

遅延状況を考慮した 構造型 P2P オーバレイネットワーク構築法

木谷友哉^{†1} 中村嘉隆^{†2}

P2P サービスはネットワーク上のノードにコンテンツやリソースを分散配置しているため、高いスケーラビリティを達成している。これらのリソースを利用する際は、ネットワーク上でリソース位置を検索する必要がある。一般にこのようなサービスの検索では分散ハッシュテーブルがよく用いられる手法であるが、限られた範囲を指定した検索など、検索目的によっては効率が悪くなることが知られている。そこで本稿では、範囲検索を実現するために、各ノードの地理情報をもとに各ノード間の遅延変動を考慮した構造型 P2P オーバレイネットワークを構築するプロトコルの提案を行う。提案手法では、ばねの原理を用いて遅延変動を考慮した座標設定を行ない、座標を空間充填曲線にマッピングすることで効率的な P2P ネットワークの検索を実現している。

A configuration method for structured P2P overlay network considering delay variations

TOMOYA KITANI^{†1} and YOSHITAKA NAKAMURA^{†2}

P2P networks can achieve high scalability since they distribute service contents/resources to multiple nodes in the network. In a P2P network, it is necessary to search the resource location on the network when we use some contents/resources. Generally, each part of contents is labeled and dispersed in the network, and it is managed by a distributed hash table (DHT). But search efficiency becomes worse in the limited region search of such service. In this paper, we propose a new configuration method for structured P2P overlay network. In the proposed method, we set each coordinate considering delay variation and achieve the efficient search of P2P network by mapping a coordinate onto space filling curve.

1. はじめに

近年、情報通信技術の発展に伴って、携帯電話やノートパソコンなどのモバイル端末が無線通信でネットワークに接続されることが多くなり、モバイルコンピューティング社会の実現が可能となってきている。それにより、モバイル端末のユーザは、特定の場所や時間に依存することなく、いつでもどこでもインターネットメールや画像、動画等のマルチメディアコンテンツの取得が可能になった。また、来たるユビキタスコンピューティング社会では、生活空間に埋め込まれた大量のセンサや、自動車に搭載された端末などもネットワークに接続され、膨大な量の端末によってネットワークが構成されることが予想されている。

このような大量の端末に対して高い品質のサービスを提供するためには、現在のコンピュータネットワークで主に用いられているサーバ・クライアント型のサービス提供形態ではサーバへの負荷が集中し、スケーラビリティを保つことが難しい。そのため、各端末が自律的にデータを分散管理し、他の端末と直接通信してサービスの提供を行う Peer-to-Peer (P2P) ネットワークが注目を集めている。代表的な P2P ネットワークとして Gnutella¹⁾ や大容量のフリーソフトウェアや映画コンテンツなどを配信する BitTorrent²⁾ などが挙げられる。サーバ集中型のサービス提供アーキテクチャと比較して、P2P ネットワークでは、各端末が情報を維持するためやネットワーク環境の変化に対応するための機構が必要であるが、端末ノードやネットワークの負荷を分散することで、数百万のノードで構成されたネットワークでもサービスを提供することが可能である。

一方、ユビキタスコンピューティング社会では、ユーザの地理情報を利用して適切なサービスを選択するロケーションウェアサービスや、その場に埋め込まれたセンサの状態なども考慮して適切なサービスを選択するコンテキストウェアサービスなどが利用可能となる。また、現在の携帯電話端末や車載ナビゲーションシステムの多くは GPS(Global Positioning System) を搭載しており、各ユーザの位置情報は容易に取得可能となっている。P2P オーバレイネットワークの構築に地理的情報を利用した手法としては、LL-net³⁾ などがある。LL-net は地図上のエリアを階層的に分割してオーバーレイリンクを設定する構造型 P2P オーバレイネットワークである。しかし、エリア管理のための特殊なノードの存在を仮定する必

^{†1} 静岡大学
Shizuoka University

^{†2} 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

要があることや、ノード分布による検索効率の悪化などの問題がある。

また、位置情報のような多次元空間の情報を ID のような一次元空間にマッピングするための手法として空間充填曲線が知られている。ルベグ曲線 (Z-Ordering)⁴⁾ のような単純な手法は空間充填の効率が悪く、充填効率のよい曲線は計算コストが高くなるというトレードオフがある。

そこで本稿では、各ノードの地理情報をもとに、各ノード間の遅延変動を考慮した構造型 P2P オーバレイネットワークを構築する手法の提案を行う。提案手法では、ノードの地理情報及びノード間のリンク遅延に基づいて各ノードの空間座標を設定し、空間充填曲線を用いて一次元にマッピングする。この空間充填曲線を用いてリソースやコンテンツの検索を行なう。また、このときバネの原理を用いてリンク遅延の変動を座標に反映することで、構築する P2P オーバレイネットワークにも遅延変動を反映させる。

2. 関連研究

Peer-to-Peer(P2P) 技術はアプリケーションレベルのネットワークを構成して集中サーバなしにピア間の直接通信によってルーティングや検索などを行い、リソースを分散共有する技術である。このアプリケーションレベルネットワーク(オーバレイネットワーク)は物理層ネットワークとは独立に構成され、その構造から構造型オーバレイネットワーク、非構造型オーバレイネットワークに分けられる。初期の P2P には非構造型オーバレイネットワークが用いられており、Gnutella¹⁾ や BitTorrent²⁾ などが代表的な技術として挙げられる。一方、構造型オーバレイネットワークは P2P ネットワーク上でのリソース検索などを効率よく行うことができ、近年多くの研究がなされている。特に分散ハッシュテーブル(DHT:Distributed Hash Table)を用いた技術が代表的で、Chord⁵⁾、CAN(Content Adressable Network)⁶⁾、Pastry⁷⁾、Tapestry⁸⁾ などが知られている。従来の非構造型 P2P オーバレイネットワークでは、情報の検索はフラッディングベースで行うが、構造型 P2P オーバレイネットワークでは、効果的にルーティングが行えるため、100%近い検索成功率を達成することができる。

また、構造型オーバレイネットワークの構築について、下層の物理リンクの状態を用いてその効率を改善しようとする試みもいくつかなされている。文献 9) では ISP 内でのオーバレイノードの配置や ISP の選択について計測ベースのヒューリスティックな方法を用いることで、オーバレイネットワークを物理層の障害から切り離すフレームワークを提案している。Laptop¹⁰⁾ は経路情報のキャッシュを利用し、また各ノードと親ノードの連結性のみ

を維持することでオーバレイネットワークの効率、スケーラビリティ、ロバスト性を改善している。LTM¹¹⁾ は効率の悪い接続を切断し、IP アドレスに基づいて物理的な近傍ノードを論理的な隣接ノードとして選択することで、効率的なオーバレイネットワークを構築している。Mithos¹²⁾ では、DHT とともに最短経路情報を用いることで、近傍ノードとの接続性を効率的に提供し、メッセージ送信のオーバーヘッドを最小にすることを達成している。文献 13) では、*Network Coordinates* (NC) を用いてノード近辺を計測することで、オーバレイルーティングテーブルの更新をより効率的にできると述べている。DAPS¹⁴⁾ はオーバレイネットワークでのルーティング効率を高めるために、エンドホスト間の遅延を評価基準とし、フラッディングの枝刈りを行っている。

一方、連続量を扱う範囲指定検索を可能とするために、データや検索クエリの分散化に DHT を使わない手法も提案されている。SkipNet¹⁵⁾ は構造型 P2P オーバレイネットワークの一手法であるが、ハッシュを用いた DHT の代わりに、連続した値を ID に用いる SkipGraph¹⁶⁾ を用いることで範囲検索を可能としている。SkipGraph は、1 次元のノード配列に対して常にバランスする木構造を用いて階層的にグループ分けすることで、対数オーダの探索効率を実現している。しかし、階層構造は地理的位置とは無関係に単一の検索キーによって構成されているため、必ずバランスのよい構造になるものの、地理情報を用いた範囲指定検索や複数キーによる範囲指定検索では、目的の範囲より広い範囲の検索が必要となる場合がある。また、LL-net³⁾ は地図上のエリアを階層的に 4 分割し、階層毎に異なる長さのオーバレイリンクを設定する構造型 P2P オーバレイネットワークである。しかしエリアごとにそのエリアを管理する特殊なノードの存在を仮定しているため、オーバレイネットワークの管理コストが増大し、スケーラビリティに欠ける面がある。また、ノードの分布が一樣ではない場合、地理座標からノード ID への変換が簡単に行えなくなったり、偏った階層構造になって検索効率が悪化したりする問題がある。これに対し、Mill¹⁷⁾ では地理的位置情報に基づいてつけられた ID によって、ノードをリング構造に接続することで範囲検索を可能にしている。これによって特殊ノードなしに、 $O(\log N)$ の検索効率が実現できている。

位置情報のような多次元空間の情報を ID のような一次元空間にマッピングするための手法として空間充填曲線(ペアノ曲線)¹⁸⁾ が知られている。ルベグ曲線(Z-Ordering)⁴⁾ は多次元から 1 次元への変換方法が容易で実装しやすいことから、モバイル P2P などでも多く用いられており、階層構造を構成することも容易である。しかし、分割されたクラスタ上を Z 状にたどっていくことから、クラスタ間のリンクが長くなり効率が悪い(図 1)。一方、

ヒルベルト曲線はフラクタル状にコの字型の ID 割り当てを行なっていくため、最も充填効率のよい空間充填曲線である(図2)。その反面、ラベリング計算が複雑になり、地理的位置情報からの変換や階層型構造の構成は難しい。また、これらの充填曲線は閉曲線ではないため、両端のノード間のリンクがネックになる。閉曲線構造を持つ空間充填曲線にはシェルピンスキー曲線がある。しかしこの曲線もラベリング計算が複雑であり、地理的位置情報からの変換や階層型構造の構成が困難である。

また、P2P ネットワークにおいて、実際のネットワークの近接性を考慮した座標系を分散で計算する手法として Vivaldi¹⁹⁾ がある。この手法は、各参加ノードが自律的に自身の座標を決定し、ばねの原理を用いてノード間のユークリッド距離と実測遅延値の差を徐々に修正することで、座標系を決定していく。実際のネットワーク遅延に最適化されたネットワーク座標系を構築するには適しているが、モバイルノードの頻繁な移動や、ネットワーク状況の急激な変化を考慮した場合、座標系が収束しない場合が考えられる。そこで我々は、P2P オーバレイネットワーク向けに、新たに変換しやすく効率のよい空間充填曲線の提案を行なった。提案曲線は、地理的位置からの ID ラベリングが容易であり、階層的なノード接続にも対応している。また、モバイルノードが加わったときの遅延変動などを考慮し、座標計算に Vivaldi の手法を導入する。

3. 提案手法

本稿では、2次元平面上的位置を1次元のIDに変換するための新しい空間充填曲線の提案を行う。また、各ノード間の地理位置情報および遅延情報を利用して、低遅延かつ負荷分散が可能な構造型 P2P オーバレイネットワークの構築手法を示す。

3.1 新しい空間充填閉曲線の提案

3.1.1 概要

本稿で提案する P2P ネットワークを構築するための空間充填曲線には、(1) 地理情報から容易に P2P ネットワーク上のノード ID に変換できること、(2) 範囲を指定した情報検索を効率的に行えること、(3) スケーラビリティを持たせるため階層的な構造を実現しやすいこと、の特長を持たせる。

P2P ネットワークを構築するためには各ノードに一意的 ID を付ける必要があり、2次元空間上に分布したノードに ID を付けるための方向として空間充填曲線(ペアノ曲線)が利用されている。空間充填曲線の代表的なものとして、ルベグ曲線(Z-Ordering, 図1)、ヒルベルト曲線(図2)、シェルピンスキー曲線(H-indexing)、 $\beta\Omega$ -indexing などが挙げ

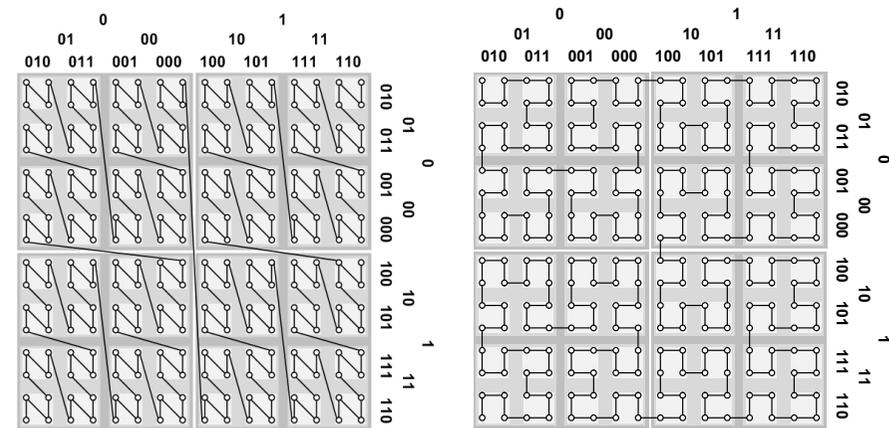


図1 Lebesgue Curve (Z-Ordering)

図2 Hilbert Curve

られる。ヒルベルト曲線やシェルピンスキー曲線、 $\beta\Omega$ -indexing は、2次元平面上において近隣のノードが1次元線上でも近くに配置されるように空間を充填するため、論理的な隣接ノード間の通信遅延を小さく抑えられ、領域を指定したリソースの検索が効率的に行える。ルベグ曲線は、クラスタ間をつなぐリンクの端点となるノードが、2次元平面上で大きく離れているため、上記の曲線と比較して性能は良くない。しかし、単純な構造であるため、2次元座標からルベグ曲線上のIDへの変換は非常に容易である。そのため、複雑な処理のオーバーヘッドを嫌うモバイル向けのP2Pネットワークではルベグ曲線を用いたIDの変換がよく用いられている。提案する空間充填曲線は、ヒルベルト曲線のように2次元平面上的ノードの近接性と変換後の1次元線上での近接性に相関を持たせながら、ルベグ曲線のように容易にIDを変換できることを目指す。

3.1.2 構成

提案する空間充填曲線は、図3に示すHCRN(Hierarchical Chordal Ring Network)²⁰⁾を基とし、2次元に拡張することにより構成する。

HCRNは、リング上のノード群を再帰的に2分割してクラスタ化し、クラスタ端のノードへリンクを張ることで、リング上に木構造のトポロジを実現している(図4)。ここで、各ノードの持つIDは、ノードの位置する階層に応じて可変長のグレイコードで表され、階層内ではそのグレイコード順にノードが並んでいる。ここで、2進数とグレイコードの変換

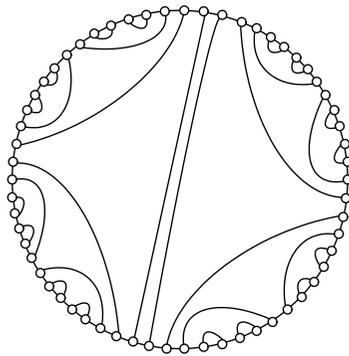


図 3 Hierarchical Chordal Ring Network ($N = 62$)

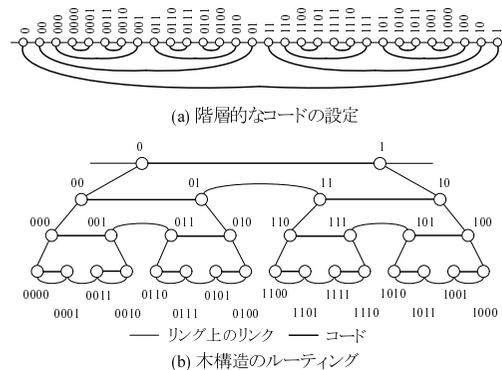


図 4 A cluster of HCRN

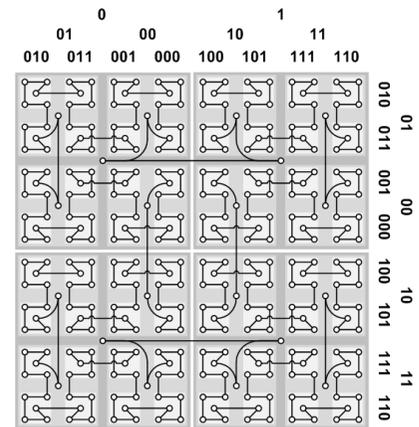


図 5 Proposed curve

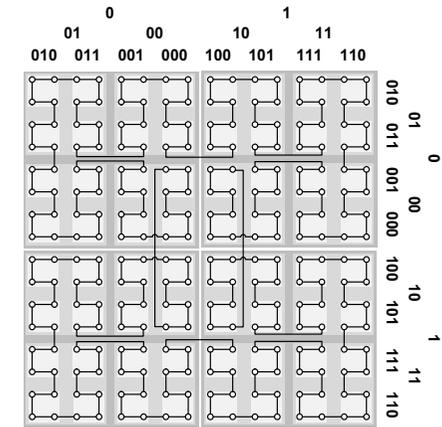


図 6 The links of the lowest level in the proposed curve

は以下の排他的論理和演算を用いて容易に行える．ある n 桁の 2 進数を \mathbf{b} ，それに対応するグレイコードを \mathbf{g} とすると以下の式で変換できる．

$$\mathbf{b} = \mathbf{g} \oplus (\mathbf{g} \gg 1)$$

$$\mathbf{g} = \mathbf{b} \oplus (\mathbf{b} \gg 1)$$

あるノードの地理的な位置を (x, y) ， $x = x_{n-1}x_{n-2} \cdots x_1x_0$ ， $y = y_{n-1}y_{n-2} \cdots y_1y_0$ とすると，その 2 次元座標を 1 ビットずつ交互に組み合わせたと

$$\mathbf{b}_{xy} = x_{n-1}y_{n-1}x_{n-2}y_{n-2} \cdots x_1y_1x_0y_0$$

をグレイコード \mathbf{g}_{xy} に変換することで，2 次元平面上の座標を HCRN 上にマッピングできる．2 次元平面上のノードは全て 1 次元上に全単射される．このようにして作成された提案する空間充填曲線を図 5 に示す．また，従来の空間充填曲線と比較しやすいように，最下位層の隣接関係のみを抜き出したものを図 6 に示す．

3.1.3 考察

ルベグ曲線など従来の空間充填曲線は，自己相似形になっており階層的なプロセスで生成されるが，空間にノードを階層的に配置することについては考慮していない．従来の空間充填曲線でも，領域毎でノード数に応じて，例えば左上の領域は 16 個のノードを辿り，右上の領域では 256 個のノードを辿るようにすることは可能である．しかし，その各領域中の全てのノードは同一レベルであり，ID 付けの段階でトポロジを階層化することはできない．ルベグ曲線はクラスタ間をつなぐ斜めのリンク上にノードを配置することで，階層的

に配置されたノードを全て接続することができるが，多層の階層構造を構成するのは難しい．そのため，情報の検索などにスケーラビリティを持たせる場合には，ID 変換後に別のサービスレイヤでネットワークに階層構造を持ち込んで対応する必要がある．

提案する空間充填曲線は，同一領域内でもノードを任意の階層に配置することができ，また複数の階層に配置された全てのノードも単一の曲線で接続することができる．これによって変換された ID の段階で階層化が実現でき，スケーラビリティを達成しやすい構造にできる．

3.2 Vivaldi による仮想ネットワーク地図への適用

提案する空間充填曲線を用い，各ノードの地理座標から一意に ID を求めて P2P ネットワークを構成した場合，ノードの分布に局所性がある場合は，特定のノードに負荷が偏る，トポロジのバランスが崩れネットワーク径が大きくなる，などの問題が起こる．LL-net は任意のノード間の地理的な近接性とネットワーク内の通信遅延に正の相関があるとして，地理情報を利用してノードのクラスタリングを行い，遅延の小さな P2P ネットワークの構築を目指している．また，地理的なノードの偏りに対して動的に階層ネットワークを作成するため，ノード負荷の偏りやネットワーク径増大の問題に対応可能である．しかし，ノード間が数百 km 規模の大きなネットワークであれば地理的な近接性が通信遅延に与える影響は十分大きいと考えられるが，ノード間距離が数 km 規模のネットワークでは必ずしもそうと

はいえ、むしろノードの偏りによる階層構造の変化への対応コストの増大が問題になる。

前節までで、提案する空間充填曲線は、ルベグ曲線と同程度の ID 変換コストで、ノード間の地理的な近接性とネットワーク内の近接性をより考慮できていることを述べた。モバイル端末の多いネットワークでは、モバイル端末の低い計算能力・通信能力や、ノードの移動性から、接続リンクの実際の通信遅延を詳細に考慮し最小化するよりも、ID 変換コストの削減が必要とされる。そこで、通信遅延に関する情報を各ノードが取得できると仮定した上で、ネットワーク内の通信遅延を小さくし、ノード分布の局所性の問題を低減した、オーバーレイネットワークの構築法を提案する。

3.2.1 概要

提案手法では、まず、オーバーレイネットワークを構築する各ノードに、仮想ネットワーク地図を用いて仮想座標を与える。本手法では仮想ネットワーク地図の作成手法として Vivaldi¹⁹⁾を用いる。これによって仮想座標をノード間の実際の遅延時間を考慮したものにさせ、また、ノードが地図上で特定の位置に集中することを緩和させる。

次に、作成した仮想ネットワーク地図上の各ノードに対して、提案した空間充填曲線を用いノード ID を割り当てる。

3.2.2 仮想ネットワーク地図の作成

本手法では Vivaldi を用いて、仮想ネットワーク地図上に各ノードの座標を与える。Vivaldi はパネの原理を用いてユークリッド距離と実測遅延値の誤差を徐々に調整することで、各ノード分散で自律的に座標系を構築する手法であるが、誤差の調整の幅が小さいため座標系の収束が遅いと言う問題点がある。このため、特に与えられた初期解の座標が実際の遅延値と大きくかけ離れている場合は、収束時間の長期化が問題となる。そこで、本手法では初期解となる座標として、地理的な位置情報を与えることにする。ネットワークに参加する各ノードは GPS などによって、位置情報を取得できることとし、取得した位置情報から一意に初期座標を決定する。

図 7 に Vivaldi の概略を示す。

このように Vivaldi で得られた仮想ネットワーク地図上のノードに対し、提案する空間充填曲線を用いて ID を付けることで、遅延時間およびノード分布の局所性を考慮した P2P オーバーレイネットワークの構築が可能となると考えられる。

4. まとめ

本稿では、ピアとなる各端末ノードの地理情報を考慮した ID の割り当てを行うことに

- 入力
 - ノード数 N
 - ノードの集合 $Nodes = \{n_i\} (i = \{1, 2, \dots, N\})$
 - 各ノード n_i の属性として地理的な位置 $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$
 - 任意ノード n_i, n_j 間の通信遅延時間 d_{ij} の行列 $D = \{d_{ij}\}$
- 出力
 - 遅延地図上の各ノード n_i の位置 $\mathbf{p}_i = (p_i, q_i)$
- 目的関数 $cost$
 - 任意の 2 点間の遅延地図上の距離と通信遅延時間の推定誤差の総和 E の最小化
$$\text{minimize } \sum_{i,j} (d_{ij} - \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|)^2$$

(a) 定式化

- パネモデルにおいて、ノード i で調整すべき力ベクトルを F
- ノード $i-j$ 方向の単位ベクトルを $u(i, j)$
- パネモデルを収束させるための時定数 t

```

While (cost - costprev) < ε
  foreach i ∈ Node
    F := 0;
    foreach j ∈ Node
      e := dij - ||ni - nj||;
      F := F + e × u(i, j);
    end;
    pi := pi + t × F;
  end;
end.
                
```

(b) アルゴリズム

図 7 Vivaldi の概要

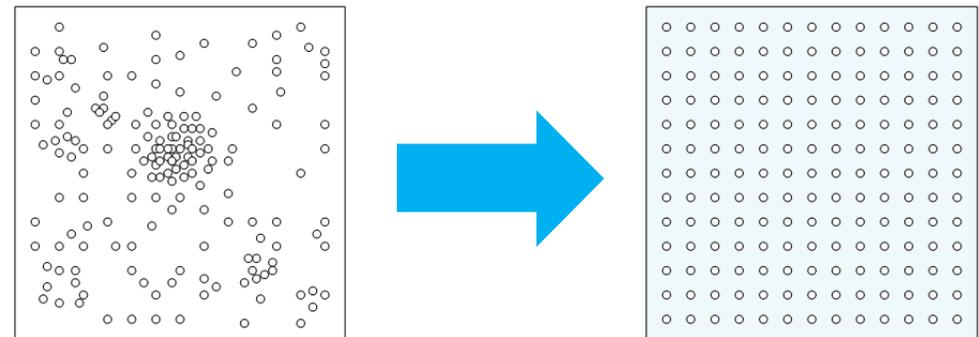


図 8 Vivaldi による仮想ネットワーク地図の作成

よって、遅延の小さな構造型 P2P オーバーレイネットワークを構築するプロトコルの提案を行った。

本稿で提案した P2P ネットワークを構築するための空間充填曲線は、地理情報から容易に P2P ネットワーク上のノード ID に変換、効率的な範囲を指定した情報検索、スケーラ

ビリティのための階層的な接続構造が実現可能と考えられる。

また、実際の通信遅延時間の測定結果から、パネモデルを用いて遅延の小さなネットワークを構築する手法である Vivaldi を用いて、ノード分布の局所性の問題も考慮したオーバーレイネットワークの構築法を提案した。

今後の課題として、現実の環境における提案空間充填曲線、および、P2P オーバーレイネットワークの性能評価、偏りのあるノード分布における提案するネットワークの性能評価、および、さらに性能を向上させるため各ノードの持つルーティングエントリについての再検討が必要であると考えている。

参 考 文 献

- 1) : Gnutella. <http://gnutella.wego.com>.
- 2) : BitTorrent. <http://bittorrent.com>.
- 3) 金子雄, 春本要, 福村真哉, 下條真司, 西尾章治郎: コピ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 (TOD28), pp.1-15 (2005).
- 4) Orenstein, J. and Merrett, T.: A class of data structures for associative searching, *Proceedings of the 3rd ACM SIGACT-SIGMOD Symposium on Principles of Database Systems*, pp.181-190 (1984).
- 5) Stoica, I., Morris, R., Karger, D., Kaashoek, M.F. and Balakrishnan, H.: Chord: A Scalable Peer-to-peer Lookup Service for Internet Applications, *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2001*, pp.149-160 (2001).
- 6) Ratnasamy, S., Francis, P., Handley, M., Karp, R. and Schenker, S.: A scalable content-addressable network, *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2001*, pp.161-172 (2001).
- 7) Rowstron, A. I.T. and Druschel, P.: Pastry: Scalable, decentralized object location, and routing for large-scale peer-to-peer systems, *Proceedings of the IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms Heidelberg (Middleware 2001)*, Springer-Verlag LNCS 2218, pp.329-350 (2001).
- 8) Zhao, B.Y., Kubiatowicz, J. and Joseph, A.D.: Tapestry: An Infrastructure for Fault-tolerant Wide-area Location and Routing, Technical report, Computer Science Division, University of California at Berkeley (2001).
- 9) Han, J., Watson, D. and Jahanian, F.: Topology Aware Overlay Networks, *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE INFOCOM 2005)*, Vol.4, pp.2554-2565 (2005).
- 10) Wu, C.-J., Liu, D.-K. and Hwang, R.-H.: A location-aware peer-to-peer overlay network, *International Journal of Communication Systems*, Vol.20, No.1, pp.83-102 (2007).
- 11) Liu, Y., Liu, X., Xiao, L., Ni, L.M. and Zhang, X.: Location-Aware Topology Matching in P2P Systems, *Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE INFOCOM 2004)*, Vol.4, pp.2220-2230 (2004).
- 12) Waldvogel, M. and Rinaldi, R.: Efficient Topology-Aware Overlay Network, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol.33, No.1, pp.101-106 (2003).
- 13) Pietzuch, P., Ledlie, J., Mitzenmacher, M. and Seltzer, M.: Network-Aware Overlays with Network Coordinates, *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2006)*, p.12 (2006).
- 14) Zhang, D. and Lin, C.: Efficient Delay Aware Peer-to-Peer Overlay Network, *Proceedings of the 6th International Conference on Web-Age Information Management (WAIM 2005)*, Springer-Verlag LNCS 3739, pp.682-687 (2005).
- 15) Harvey, N. J.A., Jones, M.B., Saroiu, S., Theimer, M. and Wolman, A.: SkipNet: A Scalable Overlay Network with Practical Locality Properties, *Proceedings of the 4th USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems (USITS '03)*, pp.113-126 (2003).
- 16) Aspnes, J. and Shah, G.: Skip graphs, *Proceedings of the 14th annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA 03)*, pp.384-393 (2003).
- 17) Matsuura, S., Fujikawa, K. and Sunahara, H.: Mill: A Geographical Location Oriented Overlay Network Managing data of Ubiquitous Sensors, *IEICE TRANSACTIONS on Communications*, Vol.E90-B, No.10, pp.2720-2728 (2007).
- 18) Wierum, J.-M.: Logarithmic Path-Length in Space-Filling Curves, *Proceedings of the 14th Canadian Conference on Computational Geometry*, pp.22-26 (2002).
- 19) Dabek, F., Cox, R. and Morris, R.: Vivaldi: A Decentralized Network Coordinate System, *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2004*, pp.15-26 (2004).
- 20) Kitani, T., Funabiki, N., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Hierarchical Logical Topology in WDM Ring Networks with Limited ADM, *Proceedings of the IFIP Networking 2008 (Networking 2008)*, Springer-Verlag LNCS 4982, pp.326-337 (2008).