

# 確率的階層化ドロネーオーバーレイの分散構成手法の検討

大西 真晶<sup>†</sup> 井上 真杉<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 独立行政法人 情報通信研究機構 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1

E-mail: <sup>†</sup> {ohnishim, inoue}@nict.go.jp

**あらまし** 本検討では、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)の分散構築アルゴリズムについて検討する。SGN は、Skip Graph 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ネーオーバーレイ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、ボ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。しかし、Skip Geo Network の構築手法としては、環状ネットワークを前提とした構築手法のみしか提案されておらず、適用において様々な制約が存在するものと考えられる。そこで、本検討では既存の構成アルゴリズムの問題点について整理し、ドロネーオーバーレイネットワーク上への直接的で分散的な構成手法の基本的なアイデアについて述べる。

**キーワード** 構造化オーバーレイ, ドロネーグラフ, Skip Graph, ジオキャスト

## A study on the distributed formation algorithm of delaunay overlay network with a stochastic hierarchy

Masaaki Ohnishi<sup>†</sup> and Masugi Inoue<sup>†</sup>

<sup>†</sup> National Institute of Information and Communications Technology

4-2-1, Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

E-mail: <sup>†</sup> {ohnishim, inoue}@nict.go.jp

**Abstract** In this paper, we study a distributive generation algorithm of Skip Geo Network(SGN). It 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 Skip Graph and delaunay overlay networks generated by using geographical coordinates. In SGN, each node has a long routing paths compared with the methods without SGN. Therefore, it has the characteristic that multicast tree can be formed by utilizing voronoi region to routing paths. However, there is only one algorithm using a ring network as the construction technique of SGN, which makes its application limited. In this paper, we elaborate the problem of the existing algorithm, and also provide the fundamental idea of the organization technique of direct and dispersive SGN on the Delaunay overlay network.

**Keyword** Structured Overlay network, Delaunay graph, Skip Graph, Geo cast

### 1. はじめに

近年、空間上の位置に基づいたネットワーク構成法やルーティング手法の研究が盛んである[1,2,3,4]。特に[1]では、相対近傍グラフの一つであるドロネー図状の接続を持ったネットワークの利用アイデアについて述べている。ドロネー図は主に計算幾何学の分野での研究対象であり、位置に基づく多種の検索が可能なデータ構造として利用可能である。例えば、任意の位置に対する最近傍点探索、k-NN 探索、範囲領域探索などのデータ検索を行うことができる。この様な特徴に基づき、[1]では各ノードの空間上の位置に基づいたドロネー図における接続関係をオーバーレイネットワークのノード間の接続関係として用いれば、位置に基づくル

ーティング、いわゆるジオキャストリングが可能であることを指摘している。また MANET 研究の分野でも空間データ構造を用いたネットワーク構造について研究されており、ドロネー図状のネットワーク構造についても研究されている[4,5]。

著者らも、ドロネー図の空間データ構造としての有用性に着目し、オーバーレイネットワークの一形態である P2P ネットワークにドロネー図の構造を用いた P2P ドロネーネットワークを提案し、その具体的な分散構成法を提案した[6]。またドロネーオーバーレイネットワークの階層的な構造化及び範囲検索ルーティング手法の研究として、帯状 LRC 構造と構築手法、その上での範囲検索クエリ手法[7]や、確率を用いた階層構造であ

る Skip Graph[8]をドローネーオーバーレイネットワークに応用した Skip Geo Network を提案し、その上での範囲検索クエリ手法について提案した[9,10]. しかし、これまで提案していた Skip Geo Network の構成法では、各 Level のネットワークにおける接続のトポロジが連結グラフ状で無くてはならない. この構成法では、各 Level において環状ネットワークを維持し続ける為のシグナリングを行う必要があり、物理層で行われる通信負荷が増大する. 具体的には、ノード数  $N$  個での Skip Geo Network 中のノード数 2 前後で構成される部分ネットワークだけで、 $N/2$  個程度以上存在し、これらの内部でのシグナリングの負荷が物理網を行き交う. また、初期状態として環状のネットワークを必要とするは、P2P ネットワークに対して常に環状ネットワークの構築機構を要求する. これは、より物理網寄りのネットワーク層を仲介にオーバーレイネットワークを構成する際（例えば[11]）に制限となり得る. 更に初期の環状ネットワークから Skip Geo Network を構成できても、その後、Skip Geo Network が崩れた場合に修復が不可能な場合が考えられる.

そこで本研究では、環状ネットワークを用いた Skip Geo Network 構成法の欠点について整理し、ドローネーオーバーレイネットワーク上に Skip Geo Network を構築する分散的なアルゴリズムについて検討し、その基本的なアイデアを示す. 2 章にて、Skip Geo Network の従来の構成法について考察し、3 章で新たに提案する構成手法の基本的な考え方について述べる. 4 章では、提案手法の手順について大まかに述べ、5 章では提案手法を用いた場合のネットワークが構成される様子について例を用いて述べる. 6 章で、まとめを述べる.

## 2. 従来の Skip Geo Network 構成法について

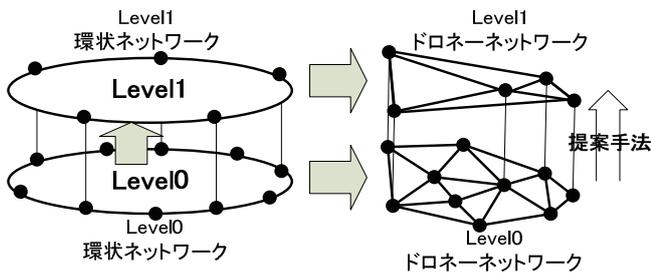


図 1 : 従来手法と提案手法の比較

図 1 に、従来手法と提案手法の比較を示す. 従来手法では、必ず Level0 の環状ネットワークを構成し、その後、Level1 以上の環状ネットワークを構成する必要があった. 図左では、黒矢印にて Level0 ネットワークから、Level1 環状ネットワークと Level0 ドローネーオーバーレイネットワークが、Level1 環状ネットワークが生成される様子を示している. 今回提案する新手法は、Level0 ドローネーオーバーレイネットワークから Level1 ド

ローネーオーバーレイネットワークを構成する手法であり、環状ネットワークを必要としない.

### [Skip Geo Network の従来構成手法]

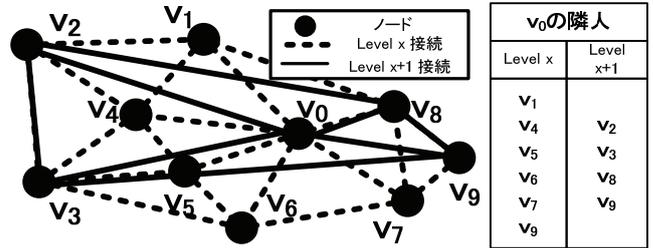


図 2 : Skip Geo Network の基本構造

図 2 に Skip Geo Network の基本構造を示す. まず、 $v_0$  から  $v_9$  のノードによるドローネーオーバーレイネットワークを Skip Geo Network における、ある Level  $x$  のネットワークとして示した. 更に、それらのノードを 2 分の 1 の確率で二つのグループに分けたものとして、そのうち  $v_0, v_2, v_3, v_8, v_9$  のグループから作成される Level  $x+1$  のドローネーオーバーレイネットワークを重畳して示した. この Level  $x+1$  のネットワークを構築することにより、2 分の 1 以下の HOP 数でのグリーディルーティングによるパケット転送が可能であり、更に Level  $x+2, x+3$  と新たに上の Level の分割されたノードグループによるドローネーオーバーレイネットワークを構築していくことにより最終的にノード数  $N$ , グループ分け時のグループ数が  $a$  の時に  $O(\log_a N)$  程度のホップ数で目的地に到達できるようになる.

### [従来構成手法の問題点]

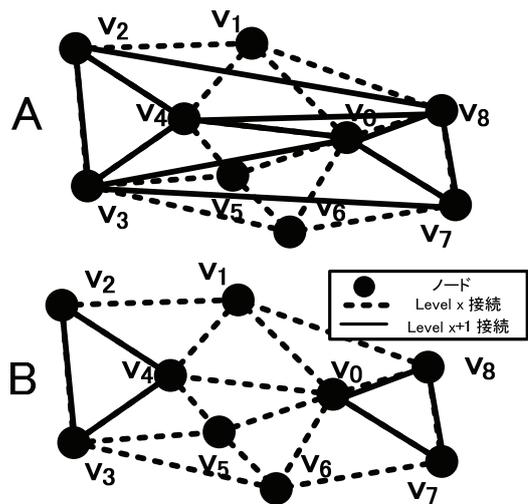


図 3 : Skip Geo Network の分断

従来の Skip Geo Network 構成手法[10,11]では、オーバーレイネットワークにノードが追加される際に、まず

Level0 の環状ネットワークに追加される．そこに Skip Graph の構築アルゴリズムを適用して環状の Skip Graph を構成した後，各サブネットワークにおいてドロネーオーバーレイネットワークを構成していた．この構築手法には，必ず環状ネットワークが必要になり，ノードの追加，削除に対応する為のノード間のシグナリングが，Skip Geo Network だけでなく，環状の Skip Graph についても必要になる．更に図 3 に示すようなサブネットワークの分断についても問題になる．図 3 A では  $v_0, v_2, v_3, v_4, v_7, v_8$  により構成される Level  $x+1$  のネットワークのリンクを実線により示した．この中の  $v_0-v_3, v_0-v_4, v_7, v_8, v_2-v_4, v_2-v_8, v_3-v_7$  の 5 つのリンクが何らかの理由で切断されてしまった場合に，図 3 B のようになり，Level  $x+1$  のネットワークが分断されている．

この場合，ドロネーオーバーレイ構成機構が動作しても，機構のアルゴリズムの動作前提である連結グラフであるという前提が崩れている為にリンクの修復はされず分断したままである．Skip Graph であれば，1 つ小さい Level の環状ネットワークに沿ってシグナリングを行い隣接する同じグループのノードを探し出すことによって修復可能であるが，Skip Geo Network の従来構成法では，Level  $x$  のドロネーオーバーレイネットワークから，Level  $x+1$  を共に構成するノードを探し出す手法が提案されておらず，同様にはできない．また，環状の Skip Graph を併設したとしても，これを使っの Skip Geo Network の分断は検知は困難である．確かに Skip Graph における隣人に対するシグナリングを，分断を検知したい Level のドロネーオーバーレイネットワークを使って行うことにより，分断の検知を行うことも考えられるが，この場合，Skip Graph における隣人探索による分断検知と違い各ノードが送るシグナリングのホップ数がどの程度になるか予測できない．

### 3. 提案構成手法のポイントとなる処理

以下に，本研究で提案するドロネーオーバーレイネットワーク上への Skip Geo Network 構成手法の基本的な考え方について述べる．Skip Geo Network 構成において最も重要な手法は Level  $x$  のドロネーオーバーレイネットワーク上への Level  $x+1$  のドロネーオーバーレイネットワーク構成法である．この構成法さえあれば，Level0 のドロネーオーバーレイネットワークの上により高い Level のドロネーオーバーレイネットワークを構築していけば，Skip Geo Network が構成される為である．**[Level  $x+1$  ネットワーク構成法の基本的な考え方]**

まず，図 4 にドロネーオーバーレイネットワークの一例を示し，更なる，その上のノードグループの一例を示す． $v_1$  から  $v_{23}$  までのノードで Level0 のドロネーオー

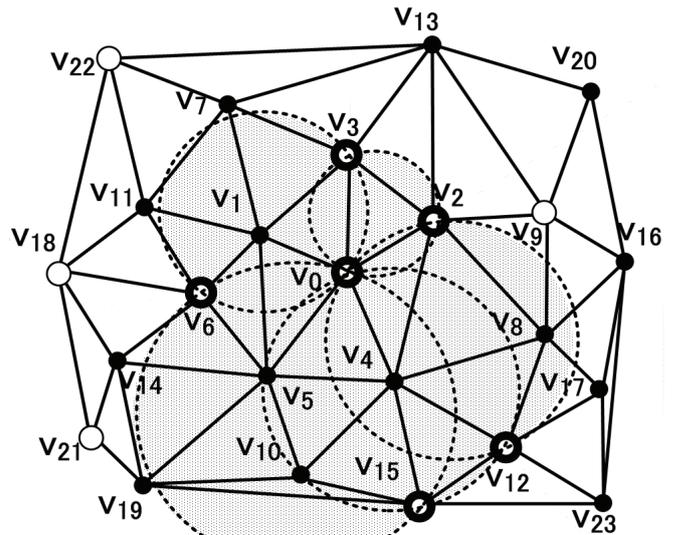


図 4 :Level  $x+1$  において  $v_0$  と接続されるノードの例  
バレイネットワークを構築しており，黒い辺は，その際のノード間の接続を表現している．白丸のノードは，Skip Geo Network において Level1 での同じグループに属するノードである．この白丸のノードグループで一つのドロネーオーバーレイネットワークを構成した場合， $v_0$  との三角形を構成するノードは，縁取りが太い白丸で表現したノードである．また網かけ部分は，それらの三角形の外接円部分を表している．尚，ノード番号は  $v_0$  に距離が近い順に割り当てた．

初期状態において， $v_0$  が Level1 で結ぶ候補は， $\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{22}, v_{23}\}$  というノード全てであり，この候補集合から，一つ一つ取り出して Level1 のドロネーオーバーレイネットワークにおける仮の隣人として  $v_0$  の仮のボロノイ領域を求める．新しいノードを取り出す度に，仮の隣人に加えて局所的な外接円判定によって隣人を絞り込むことができ，候補集合からノードが全て無くなった時に  $v_0$  の Level1 ドロネーオーバーレイネットワークにおける隣人が確定する．ドロネーオーバーレイネットワークにおいて，ノード情報を順に得る為には  $k$ -NN クエリを Level0 ドロネーオーバーレイネットワーク上で使用すればよい．ノード全てに対して距離の近い順に問い合わせを送ることが可能であり，候補集合からノードを順に取り出す行為と同様のことが行える．

ただ，候補集合の大きさはノード数  $N$  から  $v_0$  自身を除いた  $N-1$  である． $N$  の数が大きい場合に，これら全てについて隣人判定を行うことは現実的では無い．そこで，仮の隣人ノードによる局所的なボロノイ領域，ドロネー三角形分割を求めつつ，これに影響を与えないことが確定した候補ノードについては候補からふるい落とすことを考えたい．例えば，図 4 において縁取りの太い白丸ノードの中で最も遠いノードは  $v_{15}$  であり，これ以降のノードで網掛け内部に入るノードは無い． $k$ -NN クエリにより近い順にノード情報を取り寄せ

ながら局所ドロネー図を作成し、 $v_{15}$ まで調べ上げた時点で、それより遠いノードが網掛け部分に入らないことを確認することができれば、それ以降を調べる必要はなくなる。そこで、次に **k-NN クエリ手法**と、それによって得られるノード情報を利用して作られる  $v_0$  隣人候補ノードのふり落とし手法について検討する。

[k-NN クエリ]

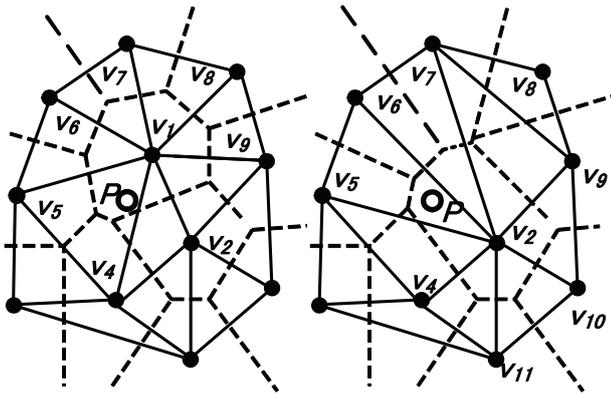


図5:点 P を含むボロノイ領域を持つノードとその周囲のノード

図5に、点 P とその周辺のノードによるドロネー図を示す。点 P の最近傍の点は  $P_{2P}$  ドロネーオーバーレイネットワーク上でグリーディルーティングを行うことにより発見可能である。左図では点 P は、 $v_1$  のボロノイ領域に含まれており、グリーディルーティングで発見することが可能である。更に  $v_1$  に問い合わせることで  $v_1$  と接続関係にあるノードの情報を得ることができる。さて、この時仮に、 $v_1$  が離脱するとドロネーオーバーレイネットワークは右図の様に変化する。ドロネー図において、あるノードが離脱した場合、そのノードが管理していたボロノイ領域は、隣人のボロノイ領域で分けあうこととなる。

この理由は以下の通りである。 $v_0$  の隣人となっていないノードは  $v_0$  とボロノイ領域を接していないということがボロノイ図、ドロネー図の定義より明らかである。それは、自身のボロノイ領域を他のいずれかのノードにより狭められた結果であり、その自身のボロノイ領域を狭めたノード群のボロノイ領域内に  $v_1$  と自身の上に垂直二等分線を引いた場合にできる  $v_1$  側の領域が完全に含まれているということである。つまり、 $v_1$  の離脱により放棄される可能性がある領域は全て他のノードのボロノイ領域に吸収される。

さて、 $v_1$  が抜けた後の様子を示した図5右を見た場合、 $v_2$  が点 P を領域内に含んでいる。このことから、 $v_1$  の次に  $v_2$  が点 P に近いことが分かる。当然  $v_2$  が抜ければ、次に近いのは  $v_2$  の隣人である  $v_3$  から  $v_{11}$  までのいずれかのノードである。つまり、最も点 P に近

いノードをグリーディルーティングで探索し、情報を得た後、その隣人のリストを作成すれば、次に近い可能性のあるノードを6個程度のノード数まで絞って得ることができる。そこから更に次に近いノードの情報を得て、そのノードの隣人情報を得れば、更に次に近いノードの候補を6程度に絞って得ることができる。

以上の処理をクエリパケットのルーティングにより行うことは、おそらく可能である。

[隣人候補ノードのふり落とし手法]

図6に隣人候補の存在し得ない領域を示す。 $v_1$  と  $v_2$  は  $v_0$  のドロネー隣人である。図6左は、 $v_0-v_1$  の延長線と  $v_1-v_2$  と  $v_0-v_2$  の延長線の間挟まる領域を表している。この領域の内側にあるノードは、 $\triangle v_0, v_1, v_2$  以外の頂点として  $v_0$  を含む三角形の  $v_0$  以外の2点と

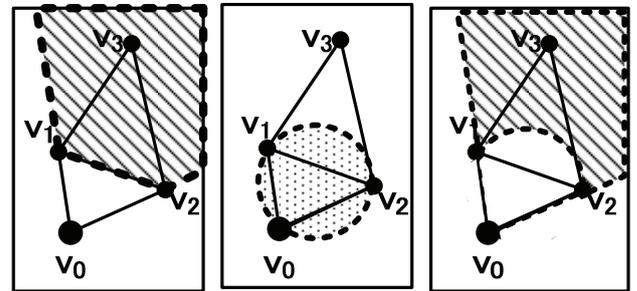


図6：隣人候補の存在し得ない領域

接続して、二つの三角形が接した四角形を作った時、凹四角形になりフリップ処理が起こり得ない。つまり、この領域は、 $v_1$  と  $v_2$  が存在する時点で他の  $v_0$  の隣人判定に影響を及ぼさなくなる。また図6中には、 $v_0, v_1, v_2$  の外接円を示した。この中に点が存在すれば、 $v_0$  の隣人候補ノードが変化する。つまりこの中に他のノードが存在するかは調べなくては行けない。以上の2点より、図6左の領域から図6中の領域を差し引いた図6右の領域が、 $v_0, v_1, v_2$  以外の三角形のフリップ判定とは無縁で且つ  $v_0, v_1, v_2$  のフリップ判定にも影響を及ぼさない範囲となる。

4. 生成処理の手順

[提案処理の概要]

提案処理のアイデアは以下である。**k-NN クエリ手法**における探し出す隣人の個数を無限に取り、ノード情報を近い順に集め続ける。このままであると、全てのノード情報を集めるまで処理が終了しない。そこで新しいノード情報が加わる毎に局所ドロネー化を行い隣人候補リストの更新を行う。その隣人候補により隣人による三角形を作り、3章で示した隣人候補の存在し得ない領域を計算する。通常、得た近傍ノードの隣人を次の探索候補とするが、その探索候補の中で隣人候補の存在し得ない領域に属するノードを外して次の候補を探索する。隣人候補が増えるに従って、遠い領域が

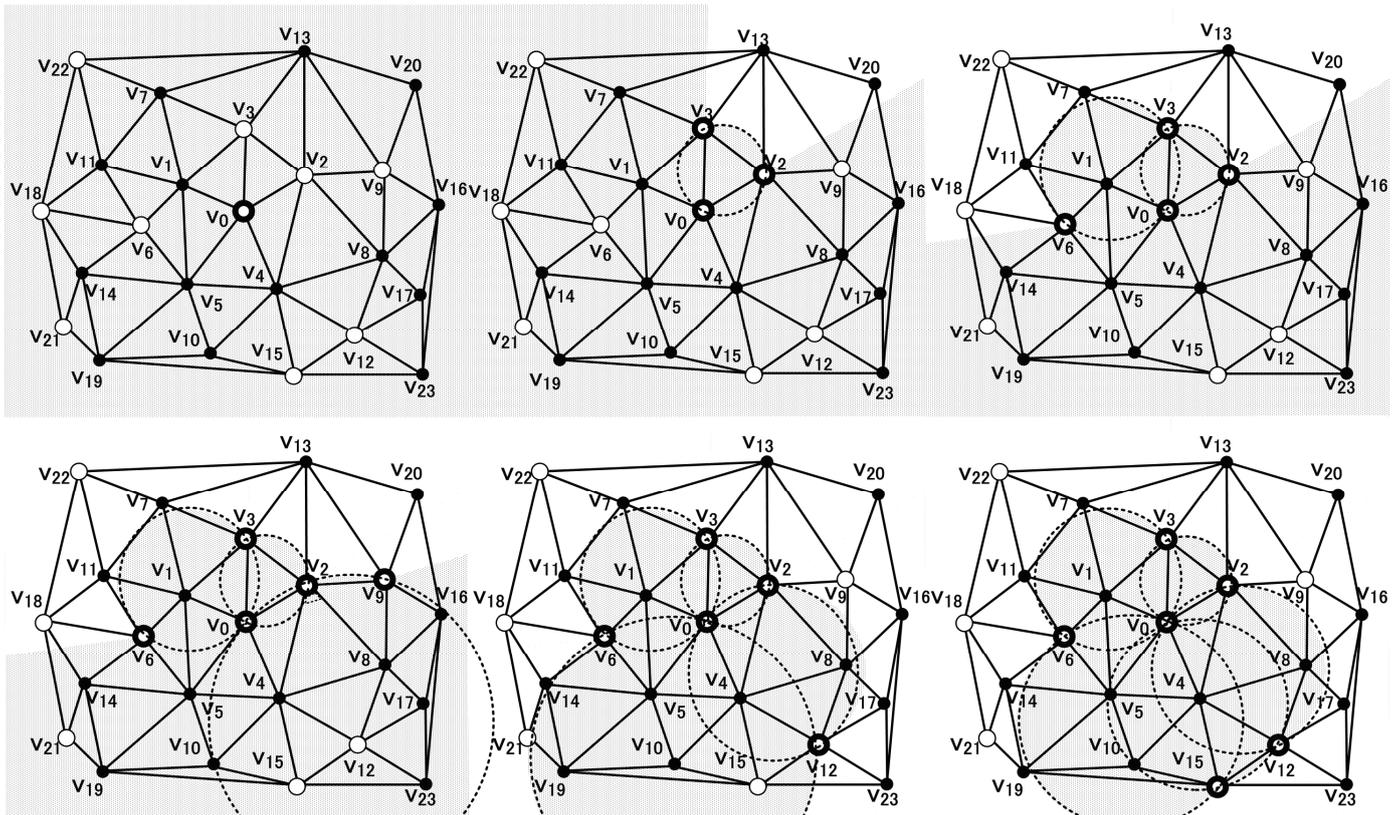


図 7：提案処理による処理過程の例

次第に隣人候補の不存在領域となっていく。また近い部分に存在する領域内のノードの情報も次第に集まり、必要なフリップ処理が起こり非隣人と確定させることのできるノードが増加していく。

最終的に候補ノードが全て不存在領域に含まれ候補が完全に無くなる。k-NN クエリでは候補ノードは、近い順である為、近いノードが全て不存在領域に含まれれば、それより遠いノードは全て不存在領域に存在することが推測できるようになり調べる必要がなくなり処理を止める。

### 5. 提案処理による処理過程の例

図 7 に提案アイデアによる処理過程を示した。全ての点はノードを表現しておりノードには  $v_0$  から近い順にナンバーを振っており、 $v_1$  から  $v_{23}$  までである。黒い辺はノード間の接続を表現している。この接続は最も基本となるドロネーオーバーレイネットワークを表現している。更に、その中でも白丸のノードが、ある共通のノードグループに属しているノードである。白丸の縁取りが太いノードは  $v_0$  との隣人候補ノードであり、 $v_0$  と仮の隣人関係を構成する。網掛け領域は、もし、その領域内の何処かにノードが存在すれば、その時点での仮の局所ドロネー接続関係を変化させるという領域である。図 7 左上では、 $v_0$  は白丸ノードの情報を一つも得ておらず、全ての領域を探索する必要があ

る。図 6 中上は、 $v_1, v_2, v_3$  の情報を k-NN クエリによって得ることにより、三角形  $v_0, v_2, v_3$  という追加層における仮のドロネー三角形を得ている状態を示しており、また、それにより  $v_{13}, v_{20}$  が隣人候補から外れている。図 7 右上では  $v_6$  まで情報を収集し、その情報から  $v_7, v_{11}, v_{18}, v_{22}$  が候補から外れたことを示している。最終的に図 7 右下の様になり、 $v_{15}$  までノード情報を取得し、更にその先の k-NN クエリとしての候補が全て候補外の領域に存在する状態になって処理が停止する。

### 6. まとめ

本検討では、従来の Skip Geo Network 構築手法の問題点について述べ、その解決方法のアイデアについて述べた。検討手法により、ロバスト性の確保や、従来手法では適用が不可能であるアドホック性の極めて高い MANET や無線メッシュの初期リンク生成や制御といった領域へのアルゴリズムの応用が可能になる。

だが本検討はアイデアを述べただけであり、詳細な手順の定義やシミュレータによる検証を行う必要がある。

オーバーレイネットワーク上への他の階層構造ネットワーク構成手法としては小西らが[12]において、屋外に設置された温度センサノードを対象とした手法を述べている。地理的近傍に設置された温度センサが近

い温度を示すことを利用して、代表的なセンサを選んでドロネーネットワークを構築し、クエリを発行する際、最終的にパケットが到達するノードの数を削減している。これは、クラスタリングと階層化を同時に行う手法として評価できる。

また筆者らは、将来的なセンサ利用サービス、モバイルサービス提供プラットフォームの提案している[13,14]。高スループットで低維持コストの無線メッシュベースのネットワークを必要としており、そのネットワーク構造として空間近傍関係に基づくネットワーク構造を模索している。この上でのジオキャストや属性検索などの位置や特徴空間上での特徴量をキーとした名前解決システムを模索しており、本研究の適用を検討したい。

## 文 献

- [1] F. Araujo, L. Rodrigues, "GeoPeer: A Location-Aware Peer-to-Peer System", Proc. 3-rd IEEE Int'l Symp. Network Computing and Applications, pp.39- 46 (2004)
- [2] 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, pp.1-15 (2005)
- [3] Xiang-Yang Li, Calinescu, G., Peng-JunWan, YuWang, "Localized Delaunay Triangulation with Application in Ad Hoc Wireless Networks", IEEE Trans. Parallel Distrib.Syst., Vol.14 No.10, pp.1035 - 1047 (2003)
- [4] I. Stojmenovic, "Position-Based Routing in Ad Hoc Networks", IEEE Communications Magazine, Vol. 40, pp.128- 134 (2002)
- [5] Navas, Julio C. and Imielinski, Tomasz, "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, 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 No. 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 ドロネーオーバーレイ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 No.SIG11(TOD34), pp.190- 214 (2007)
- [8] James Aspnes and Gauri Shah, "Skip graphs", SODA '03: Proc. 14th annual ACM-SIAM Symp. on Discrete algorithms, pp.384- 393 (2003)
- [9] Tsuboi, S., Oku, T., Ohnishi, M., and Ueshima S., "Generating Skip Delaunay Network for P2P Geocasting", 6-th Int'l Conf. on Creating, Connecting and Collaborating through Computing (C5), pp.179- 186 (2008)
- [10] 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", DEWS2008 D3-5, (2008)
- [11] 平山雅夫, 大西真晶, 上島紳一, "迂回経路を用いたドロネーオーバーレイネットワークの提案と検討", DEWS2008 D7-2, (2008)
- [12] 小西佑治, 寺西裕一, 春本要, 竹内亨, 下條真司, 西尾章治郎 "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" 情報処理学会 マルチメディア通信と分散処理 (DPS) 研究報告, Vol.2008 No.91, pp35 -40(2008)
- [13] 井上真杉, 大西真晶, 森野博章, 実藤 亨 "マネージド無線メッシュによるセンサアプリケーションプラットフォーム" 電子情報通信学会技術研究報告 USN2008-55 pp.99-104, 2008 年 10 月.
- [14] 大西真晶, 李 睿棟, 彭 超, 井上 真杉 "無線メッシュ網のネットワークトポロジを基にした性能評価モデルに関する検討" 電子情報通信学会技術研究報告 AN2008-45 pp.93-98, 2008 年 10 月.