

## 地理的オーバーレイネットワークを用いた 位置依存コンテンツ分散管理手法

川上 朋也<sup>†1</sup> 竹内 亨<sup>†2</sup> 寺西 裕一<sup>†3,†4</sup>  
春本 要<sup>†5</sup> 西尾 章治郎<sup>†1</sup> 下條 真司<sup>†4</sup>

ユビキタス環境では、現実世界におけるユーザやサービス対象の位置に基づくコンテンツである位置依存コンテンツの扱いが重要となる。本研究では、位置情報に関連する P2P アーキテクチャである地理的オーバーレイネットワークを用い、さまざまな地理的オーバーレイネットワークに適用可能な位置依存コンテンツ分散管理手法を提案する。提案手法ではピアのコンテンツ担当領域はボロノイ領域で表されるため、既知のピアやコンテンツの配置、分布密度などから未知の領域における担当ピアの存在確率を計算することで、効率的に要求コンテンツを取得する検索アルゴリズムを提案する。本研究では提案手法におけるコンテンツ検索をシミュレーションにより評価し、不要な範囲のピアへのクエリ送信を抑制しつつ、要求コンテンツを取得できることを確認した。

### A Location-dependent Content Management Method Using Geographical Overlay Networks

TOMOYA KAWAKAMI,<sup>†1</sup> SUSUMU TAKEUCHI,<sup>†2</sup>  
YUUICHI TERANISHI,<sup>†3,†4</sup> KANAME HARUMOTO,<sup>†5</sup>  
SHOJIRO NISHIO<sup>†1</sup> and SHINJI SHIMOJO<sup>†4</sup>

In the ubiquitous computing environment, location-dependent contents, which depends to certain locations in the real-world, play important role to realize various services. In this study, we propose location-dependent content managing mechanism which uses various geographical overlay networks and enables to applicate to them. In our proposal, peer's territory for contents is showed as Voronoi regions. We proposed an algorithm to calculate a probability of peer existence within unsearched area based on found peers, contents, and those density to search required contents. We have evaluated the effectiveness for content search in proposal by simulations and confirmed to reduce queries for unnecessary peer.

### 1. はじめに

近年、携帯電話をはじめとしたモバイル端末や高速ネットワークの普及、無線技術の発達などにより、「いつでも、どこでも、だれでも」コンピュータが利用可能なユビキタス環境が整いつつある。ユビキタス環境では、ネットワークで結ばれた端末や機器、センサが実世界に分散して存在し、さまざまな情報を自ら発信したり、他の情報を検索したりすることが想定される。このとき扱われる膨大な数の情報には、現実世界におけるユーザ自身の位置や、周辺のセンサ情報、特定の位置に存在する店舗に関する口コミ情報など、位置に関連するコンテンツ、いわゆる「位置依存コンテンツ」が含まれる。近年、これらの位置依存コンテンツを扱ったサービスや技術には特に注目が集まっており、GPS により計測された位置座標を利用した GeoLife2.0<sup>1)</sup> や、Google Maps などの地図上にコンテンツを表示する Geocoding<sup>2)</sup> などの地図アプリケーション、最寄りの店舗検索などの位置検索サービス、近くのおすすめ口コミ情報を提示するコンテンツ推薦サービスなどの研究開発が行われている。

ユビキタス環境においては、膨大な数の端末や機器が存在し、それらが自律的に位置依存コンテンツを発信することになる。このとき、従来のクライアント・サーバアーキテクチャでは、単一の組織が管理・把握するサーバにすべての情報が保存されるため、サーバ機器や周辺ネットワークに負荷が集中する。よって、負荷の集中に耐えうる構成とするには、冗長構成とするなど設備・運用上のコストが大きくなる。また、サーバを管理する組織の意向にそぐわないコンテンツが排除されたり、組織の都合や不具合によりサービスが停止されたりする場合があります。さらに、位置依存コンテンツは、コンテンツに関連する位置から近い場所から多く発信・取得され、発信者と取得

<sup>†1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>†2</sup> 日本電信電話株式会社未来ねっと研究所

NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation

<sup>†3</sup> 独立行政法人情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications Technology

<sup>†4</sup> 大阪大学サイバーメディアセンター

Cybermedia Center, Osaka University

<sup>†5</sup> 大阪大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka University

者がネットワーク的に近い接続をできる場合も多いと考えられるが、クライアント・サーバーアーキテクチャでは、位置に関係なく、必ず遠隔にあるサーバを仲介してコンテンツをやりとりしなければならない。このようなクライアント・サーバーアーキテクチャの課題を解決し、個々の端末や機器が相互に協調する P2P アーキテクチャであるオーバーレイネットワーク技術を応用し、位置依存コンテンツを分散管理する方法について多くの研究が行われてきた。

現在、位置依存コンテンツの分散管理手法として、ZNet<sup>3)</sup> や Mill<sup>4)</sup>、PLATON<sup>5)</sup>、Tachyon<sup>6)</sup> などが提案されている。しかし、これらの管理手法はいずれも、Skip Graph<sup>7)</sup> や Chord<sup>7)</sup> などの 1 次元のキーをもとにピアを探索するオーバーレイネットワークにおいて、2 次元空間全体を 1 次元に変換したうえでコンテンツの担当範囲を決めるものであった。そのため、これらの方法は、2 次元のキーを 1 次元のキーに変換したうえで担当ピア探索を実行する必要があり、それぞれ独自のオーバーレイネットワーク構造を構成する必要がある。また、コンテンツの担当ピアが実際のピアが存在する位置とは無関係に決まるため、近隣の位置依存コンテンツであっても、地理的に遠くにあるピアが担当する場合がある。さらに、探索の際に地理的に遠くにあるピアを経由しなければならない可能性がある。位置依存コンテンツの検索要求は、ユーザが存在する位置から近い場所に関する情報が対象となる場合が多いと考えられ、これらの特性はネットワークの利用効率上望ましくない。

本研究では、各ピアが自身の位置に対応するボロノイ領域にある位置依存コンテンツを担当することで、位置依存コンテンツの分散管理を行う手法を提案する。位置依存コンテンツを含むボロノイ領域を持つピアの探索は、位置に基づくピア探索が可能な、地理的オーバーレイネットワークを用いて行う。地理的オーバーレイネットワークとしては、既存技術や地図アプリケーションとの連携などを考慮し、ドロネーネットワーク<sup>8)</sup> や LL-Net<sup>9)</sup> など、矩形による探索範囲の指定が可能な既存のものを想定する。また、各ピアはそのボロノイ領域を担当するため、必ず他のピアよりも近い場所に対応する位置依存コンテンツを保持することになる。地理的オーバーレイネットワークでは、ピアが実際に存在する位置をもとにネットワーク構造が構築される。

本研究の特徴は、提案する位置依存コンテンツの管理手法が特定のオーバーレイネットワークのアルゴリズムに依存しない点にある。提案手法は、既存の地理的オーバーレイネットワークと独立して位置依存コンテンツ管理層を設け、地理的オーバーレイネットワークが提供する矩形範囲によるピア探索機能を用いてコンテンツの分散管理機能を実装する。また、提案手法では既知の情報からコンテンツ担当ピアの探索範囲を算出し、情報を取得しつつ反復的に探索することで、無関係なピアへのメッセージ送信を抑制する。これらにより、提案手法は

特性の異なるさまざまな地理的ピア探索アルゴリズムと組み合わせ、コンテンツ検索における不要なトラフィックを削減できる。

## 2. 位置依存コンテンツ分散管理手法

### 2.1 コンテンツ管理の階層

本研究では、1 章で述べた地理的オーバーレイネットワークを用い、位置依存コンテンツの管理を図 1 に示す階層構造により行う手法を提案する。つまり、下位の地理的オーバーレイネットワークが持つピア探索機能を用い、位置依存コンテンツの格納と検索を行う位置依存コンテンツ管理層を実現する。上位の位置依存コンテンツ管理層は、特定の地理的オーバーレイネットワークに依存せず、さまざまなオーバーレイネットワークへ適用可能とする。

まず、地理的オーバーレイネットワークを用いて位置依存コンテンツを分散管理するための方法として、コンテンツの位置に対応した仮想ピアを地理的オーバーレイネットワークに参加させる方法が考えられる。コンテンツを 1 ピアとする地理的オーバーレイネットワークでは指定範囲のピアを探索し、対象コンテンツを保持する端末からのみ応答を得ることができるが、コンテンツが追加、削除されるごとにオーバーレイネットワークの構造が変化してしまう。コンテンツの数はピアの数と比べて膨大であることが想定されるため、コンテンツ数に応じて構造を管理するオーバーヘッドが大きくなる。また、非構造化オーバーレイネットワークにおいてはコンテンツ数が増加するにともない、検索効率が悪くなる。

そこで本研究では、地理的な分担領域を各ピアに設け、コンテンツの位置を分担領域を持つ「担当ピア」を地理的オーバーレイネットワークにおいて探索し、当該ピアにコンテンツ

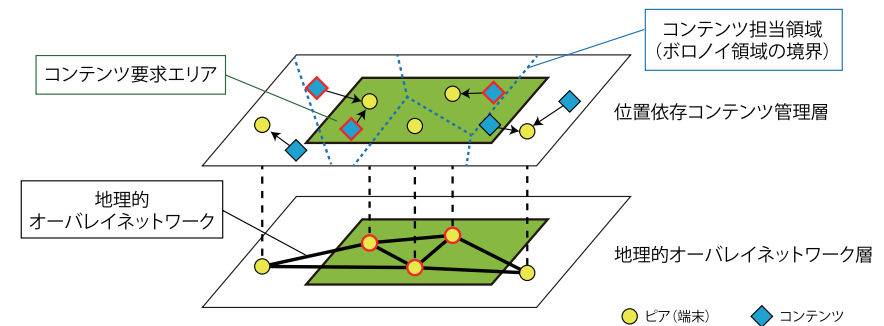
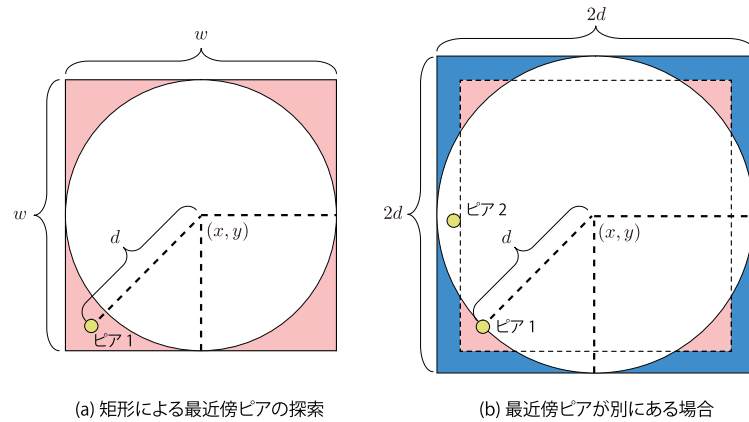


図 1 位置依存コンテンツの管理  
Fig. 1 Management of location-dependent contents.



(a) 矩形による最近傍ピアの探索 (b) 最近傍ピアが別にある場合

図 2 範囲探索による最近傍ピア検索

Fig. 2 Search the nearest peer by rectangle area.

を格納させる．このとき，地理的オーバーレイネットワークについては，既存技術や地図アプリケーションとの連携などを考慮し，多くの地理的オーバーレイネットワークが対応する，矩形による探索範囲の指定が可能なものを想定する．また，コンテンツの保持と管理は図 1 のように，位置依存コンテンツの位置情報に最も近い位置に存在するピアがそのコンテンツを担当する．担当ピアはコンテンツの位置とその周辺ピアの位置の情報のみで決定でき，既存のコンテンツ管理手法のように専用のオーバーレイネットワークを用いない．そのため，矩形による範囲探索が可能な地理的オーバーレイネットワークならば，提案する位置依存コンテンツ管理層を適用できる．

## 2.2 位置依存コンテンツの登録

位置依存コンテンツの登録については，想定する地理的オーバーレイネットワークが持つ範囲指定によるピア探索を用いる．

まず，位置  $(x, y)$  に関する位置依存コンテンツを登録する場合，図 2(a) のように，位置  $(x, y)$  から設定された水平幅  $w$ ，垂直幅  $w$  の範囲のピアを探索する．ここで，範囲内にピアが存在せずに返答がなかった場合，探索範囲の周囲を再探索する．この周囲の探索は，探索範囲にピアが発見されるまで行う．

次に，発見されたピアの情報を用いて位置  $(x, y)$  の最近傍ピアを仮決定し，その直線距離  $d$  を求める．このとき，図 2(a) のように，最近傍として仮決定したピア 1 との距離  $d$  が

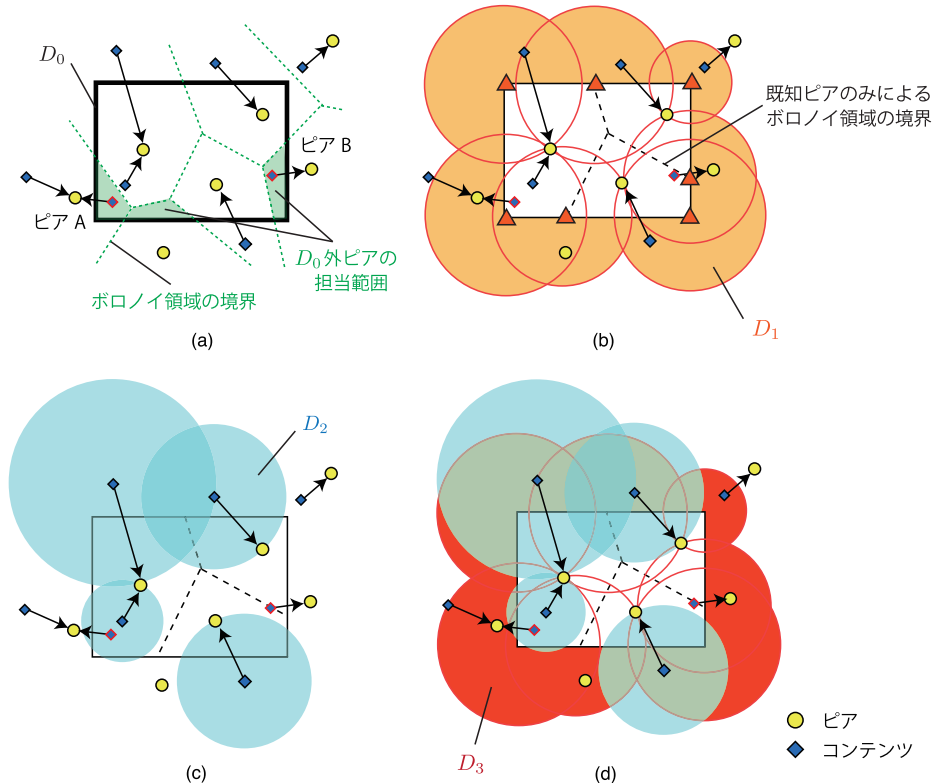


図 3 提案手法におけるピア探索範囲

Fig. 3 Peer search area in proposal.

$\frac{w}{2} < d$  の場合，ピア 1 以外のさらに近傍なピアが探索範囲外に存在する可能性がある．そのため，図 2(b) のように，位置  $(x, y)$  を中心に，水平幅と垂直幅が  $2d$  の範囲を再探索し，たとえば，図 2(b) におけるピア 2 などの最近傍ピアにコンテンツを登録する．

## 2.3 各ピアのコンテンツ担当領域

コンテンツをその位置情報に最近傍のピアが管理する場合，図 3(a) のように，各ピアのコンテンツの担当領域はピアを母点としたポロノイ領域で表される．ポロノイ領域とは，それぞれの点（母点）とその周囲の点で得られた垂直二等分線を境界とする領域であり，校区

などの領域分割にも用いられる。

たとえば、ユーザが取得したいコンテンツが図 3(a) の中央に示した矩形の範囲である場合、この範囲をコンテンツ要求エリア  $D_0$  とする。このとき、 $D_0$  のピアのみを探索すると、 $D_0$  外に存在しつつ  $D_0$  をコンテンツ担当領域の一部とするピアを発見できず、対象コンテンツの取得漏れが発生する可能性がある。図 3(a) の例では、 $D_0$  外の左右に存在するピア A, B がそれぞれ対象コンテンツを管理しているが、 $D_0$  のピアのみを探索した場合はピア A, B を発見できず、結果的に対象コンテンツを取得できない。この対象コンテンツの取得漏れは、コンテンツ要求エリアとピアによるコンテンツ担当領域のずれと、探索済み範囲のピアによる不正確なポロノイ領域しか把握できないことで生じる。そのため、対象コンテンツをすべて取得するには、対象コンテンツの担当ピアが存在しうる範囲を探索する必要がある。

### 3. 探索価値に基づく反復的位置依存コンテンツ検索手法

#### 3.1 検索手法の概要

2章で示したコンテンツ取得漏れの問題に対処するため、本研究ではピア探索範囲を拡大する位置依存コンテンツ検索手法を提案する。提案する検索手法は既知の情報から適切なピア探索範囲を算出し、情報を更新しながら反復的に探索することで、不要なピアへのメッセージ送信を抑制する方法である。

想定する位置依存コンテンツ分散管理手法では、 $D_0$  のコンテンツを担当するピアが存在しうる範囲は、 $D_0$  のピアのポロノイ担当領域の境界線と  $D_0$  の交点、さらに  $D_0$  の 4 頂点をそれぞれ中心にし、最近傍ピアまでの距離を半径とした正円の集合で表される<sup>10)</sup>。図 3(b) の例では、正円の中心は三角で示した地点で、担当ピアが存在しうる範囲は  $D_1$  で示した領域である。一方、コンテンツの位置に最近傍のピアがそのコンテンツを担当するため、探索されたピアが持つコンテンツの位置を中心にし、そのピアまでの距離を半径とした正円の集合には他ピアが存在せず、図 3(c) の  $D_2$  で示した領域である。以上により、対象コンテンツの取得のために探索する範囲は図 3(d) の  $D_3$  に示す領域で、以下の式で表される。

$$D_3 = D_1 - D_0 - D_2 \quad (1)$$

ただし、 $D_3$  上の地点にピアが存在し、その地点と  $D_0$  の間に他のピアが存在する場合、距離が遠いピアが対象コンテンツを管理する可能性は大きく下がる。そのため、 $D_3$  に存在する全ピアが実際にコンテンツ要求エリアを担当しているとは限らず、 $D_3$  のすべてを 1 度で探索すると無関係なピアへもクエリが転送される。また、ポロノイ領域で示されるコンテン

ツ担当領域では、コンテンツ要求エリアから遠くなるほど、その地点のピアが担当する割合は低下する。

そこで本研究では、2章で述べた位置依存コンテンツ分散管理において、ポロノイ領域で示されるコンテンツ担当領域を含め、既知の情報から判別される不要な範囲の探索を抑制しつつ、要求される位置依存コンテンツを検索する手法を提案する。提案する検索手法では、 $D_0$  のピアとその保持コンテンツの情報をまず取得し、探索しなければならない領域  $D_3$  を算出する。その後、得られた  $D_3$  を細分化し、それぞれ未知な地点における担当ピアの存在確率を既知のピアやコンテンツの配置、分布密度などから計算する。さらに、計算された存在確率と担当領域を用いることで、探索時に取得される対象コンテンツの推定値を探索価値として計算し、価値の高い範囲から優先的に探索する。このとき、 $D_3$  や担当ピアの存在確率、コンテンツ数の推定値の計算については、ピアやコンテンツの広域的な分布が既知の局所的な分布に類似する場合、精度は探索により得られる情報が増加するに従って高くなる。そのため、1 度にすべての領域を探索するのではなく、矩形範囲による探索を複数回に分け、既知の情報を逐次更新しながら反復的に探索する。これにより、不要な範囲の探索を抑制し、無関係なピアへのメッセージ送信を削減できる。

#### 3.2 探索価値の計算

まず、コンテンツ要求エリア  $D_0$  のピアとその保持コンテンツの情報を取得し、コンテンツ担当ピアが存在しうる  $D_3$  を算出する。次に、未探索の地点においてピアの存在確率を近似的に計算するため、図 4(a) のように、 $D_0$  を水平・垂直方向に任意の分割数  $m$  で矩形のセルに分割し、同様のセルを  $D_3$  を包含するように配置する。その後、 $D_3$  における各セルを探索する価値をそれぞれ計算し、それらの価値に基づいて次の探索範囲を決定する。

本研究では、各セルを探索した際に取得されるコンテンツ数の推定値を探索価値とし、既知の情報に基づいたピアやコンテンツの存在密度、対象セルにピアが存在する確率などを用いて計算する。ここで、ピアの存在密度  $N_p$  は、探索済み範囲のピア数を探索面積で割った「単位面積あたりの平均ピア数」である。また、コンテンツの存在密度  $N_c$  は、探索済み範囲のピアが保持するコンテンツの総数を探索面積で割ることで「単位面積あたりのピアが保持する平均コンテンツ数」を計算し、この値を「単位面積あたりの平均コンテンツ数」とする。探索済み範囲にあるピアやコンテンツの存在密度は、探索済みの範囲周辺の未探索の範囲でも 1 セルという微小領域では類似しているため、本研究ではこれらの  $N_p$  と  $N_c$  を近似的に用いる。また、未探索な 1 セルにピアが存在しない確率は、時間や距離などの一定区間で事象が発生する数の分布であるポアソン分布に従って計算する。まず、一般的なポア

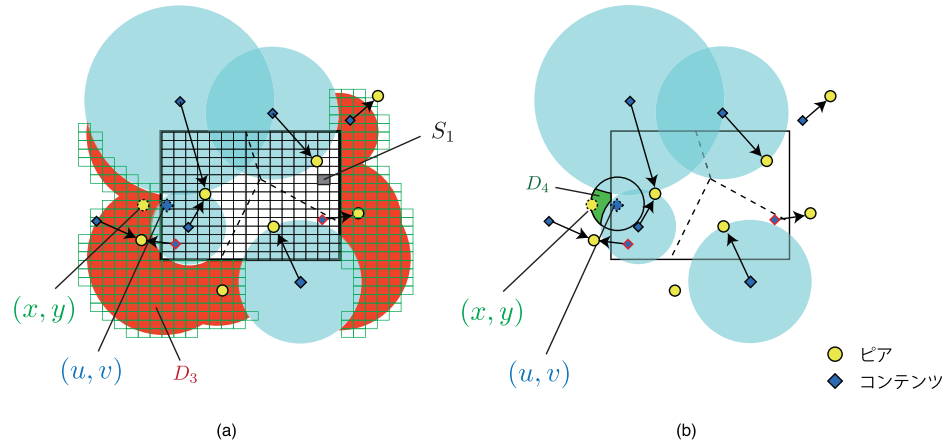


図 4 探索値の計算  
Fig. 4 Calculation of a value for search.

ソーン分布の確率関数は以下の式で表される .

$$f(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad (2)$$

ここで、面積  $S_1$  の小さな 1 セルにピアが存在する確率を計算する場合、 $\lambda$  は 1 セルにおける平均ピア数となる . 本研究では前述のとおり、探索済み範囲の局所的なピア存在密度  $N_p$  を未探索範囲における密度として近似的に利用するため、1 セルの面積を  $S_1$  とすると  $\lambda = N_p S_1$  で表される . また、セル内にピアが存在しない確率は  $x = 0$  のときで、以下の式で表される .

$$f(0) = e^{-N_p S_1} \quad (3)$$

したがって、逆に 1 セルに 1 ピアでも存在する確率は  $1 - e^{-N_p S_1}$  で表される .

$D_3$  において中心が  $(x, y)$  の特定のセルの探索値は、得られるコンテンツ数の推定値  $E_c(x, y)$  として、以下の流れで計算する . また、各セルの探索値を計算する処理 (*calculateAreaValue*) の擬似コードを図 5 に示す .

(1) コンテンツ担当領域に含まれる確率の計算

図 4(a) のように、コンテンツ要求エリア  $D_0$  における任意のセルを  $D_0(u, v)$  ( $1 \leq u \leq m, 1 \leq v \leq m$ ) とする . このとき、 $D_0(u, v)$  を  $(x, y)$  のピアが担当するには、 $D_0(u, v)$  の最近傍ピアでありつつ、 $D_0(u, v)$  を中心にし、 $(x, y)$  までの距離を半径と

```

Inputs:
D0: コンテンツ要求エリアを m × m 個に分割したセルの集合
peers: 探索されたピアの情報
contents: 取得されたコンテンツの情報
searchedArea: 探索済み範囲
D3: 探索済み範囲を D0 と同様の大きさに分割したセルの集合

Output:
各セルの探索値を算出した D3

Np ← peers.length/calculateSize(searchedArea); // 既知の情報から、ピアの存在密度を算出
Nc ← contents.length/calculateSize(searchedArea); // 既知の情報から、コンテンツの存在密度を算出
D2 ← calculateContentCircles(peers, contents); // 各コンテンツを中心に、最近傍ピアまでの距離を半径とした円の集合を算出
for i ← 0 to D3.length do
  for j ← 0 to D0.length do
    D4 ← calculateCircle(D0[j], D3[i]); // D0[j] を中心に、D3[i] までの距離を半径とした円を算出
    isNearest ← true;
    for k ← 0 to peers.length do
      if contains(D4, peers[k].location) then
        isNearest ← false;
        break;
      end if
    end for
    if isNearest then
      // D4 に他のピアが存在しない場合、D0[j] で取得されるコンテンツ数の期待値を算出
      D4 ← subtract(D4, searchedArea); // 探索済み範囲を除外
      D4 ← subtract(D4, D2); // コンテンツを中心とした円の範囲を除外
      P ← pow(e, -1 * Np * calculateSize(D4)) * (1 - pow(e, -1 * Np * calculateSize(D3[i])));
      // D3[i] が D0[j] のコンテンツを担当する確率を算出
      D3[i].value ← D3[i].value + P * Nc * calculateSize(D0[j]); // D0[j] でコンテンツ数の期待値を D3[i] の探索値として追加
    end if
  end for
end for
return D3;
    
```

図 5 探索値計算処理 *calculateAreaValue* の擬似コード  
Fig. 5 Pseudocode: *calculateAreaValue*.

した正円に他ピアが存在しない場合である . そのため、 $(x, y)$  のピアが  $D_0(u, v)$  を担当領域に含む確率  $P(u, v)$  については、その正円から探索済みである  $D_0$  およびピアが存在しない  $D_2$  を除外し、図 4(b) の  $D_4$  で示した領域にピアが存在しない確率と  $(x, y)$  にピアが存在する確率の積になる . したがって、領域  $D_4$  の面積を  $S(u, v)$  とすると、以下の式で表される .

$$P(u, v) = \begin{cases} e^{-N_p S(u, v)} (1 - e^{-N_p S_1}) & (\text{他ピアが存在しない場合}) \\ 0 & (\text{他ピアが存在する場合}) \end{cases} \quad (4)$$

## (2) 任意の地点におけるコンテンツ数の期待値の計算

$D_0(u, v)$  は  $P(u, v)$  の確率で担当領域になり、この場合のコンテンツ数はコンテンツ存在密度  $N_c$  と 1 セルの面積  $S_1$  の積で表される。一方、 $1 - P(u, v)$  の確率で担当領域外になり、この場合のコンテンツ数は 0 になる。したがって、 $(x, y)$  のピアの  $D_0(u, v)$  におけるコンテンツ数の期待値  $E_1(u, v)$  は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} E_1(u, v) &= P(u, v)(N_c S_1) + (1 - P(u, v)) \times 0 \\ &= (1 - e^{-N_p S_1}) N_c S_1 e^{-N_p S(u, v)} \end{aligned} \quad (5)$$

## (3) ピアが担当するコンテンツ数の推定値

$(x, y)$  のピアが担当するコンテンツ数の推定値  $E_c(x, y)$  は、コンテンツ要求エリア  $D_0$  の任意のセル  $D_0(u, v)$  におけるコンテンツ数の期待値  $E_1(u, v)$  を用いた以下の式で表される。

$$\begin{aligned} E_c(x, y) &= \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^m E_1(u, v) \\ &= (1 - e^{-N_p S_1}) N_c S_1 \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^m e^{-N_p S(u, v)} \end{aligned} \quad (6)$$

## 3.3 探索価値に基づくピア探索

## 3.3.1 探索対象セルの矩形範囲への整形

本研究では 3.2 節で計算した探索価値に基づき、セルを結合しつつ矩形へ整形する。このとき、要求元から矩形で指定されるクエリの数が増えると、それぞれにオーバーヘッドがかかるため、探索時のメッセージが増加する。このメッセージ増加については、既知のピアまではクエリを直接送信し、探索範囲までのホップ数は小さく抑えるとしても、トラヒックへ影響を与える可能性がある。一方、矩形の数を小さくするために多くのセルを大きな矩形へ整形すると、不要な領域が探索範囲に含まれ、無関係なピアへのクエリ送信が増加する。そのため、本研究ではマンハッタン距離を閾値  $l$  として指定しておき、その距離以下のセルを結合することで調整可能とする。たとえば、 $l = 1$  の場合は隣接するセルのみを結合し、複数の矩形の探索範囲へ整形する。

## 3.3.2 探索対象セルの反復的な探索

3.1 節で述べたとおり、提案手法では無関係なピアへのメッセージ送信を削減するため、対象となる全セルを 1 度で探索するのではなく、探索価値に基づいて決定した矩形範囲の探索と情報収集を繰り返す。このとき、各探索における範囲については、探索価値の高いセルから順に矩形へ整形してゆき、未取得コンテンツに対する再現率の予測値が一定割合を超えた時点での範囲とする。ここで指定する再現率も閾値  $r$  として設定しておき、たとえば  $r = 0.5$  の場合は、全セルのコンテンツ数の推定値を合計し、その合計値のうち 50% を超えるまで、探索価値の高いセルから順に結合と矩形への整形を行う。また、 $r = 1.0$  の場合は、すべてのセルを対象として矩形の探索範囲を整形する。

複数の矩形で得られた探索範囲を決定した後は、その範囲内のピアを探索し、新たに発見したピアやその保持コンテンツを既知の情報として更新する。次の探索範囲も 3.2 節の探索価値を再計算したうえで決定し、この探索範囲の決定と探索処理は、担当ピアが存在しうる領域がなくなるまで反復的に行う。ただし、反復的に探索する回数が増加すると、対象コンテンツをすべて取得するまでの時間が長くなる。現実的な環境では一定時間以内での対象コンテンツの取得という要求が考えられる。そのため、「最初の数回は価値の高いセルを優先的に探索し、その後に閾値  $r = 1.0$  として探索することで、任意の反復回数以下で探索処理を終了する」などの方法で対応する。このようにコンテンツ取得時間をある程度に抑えつつも、提案手法では最初の数回の探索で多くの情報を取得し、不要だと判明した範囲を探索対象から除外してゆくため、1 度に全範囲を探索する場合と比べてトラヒックを削減できる。

以上の反復的なピア探索によるコンテンツ検索機能 (`searchContents`) について、擬似コードを図 6 に示す。図 6 において、`calculateAreaValue` は図 5 の擬似コードが対応する。

## 4. 提案手法の評価

## 4.1 評価環境

提案手法におけるコンテンツ検索の評価のため、本研究ではシミュレーションを行った。シミュレーションの設定項目を表 1 に示す。それぞれの項目の詳細は以下のとおりである。

## ● 地理的オーバーレイネットワーク

本シミュレーションでは、地理的な近傍ノード間のリンクを基本とするドロネーネットワークと、空間を区切った階層構造のリンクを基本とする LL-Net を用いた。

## ● 全体領域

シミュレーションを行った仮想的な領域である。本シミュレーションでは、座標  $(0, 0)$

```

Inputs:
D0: コンテンツ要求エリアを m × m 個に分割したセルの集合
maxSearchCount: 反復探索における探索上限回数
l: 探索対象セルの矩形への整形において、離れたセル同士を結合するかの閾値となるマンハッタン距離
r: 反復探索において、各探索で取得しようとする未取得コンテンツの割合

Output:
D0 に関するコンテンツ

peers ← queryPeersFromRectangle(D0); // オーバレイネットワークによりピアを探索
contents ← getContents(peers); // 探索されたピアからコンテンツを取得
searchedArea ← D0; // 探索済み範囲を D0 に初期化
for i ← 1 to maxSearchCount do
  D3 ← calculateTargetArea(D0, peers, contents, searchedArea); // ピアが存在しうる範囲のセルを算出
  if calculateSize(D3) = 0 then
    break; // ピアが存在しうる範囲がなければ、コンテンツ検索を終了
  else if i = maxSearchCount - 1 then
    r ← 1.0; // 探索上限回数に達していれば、次の探索ですべてのコンテンツを取得
  end if
  D3 ← calculateAreaValue(D0, peers, contents, searchedArea, D3); // 各セルの探索価値を計算
  nextSearchArea ← calculateNextSearchArea(D3, l, r); // コンテンツ再現率の推定値が r を越えるまで、探索価値の高いセルから順に探索範囲への追加と距離 l 以下のセルの結合を行い、次に探索する複数の矩形範囲を算出
  newPeers ← queryPeersFromRectangle(nextSearchArea);
  newContents ← getContents(newPeers);
  searchedArea ← addArea(searchedArea, nextSearchArea); // 探索済み範囲を更新
  peers ← addPeers(peers, newPeers); // 探索されたピアの情報を更新
  contents ← addContents(contents, newContents); // 取得されたコンテンツの情報を更新
end for
return filterContents(contents, D0) // 取得されたコンテンツのうち、D0 に関するものを抽出
    
```

図 6 コンテンツ検索機能 searchContents の擬似コード  
Fig. 6 Pseudocode: searchContents.

表 1 シミュレーション環境  
Table 1 Simulation environment.

地理的オーバーレイネットワーク	ドローネーネットワーク, LL-Net
全体領域	16 × 16
コンテンツ要求エリア	1.0 × 1.0 で位置は無作為に決定
ピアの存在密度 $N_p$	10 ~ 40
ピアの分布	一様分布, 正規分布
コンテンツの存在密度 $N_c$	$4 N_p$
コンテンツの分布	一様分布
1 辺のセル分割数 $m$	20
未取得コンテンツに対する再現率 $r$	1 回目: 0.8 2 回目: 1.0
結合するセルの距離 $l$	6 以下

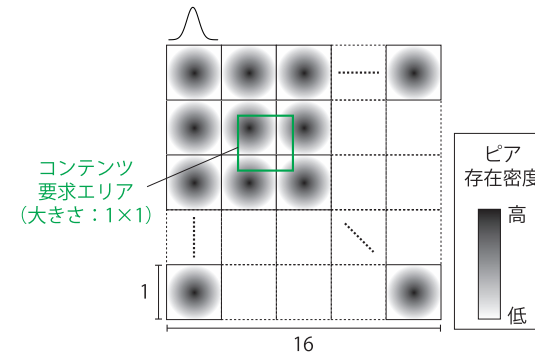


図 7 ピアの分布に偏りがある環境  
Fig. 7 Environment which has biased distribution of peers.

を基準とした水平幅 16, 垂直幅 16 とした。

- コンテンツ要求エリア  $D_0$   
ユーザがコンテンツを要求するエリアである。本シミュレーションでは、水平幅 1, 垂直幅 1 のエリアとし、このエリアのコンテンツを担当するピアが探索対象となる。
- ピアの存在密度  $N_p$   
面積 1 あたりに存在するピアの数であり、全体領域にはこの密度でピアが存在する。本シミュレーションではピアの存在密度を 10 ~ 40 まで 10 間隔で 4 段階に変化させ、全体領域には 2,560 ~ 100,240 ピアが存在する環境でそれぞれの結果を計測した。
- ピアの分布  
上述のピア存在密度に従い、無作為かつ一様にピアを配置した場合と、現実環境を想定し、ピアの配置に偏りがある場合で計測した。ピアの配置に偏りがある場合は図 7 のように、複数の正規分布に従ってピアの疎密が一定間隔で変化する。図 7 の色の濃淡はピアの疎密を示しており、それぞれの正規分布は分散  $\delta^2 = 0.5$  とした。また、コンテンツ要求エリアにはいずれかの正規分布の頂点が常に含まれ、ピア探索範囲が複数の分布に影響される環境を想定した。
- コンテンツの存在密度  $N_c$   
面積 1 あたりに存在するコンテンツの数であり、全体領域にはピアの 4 倍の密度でコンテンツが存在する。

- コンテンツの分布  
上述のピア存在密度に従い、無作為かつ一様にコンテンツを配置し、最近傍のピアへコンテンツを登録した。
- 1 辺のセル分割数  $m$   
提案手法においてコンテンツ要求エリアの外側を分割する際、1 辺あたりに分割するセルの数である。
- 未取得コンテンツに対する再現率  $r$   
提案手法で矩形範囲を生成する際、その範囲で取得するコンテンツについての閾値であり、未取得コンテンツ数の推定値のうち、この割合を超えるまでの矩形範囲を探索する。ここで、提案手法ではコンテンツ要求エリア周辺の探索が特に重要であり、ある程度の情報を収集した後の探索による影響は小さい。そのため、本シミュレーションでは、最初のコンテンツ要求エリアを探索した後、2 回目の探索では 0.8、3 回目の探索では 1.0 とし、多くとも合計 3 回の探索で対象コンテンツを取得することを想定した。

- 結合するセル間の距離  $l$   
提案手法で矩形範囲を生成する際、探索対象となるセルどうしを結合するかを決定する閾値である。この距離以下のセルを結合してゆき、複数の矩形範囲を生成する。

以上のシミュレーション環境において、それぞれのピア数で 20 回ずつ計測した結果の平均値を求めた。また、反復探索の比較対象については、担当ピアが存在しうる範囲  $D_3$  を 1 度に探索する場合として、探索対象セルをコンテンツ要求エリア  $D_0$  の上下左右のグループに分類し、4 つの矩形範囲で同時に探索する方法を「4 エリア探索」とした。4 エリア探索では、メッセージ数や全コンテンツを取得するまでの時間に影響する矩形範囲数と探索面積を抑えつつ、対象ピアが存在しうる全セルを 1 度に探索する。

各手法による探索範囲の例を図 8 に示す。図 8 にはピアとコンテンツの配置を示しており、直線はコンテンツとその担当ピアの関係を表している。また、図中で中央の矩形がコンテンツ要求エリア  $D_0$  を、図 8(a) が分割したセルを示しており、図 8(b), (c) はそれぞれ 4 エリア探索、反復探索における探索範囲の一例である。4 エリア探索である図 8(b) には、上下左右 4 つのグループを太線で明示している。また、反復探索である図 8(c) では、探索範囲は前述したセル間の距離  $l$  に基づいて矩形へ変換されており、探索回によって範囲を濃淡で色分けしている。

#### 4.2 シミュレーション結果

まず、反復探索における 3 つの設定値である  $l$ ,  $m$ ,  $r$  による比較結果を図 9 に示す。

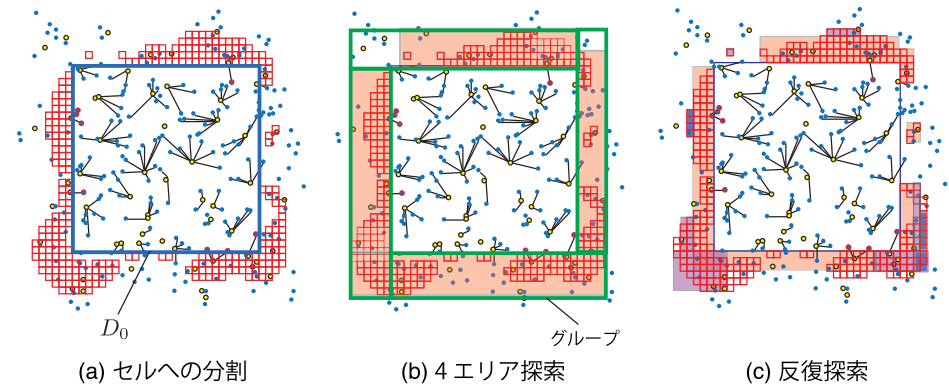


図 8 探索範囲の例  
Fig. 8 Examples of search area.

図 9(a) はセル分割数  $m$  による探索面積の推移を表しており、 $m = 5, 10, 15, 20$  の 4 段階で変化させた。図 9(a) より、基本的に  $m$  を大きくするほど探索面積は小さくなるが、本シミュレーション環境では  $m$  が約 20 の段階で探索面積がほぼ収束した。一方、探索価値の計算量については、コンテンツ要求エリア  $D_0$  上のセル数は  $m^2$  で、 $D_3$  上のセル数も同数の  $m^2$  である場合を仮に考えると、 $D_3$  上の各セルで  $D_0$  のセル数の計算を行うため、合計で  $m^4$  となる。前述の探索面積の減少量が収束したのに対し、 $m$  を大きくした場合の計算量の増加が大きいため、本シミュレーションでは基本的なセル分割数を  $m = 20$  に設定した。

図 9(b) は未取得コンテンツに対する再現率  $r$  による探索面積の推移を表しており、指定する割合は  $r = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$  の 5 段階で変化させた。図 9(b) より、ピアの存在密度  $N_p = 10$  の場合は  $r = 0.8$  で探索面積が最小になったが、 $N_p = 40$  の場合は  $r = 0.6$  で探索面積が最小になった。そのため、ピアの存在密度  $N_p$  が高いほど、探索面積の合計が最小となる再現率  $r$  の値が小さくなると考えられる。本シミュレーションでは再現率を  $r = 0.8$  に固定したが、提案手法で  $r$  を調整する際、ピアの存在密度に基づいて決定することが考えられる。

図 9(c), (d) は、セル間の距離  $l$  による探索範囲の矩形数および面積の推移を表している。 $l$  を大きく設定すれば探索範囲である矩形の数が減少し、送信元ピアからのクエリによるオーバーヘッドが小さくなるが、探索面積は大きくなり、不要な範囲のピアを探索すること



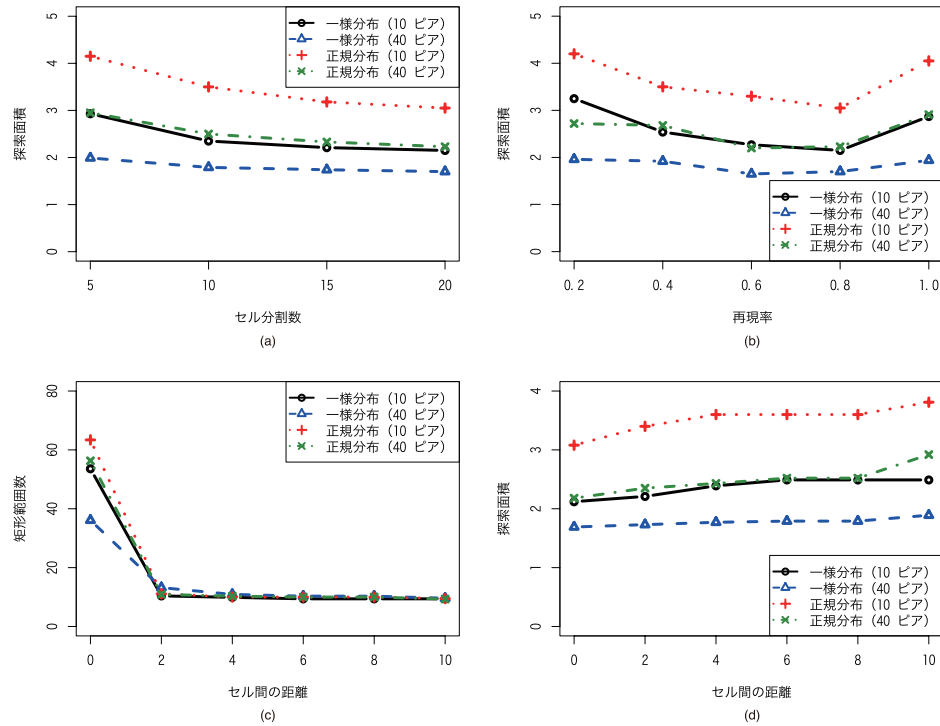


図 9 提案する探索手法の評価

Fig. 9 Evaluation of proposed search method.

になる。一方、 $l$  を小さく設定すれば多くの矩形範囲を探索することになり、送信元ピアからのクエリによるオーバーヘッドが大きくなるが、探索面積は小さくなり、不要な範囲のピアを探索対象から除外される。図 9(c) より、反復探索では合計で約 10 個の矩形範囲により探索している。また、比較手法である 4 エリア探索では、最初のコンテンツ要求エリア  $D_0$  と 2 回目の 4 エリアによる合計 5 個である。一方、図 9(d) より、反復探索では 4~6 周辺で探索面積が一時的に一定になっている。以上の結果より、本シミュレーション環境では 4~6 周辺が矩形数と探索面積のバランスが良いと考え、セル間の距離を  $l = 6$  に設定した。

次に、比較手法である 4 エリア探索との比較結果を図 10(a), (b) に示す。図 10(a), (b) は、それぞれドロネーネットワーク、LL-Net のシミュレーションにおいて探索時に流れる

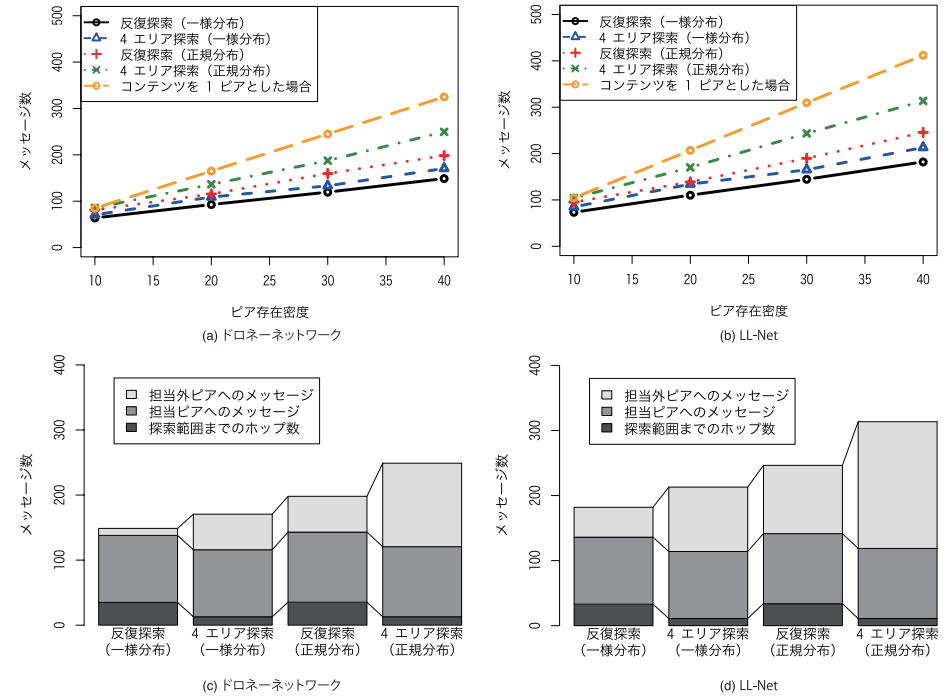


図 10 メッセージ数による評価

Fig. 10 Evaluation by the number of messages.

メッセージ数を表している。メッセージ数は前述の探索範囲に存在するピア数と要求元ピアから送信されるクエリの数に影響される。また、2.1 節で述べたコンテンツの位置に対応した仮想ピアを地理的オーバーレイネットワークを構築し、指定した範囲のコンテンツのみを対象として探索する手法も比較対象としている。図 10(a), (b) より、ピアの存在密度が低い  $N_p = 10$  の環境では、要求元から送信されるクエリの数が少ない 4 エリア探索のメッセージ数は反復探索との差が小さいが、ピアの存在密度が高くなり、探索されるピアの数が増加するに従って、反復探索のメッセージ数との差が大きくなる。

図 10(c), (d) は、それぞれドロネーネットワーク、LL-Net においてピアの存在密度  $N_p = 40$  の場合の内訳で、要求元ピアから探索範囲までのホップ数、コンテンツ要求エリアを担当しているピアへ送信されたメッセージ数、コンテンツ要求エリアを担当してい

ないピアへ送信されたメッセージ数を表している。図 10(c), (d) より, 反復探索はコンテンツ要求エリアを担当していない無関係なピアへのメッセージ送信を抑制している。また, ピアの分布に偏りなどがある環境においては, 4 エリアで 1 度に探索する場合と比べ, 担当外ピアへのメッセージ数の増加をさらに抑制している。そのため, 特にピアの分布に偏りがある実環境においては, 反復探索のように情報を収集しつつ探索処理を進める手法の効率が良いと考えられる。

## 5. ま と め

本研究では, 位置情報に関連する P2P アーキテクチャである地理的オーバーレイネットワークを独立して構築し, さまざまな地理的オーバーレイネットワークに適用可能な位置依存コンテンツ分散管理手法を提案した。また, 提案手法での位置依存コンテンツの検索においては, 担当ピアの存在確率を既知のピアやコンテンツの配置, 分布密度などから計算し, その確率とポロノイ領域で表されるコンテンツ担当領域により, ピア探索範囲を決定するアルゴリズムを提案した。さらに本研究では, 位置依存コンテンツの検索手法の有効性の評価として, シミュレーションを行った。本シミュレーションにより, 適切な範囲のみのピアを探索することで, ピア数が多い環境や分布に偏りがある環境においても, 端末やネットワークへの負荷を抑制しつつ, 必要とするコンテンツを取得できることを確認した。

今後の課題としては, 本研究ではコンテンツは無作為かつ均等に配置されており, ピアとコンテンツが無関係に分布しているなど, より現実的な環境での評価が必要である。また, 現実的な環境では端末の追加や移動, 消失が発生するため, 最近傍ピアによるコンテンツ管理を維持するための対応が必要である。

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金・特定領域研究(18049050)の研究助成, および, NICT・大阪大学共同研究「異種広域センサーネットワークの統合管理技術の研究開発および検証」による成果である。

## 参 考 文 献

- 1) Zheng, Y., Xie, X. and Ma, W.-Y.: GeoLife2.0: A Location-Based Social Networking Service, *Proc. MDM 2009*, IEEE Computer Society (2009).
- 2) 相良 毅, 有川正俊, 坂内正夫: ジオリファレンス情報を用いた空間情報抽出システム, *情報処理学会論文誌: データベース*, Vol.41, pp.69-80 (2000).
- 3) Shu, Y., Ooi, C., Tan, K. 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).

- 4) 松浦知史, 新井イスマイル, 中村 豊, 藤川和利, 砂原秀樹: P2P ネットワークにおける位置に関連した情報の管理・検索手法の提案と評価, 第 46 回プログラミング・シンポジウム報告集, Vol.41, pp.83-94 (2005).
- 5) 中台慎二, 谷口邦弘: PLATON: 超分散環境におけるデータ共有のための P2P 多次元範囲検索システム, *マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DI-COMO2007) 論文集*, pp.173-184 (2007).
- 6) 岩井将行, 高橋 元, 門田昌哉, 中島達夫, 徳田英幸: Tachyon: プライバシを考慮する電子タグ位置情報管理機構, *情報処理学会全国大会論文集, 特別トラック, No.5*, pp.49-53 (2004).
- 7) Aspnes, J. and Shah, G.: Skip Graphs, *Proc. 14th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, pp.384-393 (2003).
- 8) 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, pp.51-64 (2006).
- 9) 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, pp.1-15 (2005).
- 10) Kawakami, T., Takeuchi, S., Teranishi, Y., Harumoto, K. and Shimojo, S.: A P2P-based Mechanism for Managing Location-dependent Contents in Ubiquitous Environments, *Proc. 2007 International Symposium on Applications and the Internet Workshops (SAINT 2007 Workshops)*, CD-ROM (2007).

(平成 23 年 4 月 12 日受付)

(平成 23 年 9 月 12 日採録)



川上 朋也 (正会員)

平成 17 年近畿大学理工学部経営工学科卒業。平成 19 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年同研究科マルチメディア工学専攻特任研究員となり, 現在に至る。P2P ネットワークに関する研究に従事。



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)(平成 18 年 3 月, 大阪大学)。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, 平成 21 年情報通信研究機構専攻研究員を経て, 平成 23 年日本電信電話株式会社未来ねっと研究所研究主任となり, 現在に至る。ソーシャルネットワークおよびオーバーレイネットワークを活用した情報システムの研究開発・展開活動に従事。本会論文賞を受賞。IEEE 会員。



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, 平成 20 年より情報通信研究機構専攻研究員, 招へい専門員を兼任, 平成 23 年より情報通信研究機構研究マネージャおよび大阪大学サイバーメディアセンター招へい准教授, 現在に至る。博士(工学)(平成 16 年 3 月, 大阪大学)。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。本会論文賞を受賞。IEEE 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(平成 19 年より准教授)となり, 現在に至る。博士(工学)(平成 10 年 2 月, 大阪大学)。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。本会論文賞を受賞。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



西尾章治郎 (フェロー)

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, 平成 19 年より平成 23 年まで大阪大学理事・副学長を歴任。この間, カナダ・ウォータールー大学, ピクトリア大学客員。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。本会では理事を歴任し, 論文賞, 功績賞を受賞。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。



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。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, 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副センター長, 平成 17 年同センター長, 平成 19 年同副センター長, 平成 20 年独立行政法人情報通信研究機構大手町ネットワーク研究統括センターセンター長/上席研究員。平成 23 年大阪大学サイバーメディアセンター教授, 独立行政法人情報通信研究機構テストベッド研究開発推進センターセンター長を兼任, 現在に至る。マルチメディア情報システムのアーキテクチャの研究に従事。平成 17 年第 23 回大阪科学賞を授与。工学博士。電子情報通信学会, IEEE 各会員。