークの上に存在するものとする. また、各ノードは論理 ID ならびに自身の平面上の位置情報を保持するものとする.

(2) ノードは、隣接ノードとの隣接関係を隣人表に保持する. これにより基盤ネットワークの上にオーバーレイネットワークを定義することができる. 隣人表に格納されている隣人ノードのデータとしては、隣人ノードの論理 ID ならびに平面上の位置座標を持つものとする.

P2P ドロネーネットワークでは、従来の P2P ネットワークと異なり、空間の位置座標を陽に取り扱うため、第 2 の前提が必要である. また、隣人ノードとの通信により、常にこれらのデータは取得できるものと仮定する.

### 2.2 構成要件

P2P ドロネーネットワークでは、隣人ノードがノード間の地理的な隣接関係によって決定されるので、局所的なノード分布の粗密に依存せず、安定的な次数を持つネットワークを構成できる特徴がある [6]. また、遠隔経路接続のために構成された [7] では、ノードの偏った分布の際に負荷が集中するノードが存在することや、再構築負荷が大きくなるなどの問題点があった.

これらの問題点を克服し、さらに P2P ドロネーネットワークを基礎ネットワークとして組み込んだ構造を持つ、スケーラビリティを備えた新しいネットワーク構造を設計する上での技術的な要件は以下の通りである.

(1) (遠隔アクセス性) 遠隔地アクセスに必要なホップ数が低く抑えられる.

(2) (弾力性) ノードの新規参加・脱退に頑健であり、弾力

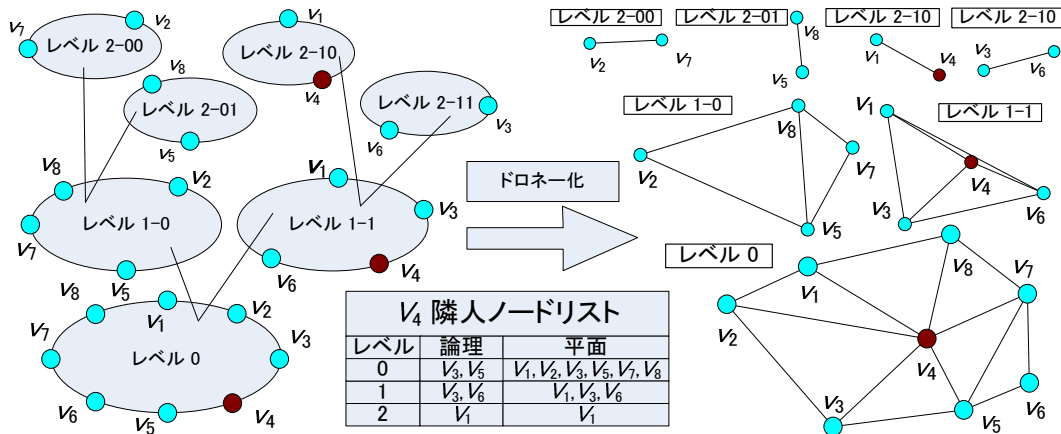


図 3 SGN:論理ネットワークと平面ネットワーク

Fig. 3 SGN: hybrid hierarchical structure of Logical and Delaunay networks

的にネットワークを再構成できること。

(3) (アプリケーション性) ネットワーク層以下のプロトコルに依存せず、オーバーレイで経路選択やマルチキャストなどのアプリケーションプロトコルを構成できること。

(4) (自律分散性) 局所的なネットワークの組み合わせにより、ボトムアップにネットワーク全体を構成できること。

(5) (負荷分散性) ノードの偏った分布に対しても LRC の再構成負荷の増加や、特定のノードへの負荷が集中しないこと。

(6) (低次数性) 各ノードの隣人表が低く保たれること。

(7) (地理的特性) ネットワーク層のプロトコルに依存せず、ノード志向のアプリケーションを作成するため、地理的欲張り法や位置に基いたデータ格納手法が定義されている。

以上のような要件を満足するため、以下の手順に従う方法も用いて複合型のネットワーク構造を構成する。

(i) 確率的なノード選択: ネットワークの部分に依存せず一様に遠隔経路を構成できるように、確率的なノード選択により、平面上のノードの分布に応じたノード配置を得る。

(ii) ドロネー隣人ノードの決定: 次に、選択されたノード間のネットワークを決定する。すなわち、各ノードの近傍のノード集合を決定する。これにより、各ノードの位置情報に基づくドロネー隣接関係を導出することができ、対応する層でのノード間の接続を決定する (図 1)。

(iii) 階層化: (i)(ii) を繰り返して、ネットワークを階層化する。

図 1 では、 $v_0, v_2, v_3, v_8, v_9$  が確率的に選択され、階層化ドロネーネットワークが生成されている。また、同図左の表は  $v_0$  の保持しているドロネー隣人への経路表である。以後、階層後のネットワークを階層元のネットワークと比較して上位層または上位階層、階層後のネットワークと比較して、階層元のネットワークを下位層と呼ぶこととする。

### 2.3 論理ネットワークと平面ネットワーク

P2P ドロネーネットワークは局所的な部分ネットワークの組み合わせによって構成されるネットワークであり、連結性を前提として、P2P 通信方式で構成される。連結性とは、ネットワークが連結グラフの性質を持つことであり、任意 2 点間に経路が存在することを意味する。上位階層を生成する際には、ドロ

ネネットワーク上で階層化ノードを探索し、連結性が保証できれば、自律分散的に新しい階層のドロネーネットワークを生成することができる。階層化ノードを探索する一手法としてフラッディングにより階層化ノードを探索する方法があるが、ドロネーネットワーク上でフラッディングを行うと輻輳が発生するため、生成コストが大きくなる。また、輻輳を回避するため、探索するノードを制限すると、階層化するノードが互いに発見することが出来ず、上位層においてドロネーネットワークが分断する場合がある。

図 2 は、上位層でのネットワーク連結性がなくなりドロネーネットワークが分断する例である。ノード  $v_2, v_3, v_4, v_6, v_{10}, v_{11}$  は、それぞれ上位階層のノードとなるべきであるが (図 2[A]), 同一層に存在していながら、互いに発見することができず、 $v_2, v_3, v_4$  と  $v_6, v_{10}, v_{11}$  で構成される 2 つのドロネーネットワークに分かれている (図 2[B])。そこで、階層化においてネットワークの分断や冗長な通信を回避するため、連結性を保証する 1 次元の論理ネットワークの階層化を行ない、次に、各層でできる論理サブネットワークをもとに、平面上のドロネーネットワークを自律分散生成アルゴリズムにより構成する。これにより階層化ドロネーネットワークを生成する。

図 3 に、論理ネットワークと平面ネットワークの対応を示す。左図が 1 次元の階層化論理ネットワークであり、各階層で環状に繋がった 1 次元の論理サブネットワークを基に、右図の平面ネットワークをドロネー図状に構成する。ノード  $v_4$  における階層手順を例にあげると、まず  $v_4$  は 1 次元論理ネットワークの左側の隣人である  $v_5$  に問い合わせを行う。しかし、 $v_5$  は階層化ノードではないので、さらに  $v_5$  の左隣人である  $v_6$  に問い合わせを行う。 $v_6$  は階層化ノードであるので、 $v_4$  と上位層において論理ネットワークの接続を確立する。この方法を各ノードが左右隣人両方ともに問い合わせを実行することにより、論理ネットワークを階層化する。詳細な生成手順については次節で述べる。また、1 次元の論理ネットワークを用いて階層化することにより、ドロネー上で階層化するよりも冗長な通信が減少することが期待できる。

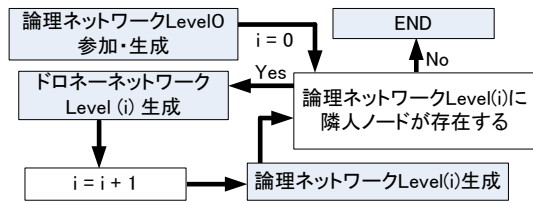


図 4 SGN の構成アルゴリズム

Fig. 4 algorithm

## 2.4 自律分散生成アルゴリズム

先に述べたように、論理ネットワークの階層化された部分ネットワークを利用して SGN を構成する (図 4)。論理ネットワークの部分ネットワークの隣人が存在しない、すなわち、その部分ネットワークが 1 ノードになったときドローンを生成せず、階層化を終了する。論理ネットワークとドローンネットワークの階層化手順を以下に示す。

### [I] 論理ネットワークの階層化

ここでは、SkipGraph [8] に似た構造を持つ、論理ネットワークの階層化生成法について述べる。ノードの論理 ID としてメンバーシップベクトルを用い、1 次元の環状ネットワークを構成する (図 3 左)。論理ネットワークではレベル 0 のノードがメンバーシップベクトルにより、レベル 1-0 とレベル 1-1 の部分ネットワークに分裂する。さらに、レベル 1-0 ネットワークは同様にレベル 2-00 とレベル 2-01 のネットワークに分裂を行う。これにより、1 次元環状ネットワークから確率 1/2 で、2 つの部分環状ネットワークを構成することができる。さらに次のビットを調べ、これらの操作を繰り返すことにより、部分環状ネットワークからさらに部分環状ネットワークを生成する。

同様にして、論理 ID の各ビットを前から調べ、上で得られた部分環状ネットワークを更に 2 つに分化することを繰り返し、部分ネットワークに含まれるノードが 1 ノードになるまで階層化を続ける。

### [II] 各層でのドローンネットワークの作成

各層において、生成した連結論理ネットワークを用いて、隣人ノードの位置座標と自身の位置座標を比較し、局所三角化、委譲、三角通知の動作を繰り返すことで自律分散的に平面上のドローンネットワークを生成することができる [6]。層ごとに行うことで、階層化ドローンネットワークを生成することができる。結果として、各ノードの隣人表には、各層のドローン隣人の論理 ID とその位置座標を格納することができる。

## 2.5 特徴

SGN は、ドローンネットワークが積層的に積み上げられたネットワーク構造を持つ。各層のネットワークは、SkipGraph と P2P ドローンネットワークの持つ性質を継承しているため、ノードの新規参加・脱退が容易であり、局所的な影響に留まる。また、詳細は 3.2 節に述べるが、各ノードはネットワーク上の 1 ホップの接続関係を持ち、上位層のドローン隣人は下位層のドローン隣人に比べ、より遠方のノードへの接続関係となることを期待できる。ここで、遠隔経路が生成できることをポロノイ領域から考察する。ポロノイ領域とは、ノードの中で最も平面

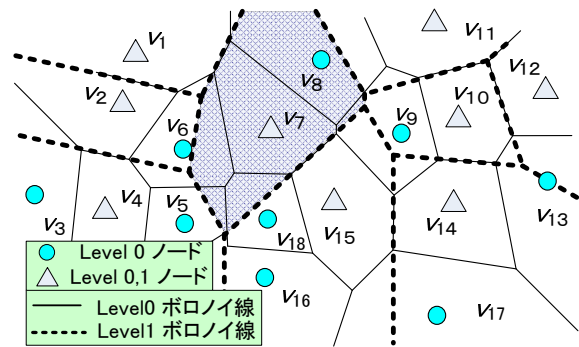


図 5 階層化によるポロノイ領域の拡張

Fig. 5 Extension of Voronoi regions for both Level 0 nodes and Level 1 nodes in a hierarchy

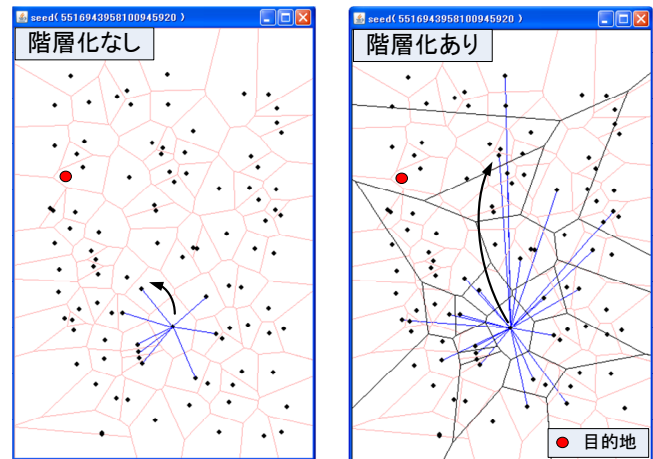


図 6 全階層ドローン隣人の射影と欲張り法

Fig. 6 Union of Delaunay neighbor nodes of all levels and without hierarchy on a geographic plane

上で近い点の集合であり、ドローン図とは双対関係にある。また、ポロノイ領域は全ノードと垂直 2 等分線を引きその最も内側の領域として求めることができる。そのため、層が増加する毎に、ノード数が低減するとより遠くのノードと垂直 2 等分線を引くため、階層化することにより、上位の階層はより大きな平面の分割を与えており、より広い範囲での幾何学的経路選択ができることが期待できる (図 5)。同図では、レベル (i) の上位接続として、レベル (i+1) のノードが構成されるため、上位層で構成したポロノイ領域が大きくなり、隣接するノードとの地理的距離も大きくなることが確認できる。

なお、参加・脱退についての詳細は本稿では省略し、以下に本提案手法の特徴をまとめる。

- 階層化ドローンネットワークは、平面上でノードの分布に依存せず自律分散的に生成でき、ノードが密に分布する部分ではより細かいノード間接続が得られ、疎に分布する部分ではいノード間接続が得られる。
- ネットワーク弾力性が保持されている。ノードの新規参加・脱退に対してノードの書換えが局所的に留まり、ネットワークへの影響が小さい。
- 幾何学的経路選択を用いても、特定のノードにアクセスが集中しない。



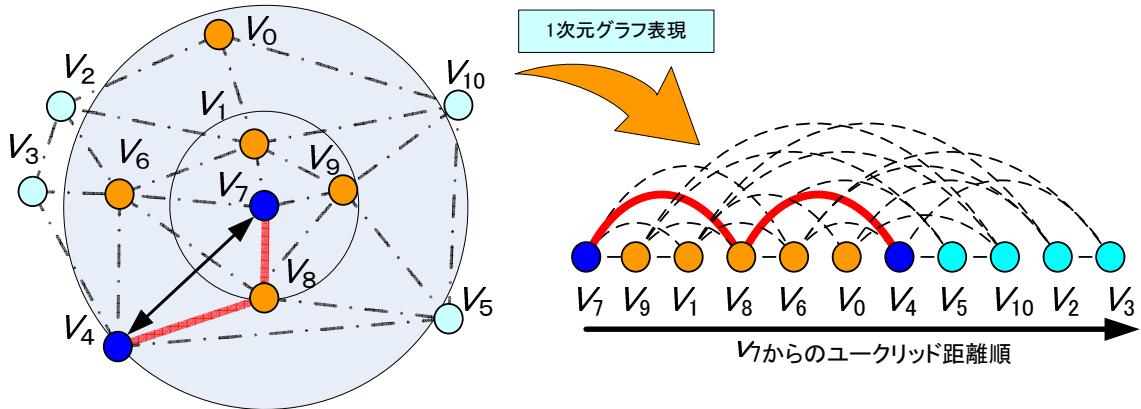


図7  $v_7$  から残りユークリッド距離順に並べた1次元グラフと欲張り法  
 Fig. 7 Remaining Distance from  $v_7$  in 1 dimensional Graph and Greedy Routing

### 3. SGNにおけるP2P型経路選択法と性能

本章では、階層化ドローンネットワークを利用して、幾何学的欲張り法による経路選択を行う手順について述べる。ここでは、出発ノードと目的地の位置座標が与えられたものとして、目的地や目的領域に対する経路選択手順を説明する。

但し、本稿では論理IDによる通信については、考慮しないものとする。これは、P2Pドローンネットワークが測位技術を利用した幾何学的経路選択を目指したものであることに因る。

#### 3.1 任意地点へのジオキャスト

前述の欲張り法を用いた、SGNでの任意目的地点へのデータ配信について述べる。各ノードは、全階層のドローン隣人の中から、目的地に対して平面上の残存距離が最も近いノード（対象ノード）に通信パケットを転送する（図6）。図6左は階層化なしの場合、図6右は階層化ありの際の欲張り方を示した図である。転送を行うノード（転送ノード）は自身の隣人ノードと自身を含めて仮想的にボロノイ図を生成する。これは、欲張り法により通信を行うことは、転送ノードが仮想的に生成したボロノイ図の中で、目的地点のボロノイ領域を保持するノードに転送を行うことと同義であるためである。そのため、階層化を生成した際には、階層化無しの場合に比べるとより細かいボロノイ図の分割がされているため、より近いノードに対して転送を行えることが期待できる。また、最下層のみ（階層化なし）で目的地ノードへ到達できることがわかっているのでこの手法で転送を繰り返せばよいことがわかる。

[注意] 上記の方法では、残りのユークリッド距離はホップ毎に必ず減少するが、目的地ノードを周回しながら到達する場合も存在する。

#### 3.2 SkipGraphの適用条件

##### 3.2.1 欲張り法による目的地への経路ノード

前節で述べたように、欲張り法における経路選択では、各ノードが残りのユークリッド距離が最小となる隣人ノードに対して転送を行う。図7はドローン図における、 $v_4$  から  $v_7$  への欲張り法を簡潔に示した図である。また、同図右は目標ノードを  $v_7$  とし、仮想的に残りユークリッド距離順に左から並べたグラフであり、同図左のドローン図とはグラフ的に同型である。

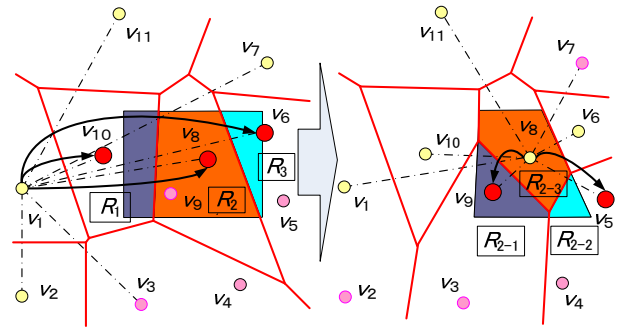


図8 再帰的な転送によるジオマルチキャスト  
 Fig. 8 Reflexive and dynamic generation of multicast tree in Geomulticast

ノードを仮想的に残りのユークリッド距離順に1次元に整理することは、目的地を中心としてノードまでのユークリッド距離を半径とする円を描き、その内側から順に並べることと同義で、欲張り法では、転送ノードがこの円の半径が最も小さくなるノードを選択してホップするとも言える。一方、目的地までのユークリッド距離が自ノードよりも短いノード全てが欲張り法において経由する可能性のあるノードと考えると、同図左では、 $v_7$  と  $v_8$  とのユークリッド距離を半径とする円内に存在するノード数が、 $v_7$  から  $v_4$  のそれと比べて確実に減少していることが分かる。よって、 $v_4$  からのホップ先である  $v_8$  では、経由する可能性のあるノード数は確実に減少すると言える。また、図7右の様に、仮想的に目的ノードを一番左とした際、ドローンネットワークの各ノードは必ず左向きの経路を保持するため、欲張り法を用いてホップした先のノードから経由する可能性のあるノード数、および残りのユークリッド距離は、必ず減少する。

##### 3.2.2 SGNにおける最大ホップ数

階層化を行わないドローンネットワークにおいて、欲張り法における目的ノードへのホップ数が最大になる時（最大ホップ数）は自ノードよりも目的地からのユークリッド距離が短いノード全てを経由するときである。図7左の外側の円内のノードは  $v_4$  よりも  $v_7$  にユークリッド距離が近いノードである。同図の欲張り法では、 $v_8$  のみを経由することにより目的ノードに到達しているが、最大ホップ数は、外側の円内に存在するノ

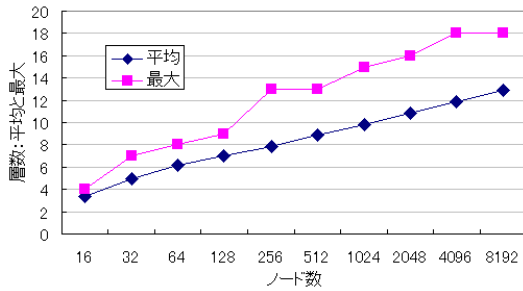


図 9 ノード数に対する層数の平均  
Fig. 9 Average count of node layer

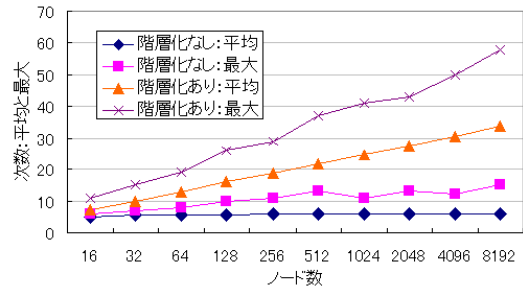


図 11 ノード数に対する次数の平均と最大  
Fig. 11 Average and maximum of node degree

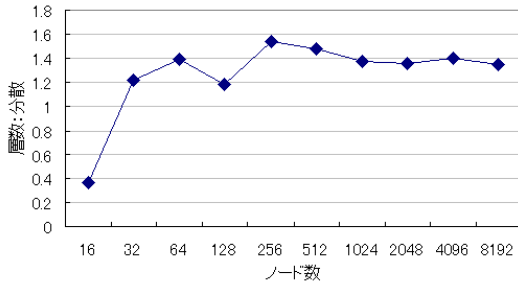


図 10 ノード数に対する層数の分散  
Fig. 10 Variance count of node layer

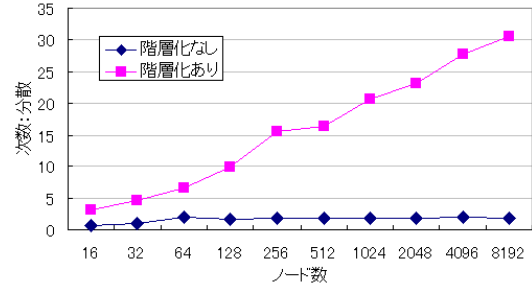


図 12 ノード数に対する次数の分散  
Fig. 12 Variance of node degree

ド  $v_0, v_6, v_8, v_1, v_9$  全てを経由する時である。階層化なしのドロネーネットワークにおいて欲張り法を行う際に、目的ノードまで1つずつしか近づけない接続関係を保持していることは、SkipGraphにおけるレベル0の様に、前後のノードしか接続関係を保持していない構造と同型であると考えられる。そのため、本手法はドロネー図を階層化しているが、1次元の論理ネットワークにSkipGraphに似た構成法を使用しているため、最大ホップ数の平均はSkipGraphと同様に  $O(\log N)$  であると言える。(以後  $N$  はノード総数を示す。)

[補足] ドロネーネットワークにおいて、自ノードよりも目的地へのユークリッド距離が短いノード全てを経由しなければならないことは珍しいが、ドロネーネットワークの接続を仮想的にSkipGraphにおける遠隔経路と考えると、階層化により目的地へのホップ数は  $O(\log N)$  になることが期待できる。

#### 4. 領域へのP2P型ジオキャスト

目的範囲をポロノイ管理領域に含むノードを配信の対象ノードと呼ぶ。任意領域へのジオキャストは発信ノードから、複数の対象ノードへ向かって構成されるマルチキャスト木をたどることにより配信される。このマルチキャスト木は、対象ノードの位置を目的地点とする複数のジオキャストと考えられるため、同一転送方法で構成でき、経由するノードが自身の持つ全階層のドロネー隣人の中から適切なノードへと通信パケットの再転送を繰り返すことで前進的に構成される。つまり、発信ノードを根とするマルチキャスト木を動的に構成しながら葉の方向へ順次転送されることにより、配信が行われる。

任意領域へのジオキャストの再帰的な転送の様子を図8を用いて説明する。同図は、ノード  $v_1$  が目的範囲矩形にジオマルチ

キャストを行う場合の例である。 $v_1$  は、各階層のドロネー隣人である。 $v_2, v_3, v_6, v_7, v_8, v_{10}, v_{11}$  と自身を母点とする仮想のポロノイ図を構成し、矩形をそのポロノイ図で分割する。分割した範囲を、領域  $R_1, R_2, R_3$  とし、それぞれを  $v_{10}, v_8, v_6$  へと転送する。 $R_2$  の転送を受けた  $v_8$  は、自身の各階層のドロネー隣人である  $v_1, v_5, v_6, v_7, v_9, v_{10}, v_{11}$  と自身を母点とする仮想のポロノイ図によって、 $R_2$  を  $R_{2-1}, R_{2-2}, R_{2-3}$  に再分割する。 $v_8$  は、自身の管理領域に  $r_{2-3}$  を含むため、 $R_{2-1}, R_{2-2}$  のみを、それぞれ  $v_9, v_5$  へ転送する。このように、各ノードが再帰的な転送を繰り返すことで領域へのジオキャストを行う。例では、矩形を目的範囲としているが、円や多角形のような領域でも同様である。

ポロノイ図は平面を被覆する形で構成されているため、それを管理領域とするノードへ配信を行うことで配信範囲を被覆するように配信できることがわかる。また、発信者は目的範囲に存在するノードの数や論理IDを知っている必要はなく、その範囲のみを与えるだけでよいこともわかる。

#### 5. シミュレーションによる評価

本章では、SGN構築後のネットワーク特性、利用時の効果について評価する。なお、ノードは  $[0,1] \times [0,1]$  の正方領域に一樣分布させることを想定する。

##### 5.1 SGN構築後のネットワークの特性

###### 5.1.1 ノード特性

ノード数ごとに階層化後の各ノードの層数の平均と分散を示す(図9, 10)。確率  $1/2$  で上位層の同一空間に存在するノードを選び出すため、層数の平均は  $N$  の指数的な増加に対して一定の増加になっており、 $\log(N)$  に比例している。また、分散も低く

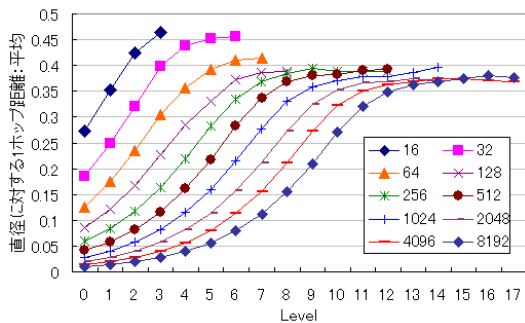


図 13 レベルごとの直径に対する1ホップの地理的距離の平均  
Fig. 13 Average of 1hop Direction

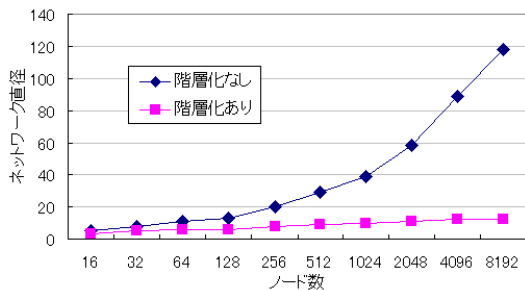


図 14 ノード数に対するネットワーク直径  
Fig. 14 Network diameter

抑えられている。これは、論理ネットワークを基にドローネネットワークを生成しているためであり、Skiplist や SkipGraph の特性と同様である。

図 11, 12 に階層化を行う場合と行わない場合における、 $N$  に対する各ノードの次数の平均と最大および分散を示す。階層化なしの場合の次数は、 $N$  に関わらず平均が 6 程度であり、次数も低くなっている。これは、ドローネ図の幾何学的特徴を示している。一方、階層化ありの場合、次数の平均と最大は  $N$  の指数的な増加に対して一定の増加となっている。これは、各層でドローネネットワークを構成しドローネ隣人を選出しているため、層数の増加に比例した値となっている。また、次数の分散も  $N$  の増加に伴い増加している。これは、以下の 2 つが原因と考えられる。

- ドローネ図では外周ノードは、内側にいるノードより次数が少なくなることが多く、各階層で次数の差が生じること。
- 下位層でドローネ図の外周となったノードは上位層でも外周となる。また、階層化していくと各ノードはいつか外周ノードとなる。そのため、平面の中央付近から外側へ向かうにつれて外周ノードとして存在する層数に差が生じること。

### 5.1.2 エッジ特性

本稿では、経路選択手法として幾何的欲張り法を用いているため、ネットワークエッジの地理的距離の観点から評価を行う。各階層ごとに、ネットワークの地理的直径に対する1ホップの距離の平均を図 13 に示す。各  $N$  において、階層の増加に伴い1ホップの距離は指数的に増加し、 $\log(N)$ Level 付近から増加が収束に向かっている。これは、階層化時に新たなドローネ隣人に接続できる場合は、より地理的に遠距離なノードと接続で

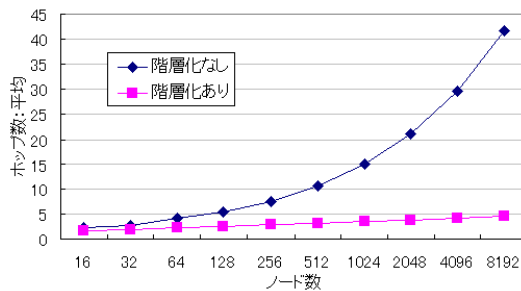


図 15 ノード数に対するホップ数の平均  
Fig. 15 Average of hop counts

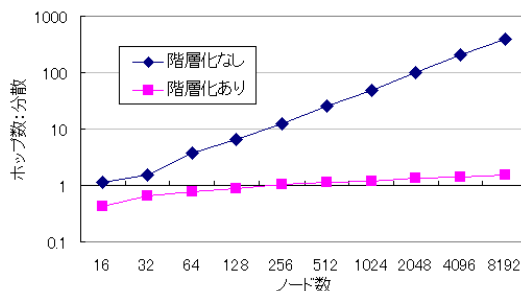


図 16 ノード数に対するホップ数の分散  
Fig. 16 Variance of hop counts

きるが、階層 Level が  $\log(N)$  付近では隣人が減少するのみであるため、1ホップの距離が収束すると考えられる。このことにより、階層化することにより平均的に1ホップの地理的距離が長くなっていることが確認できる。

### 5.1.3 グラフ特性

ここでは、 $N$  の増加に対するネットワーク直径の観点からネットワーク全体の評価を行う(図 14)。

[注意] ここで、ネットワーク直径は、任意2点間で欲張り法による経路選択を行ったときの最大ホップ数経路を指す。任意2点間の最短ホップ数経路の最大値ではない。

階層化なしの場合、ネットワーク直径は  $N$  の増加に比例して増加しており、 $N=8192$  のとき 118 であった。これは、 $N$  の増加により、2ノード間の経路上に存在するノード数が増加するためである。一方、階層化ありの場合、 $N$  の指数的な増加に対し一定の増加に留まっており、 $N=8192$  のとき 12 であった。これにより、階層化によりネットワークの直径を  $\log(N)$  程度に下げられたことが確認できる。

### 5.2 利用時の効果

SGN の利用時の性能評価のため、任意の2ノード間でジオユニキャストを行い、ホップ数の計測した。 $N$  を変化させたときのすべての2ノードの組み合わせで計測を行い、階層化なしの場合とありの場合のホップ数の平均と分散を図 15, 16 に示す。

ホップ数の平均は、階層化なしの場合は  $N$  の指数的な増加に比例して増加しているのに対し、階層化ありの場合は一定の増加に留まっている。5.1.3 節で述べたネットワーク直径の結果と同様である。さらに、ホップ数の分散では、階層化なしの場合は  $N$  の増加に比例して増加しているが、階層化ありの場合は低くほぼ一定である。このことから、階層化を行った場合には 3.2 節

で述べたように、任意の2ノード間を  $\log(N)$  ホップでジオキャストできることが確認できる。

## 6. 関連研究

仮想空間や実平面を P2P ネットワークで利用するためには、空間・平面をノード(ピア)で管理する必要がある。特に、平面上のネットワークングにおいて、スケーラブルな管理手法が必要で、更に、弾力性を保つネットワークの構成法が必要である。

Harvey らはノードの新規参加・脱退に対して、負荷分散、弾力性のあるネットを構成する方法として、Skiplist [9] を環状に用いることにより、ノード毎に確率的にリンクを決定する Skipnet [10] を提案している。

また、Ooi ら [11] は、空間を空間充填曲線の1種である  $z$  曲線で1次元 ID 付けし、skipnet を用いた P2P ネットワークにより管理する手法を提案し、範囲問い合わせなどへの応用について議論している。

特に、Eppstein ら [12] は、Skiplist を用いて平面上のノード位置を含む部分矩形を管理する手法として、圧縮4分木を提案している。同構造は、平面上のノードの存在に対して、対象平面を再帰的分割を行い、パスを圧縮した4分木を拡張した階層的データ構造であり、ノード自身の位置を管理することが可能であるが、ノード間のネットワークングやノード間の通信を目的としたものではない。

ドロネー図を用いた階層化ネットワークとして、Libeherr ら [13] らは、平面におけるマルチキャストネットワークとして、ドロネー図を用いた階層ネットワークの構成法を与えている。ここでは、上位層のネットワークノードが階層のドロネーネットワークとなる入れ子構造となっており、マルチキャスト木が構成しやすい反面、上位層ノードの負荷が大きくなる欠点がある。これに対して、提案手法では、各層でノードが空間に分散されるため、ノードの分布に関係なく、負荷が分散される。

さらに、ジオキャストの実現法としては、ボロノイ図を用いた Stojmanovic ら [3], [4] や、Baccelli らの広域ネットワークへの応用として、マルチキャスト木の確率的階層化について議論している研究がある [14]。

Navas ら [5] は、GPS より得られる位置座標を用いたアドレスを考慮し、IPv6 への組み込みを視野に入れてジオキャストを IP オーバーレイで構成することを提案している。Imielinski [15] はインターネット上に、GEO ルーターを配備して、パケットの送信先として、平面上の位置、円、多角形対象とした通信方式を提案している。しかし、各 GEO ルーターは、多角形の共通部分を抽出する手順でルーティングし、遠方へは GEO ルーター間の階層構造を用いており、我々の P2P 方式のように、ノード毎にドロネー図によるグリディルーティングを用いているわけではないし、P2P 方式を用いているわけでもない。

## 7. おわりに

本稿では、P2P ドロネーネットワークを階層化するための自律分散生成法と、利用法として P2P 型ジオキャストについて述べた。さらに、シミュレーションにより、SGN の特性と幾何的経

路選択法での利用効果について評価した。SGN では、任意2点間のホップ数を低減することができ、仮想共有空間や MANET など、位置情報をキーとして扱う環境に対して応用可能性を確認した。

今後は、SGN の生成負荷やノードの追加・削除時の再構築負荷の評価、ジオマルチキャストの評価、さらに、前稿の帯 LRC との性能比較が必要である。また、他研究との比較や種々のアプリケーションへの適応の検討も課題である。

## 文 献

- [1] G. P.-J. W. Y. W. Xiang-Yang Li, Calinescu: “Localized delaunay triangulation with application in ad hoc wireless networks”, vol 14, pp. 1035–1047 (2003).
- [2] F. Araújo and L. Rodrigues: “GeoPeer: A Location-Aware Peer-to-Peer System”, Proceedings of the 3-rd IEEE International Symposium on Network Computing and Applications(NCA'04), pp. 39–46 (2004).
- [3] I. Stojmenovic: “Position-based routing in ad hoc networks”, IEEE Communications Magazine, vol 40, pp. 128–134 (2002).
- [4] Y.-B. Ko and N. H. Vaidya: “Geotora : A protocol for geocasting in mobile ad hoc networks”, Network Protocols, 2000. Proceedings. 2000 International Conference on, pp. 240–250.
- [5] J. C. Navas and T. Imielinski: “Geocast-geographic addressing and routing”, Mobile computing and networking, pp. 66–76 (1997).
- [6] 大西真晶, 源元佑太, 江口隆之, 加藤宏章, 上島紳一: “ノード位置を用いた p2p モデルのためのドロネー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, SIG4(TOD29), pp. 51–64 (2006).
- [7] 大西真晶, 坪井新治, 平山雅夫, 江口隆之, 上島紳一: “P2p ドロネーネットワークにおける遠隔接続経路の自律分散生成法”, 情報処理学会論文誌. データベース, vol 48, SIG11(TOD34), pp. 190–214 (2007).
- [8] J. Aspnes and G. Shah: “Skip graphs”, SODA '03: Proceedings of the fourteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, pp. 384–393 (2003).
- [9] W. Pugh: “Skip lists : A probabilistic alternative to balanced trees”, Communications of the ACM, vol 33, pp. 668–676 (1990).
- [10] N. J. Harvey, M. B. Jones, S. Saroiu, M. Theimer and A. Wolman: “Skipnet: A scalable overlay network with practical locality properties”, the 4th USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems (USITS '03), vol 4, p. 9 (2003).
- [11] K.-L. T. Yanfeng Shu, Beng Chin Ooi and A. Zhou: “Supporting multi-dimensional range queries in peer-to-peer systems”, Peer-to-Peer Computing, 2005. P2P 2005. Fifth IEEE International Conference on, pp. 173–180.
- [12] D. Eppstein, M. T. Goodrich and J. Z. Sun: “The skip quadtree : A simple dynamic data structure for multidimensional data”, 21st ACM Symp. Comp. Geom, pp. 296–305 (2005).
- [13] J. Liebeherr and M. Nahas: “Application-layer multicast with delaunay triangulations”, Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM '01. IEEE, vol 3, pp. 1651–1655 (2001).
- [14] F. Baccelli, D. Kofman and J. Rougier: “Self organizing hierarchical multicast trees and their optimization”, INFOCOM '99. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, vol 3, pp. 1081–1089 (1999).
- [15] J. N. T. Imielinski: “Gps-based addressing and routing”, Request for Comments.