

位置情報に基づく P2P ネットワークを用いた 情報通知プラットフォーム

田上 敦士^{†1} 阿野 茂浩^{†1} 富浦 洋一^{†2}

ユビキタス環境の普及にともない、場所や時間などの現在の状況（コンテキスト）を考慮して動作するコンテキストウェアサービスの重要度は増している。コンテキストの中でも特に位置情報は、取得の容易さや活用範囲の広さから多くのサービスに利用が想定される。このため、ユーザすなわち端末の位置情報を管理するメカニズムが重要となる。本稿では、携帯電話端末をクライアントとした、大規模位置情報管理プラットフォームを提案する。携帯電話端末は端末数が多く、常時移動しているため、すべての位置をサーバで集中管理することは困難である。そこで、提案プラットフォームでは、携帯電話端末間で位置情報に基づいた P2P ネットワークを構築し、位置情報を管理する。シミュレーションの結果より提案プラットフォームで、サーバ負荷を大きく軽減する効果があることを示す。

A Platform for Context-aware Notification Service with Location-aware P2P Network

ATSUSHI TAGAMI,^{†1} SHIGEHIRO ANO^{†1}
and YOICHI TOMIURA^{†2}

The importance of context-aware services has grown significantly and it is hoped to provide these services to mobile cellular phones. In this paper, we propose a platform that enables the provision of location-aware services to mobile phones. The number of mobile phones is huge and people mobile phones are always on the move. Thus the platform constructs an P2P network between clients for decreasing the server load and introduces the concept of peers moving to existing P2P network architecture. From a simulation analysis, we evaluate the effectiveness of the proposed platform.

1. はじめに

携帯電話は、IP 接続サービス契約数が 1 億契約に近づくなど¹⁾、身近な情報端末としての地位を確立している。近年、その特性を生かしたサービスとして、ユーザの位置や属性、行動、近隣の人やデバイスなどのコンテキスト情報に応じたサービスを提供するコンテキストウェアサービスが注目を浴びている²⁾。これらのサービスの中でも、現在ほとんどの携帯電話は GPS (Global Positioning System) 機能を持っており位置情報の取得が容易であること、多くの有用な情報が位置や場所に依存していることから、位置情報に基づいたサービスは特に広がりを見せる可能性がある。

我々は、携帯電話に対する位置情報に基づいたサービスの一例として、情報通知サービスについて検討を行ってきた³⁾。本サービスは、近隣のレストランや観光スポットなど、ユーザ近傍の情報を提供する機能と、災害や事故情報などを、特定のエリアに滞在するユーザ全員に広報する機能からなる。

本サービスは情報の流通の観点から 2 つの特徴を持っている。1 つは情報の流通が局所的になることである。ユーザは位置に応じた情報にアクセスするため、あるエリアの情報はそのエリア外のユーザにとっては意味のない情報となる。すなわち、情報は数多く存在するがその情報を必要としているユーザは地理的制約により限定される。もう 1 つは、情報の参照がパースト的になることである。自然災害やタイムセール情報などリアルタイムな情報は、その地域のユーザすべてに同時に送信される。このため、瞬間的に多くの通信が発生する。これらの特徴はサーバの負荷増大を引き起こすこととなる。

サーバの負荷増大の直接の要因としては 2 つの問題が考えられる。1 つは頻繁な携帯電話端末からの要求である。携帯電話端末のストレージは限られているため、また、自然環境のように刻一刻と変化する情報を扱うため、携帯電話は頻繁にサーバから情報を取得する必要がある。サーバは、膨大にある情報の中からそのクライアントが必要とする情報を検索し、応答する必要があり、頻繁な要求はサーバの負荷増大につながる。もう 1 つの問題は、つねに移動する携帯電話の位置管理である。特定エリアの携帯電話に対して災害情報などの緊急性を要する情報を提供するとき、特定エリア内に存在する携帯電話を把握する必要がある。

^{†1} KDDI 研究所
KDDI R&D Laboratories Inc.

^{†2} 九州大学
Kyushu University

このため、サーバはつねに移動している携帯電話の位置を把握する必要がある。以上の問題は、特にサービスを大規模に提供する場合、大きな問題となる。

P2P 技術は、これらの問題の解決に適した技術である。本技術は、近隣の携帯電話（ピア）間で直接情報を交換しサーバ負荷を減らし、さらに、ピアの位置管理をサーバではなくピア間で分散的に実施することができる。これまで、位置による検索⁴⁾ や多次元での検索⁵⁾ を実現する P2P 技術が提案されている。これらの技術はピアの位置に応じた P2P ネットワークを構築し、特定エリア内に存在するピアの検索を実現する。しかしながら、これらの技術はピアの移動を考慮していない。我々が想定しているサービスでは、ユーザはつねに移動している。ピアの移動は P2P ネットワークの再構築を必要とするため、移動を考慮したオーバレイネットワーク構築手法が必要とされる。

そこで本稿では、位置情報を管理する P2P ネットワークにおける移動によるトポロジ変化の効率化を提案する。本提案では、既存の P2P 技術に移動に関する手順を加え、つねにすべてのピアが移動している環境下においても、位置に依存した P2P ネットワークを構築する。さらに、シミュレーションによりその効果を明らかにする。以後、2 章では筆者らが検討してきた位置情報に基づいた通知サービスの概要と、既存の位置情報に基づいた P2P 技術について述べ、3 章では、P2P 技術を用いた位置情報に基づいた通知サービスのためのプラットフォームを提案する。4 章ではシミュレーションを用いてプラットフォームの評価を行う。5 章では関連研究と本研究との関係について述べる。

2. 位置に基づいたサービス

2.1 位置に基づいた情報通知サービス

本節では、本稿で想定する位置に基づいた情報通知サービスについて述べる。本サービスは、クライアント端末となる携帯電話と、コンテンツを保持するサーバからなる。サーバは本サービスで提供されるコンテンツをすべて保持している。また、すべてのコンテンツは位置に紐付けされている。

クライアントは GPS により定期的に位置を測位し、周囲のコンテンツをサーバから取得する。取得されるコンテンツは、コンテンツ自身の位置、自然災害/観光情報などの種別情報、店舗の開店時刻/閉店時刻などの時刻情報を持つ。クライアント端末は、現在のコンテンツリストに応じて最適なコンテンツを取捨選択し、ユーザに対して通知する。コンテンツは詳細情報へのリンクを持っており、ユーザは興味のあるコンテンツの詳細を参照することも可能である。

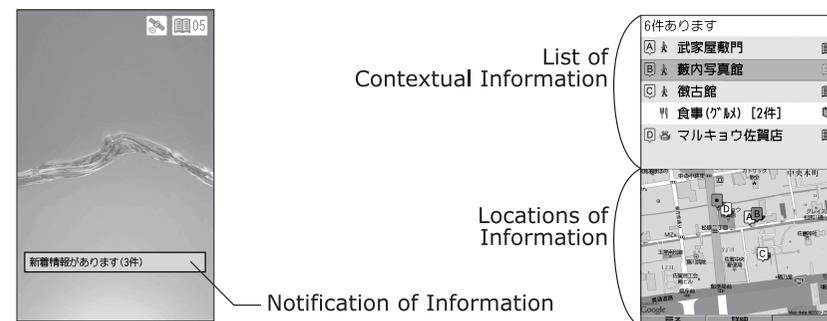


図 1 位置情報に基づく情報通知サービスクライアント画面例
Fig. 1 An example client of location-aware notification service.

また本サービスは、サーバから任意のエリアに滞在するすべてのユーザへ通知する機能も提供する。サーバはクライアント端末の位置情報を管理し、豪雨情報や地震情報、交通事故、タイムセール情報などリアルタイムな情報を特定エリアに滞在するすべてのクライアント端末に広報する。

図 1 は、クライアント端末の画面例を示す。もし、ユーザに通知すべき情報がある場合、クライアント端末は待ち受け画面に通知を表示しあわせて音やバイブレーションでユーザにアラームを出す。ユーザは周辺情報のリストを参照し、興味があるコンテンツがある場合には詳細情報を参照する。すなわち、ユーザは携帯電話を持って歩くだけで、そのときどきにあわせた最適な情報を受け取ることができる。

本サービス提供のエリアは国内レベルを想定している。ただし、バッテリー消費の問題もあるため、ユーザは観光やショッピングで街を歩いているときなど、特定のエリアで限られた時間のみ本サービスの提供を受けると考えられる。このため、コンテンツはサービスエリア全体に様に分布しているのではなく、都市部など限られたエリアに集中している。

2.2 サーバクライアント方式での実現

サーバクライアント方式で、前節で述べた情報通知サービスを実現する方法と、その問題点について述べる。クライアント端末は、自分の現在位置を定期的に測位し、サーバに送信する。サーバは、送信されたクライアント端末の位置から周辺の情報を検索・返信する。また、サーバはこのとき送信されたクライアント端末の位置を記憶しておく。災害情報などリアルタイムな情報を特定のエリアに滞在するクライアント端末に広報するときには、サーバは記憶していたクライアント端末の位置より、広報するエリア内のクライアント端末を選

別し、情報を広報する。

このとき、クライアントの定期的な現在位置送信に対するサーバの処理負荷が問題となる。ユーザが移動している場合、それに応じて周辺情報は更新されることが求められる。このため、クライアント端末は数秒間隔で現在位置を測位し、周辺情報を取得する必要がある。携帯電話は 1 キャリアのユーザ数に限ってもでも数千万人規模であり¹⁾、多数の端末から短い間隔で、サーバに位置が通知されることになる。

これに対して、1 度にサーバから広範囲の周辺情報を取得し、サーバへの現在位置送信の頻度を減らすことが考えられる。しかしながら、クライアント端末として携帯電話端末を想定した場合、リソースが少なく大量の情報を保持できないこと、およびサーバが把握するクライアント端末位置の更新頻度が低くなり、正しく情報の広報ができなくなるといった問題が生じる。

また、複数サーバを用いて負荷分散を行うことも考えられる。たとえば、本サービスで提供するコンテンツの流通が局所的であるという特徴を利用し、サービスを提供するエリアを分割し、それぞれにサーバを設置することが考えられる。しかしながら、イベントなどで特定の場所にクライアント端末が集中するなど、バースト的に特定のエリアのサーバへの負荷増加が想定される。また、本サービスが扱うコンテンツは、災害情報やタイムセールス情報などバースト的に参照されるコンテンツが多くサーバへの要求がバースト的になる傾向が強い。このため、バースト時に合わせてサーバ台数や役割を設計することは、コスト面から現実的ではない。

2.3 位置情報に基づいた P2P 技術を利用した実現

2.2 節で述べた問題の解決に、位置情報に基づいた P2P 技術は適している。位置情報に基づいた P2P 技術は、地理的な位置が近いクライアント端末（ピア）どうしがつながった P2P ネットワークを構築する。各ピアはそれぞれ周辺情報を保持しているため、あるピアが周辺情報を必要としたとき、P2P ネットワーク上でつながったピア（隣接ピア）がその情報を保持している可能性は高い。そこで、ピアは自分の現在位置を定期的に測位し、サーバから周辺情報を取得する代わりに、隣接ピアから周辺情報を取得する。

周辺にピアが存在しない場合、隣接ピアから周辺情報を取得することはできずサーバから取得する必要がある。しかしながら、ピアが密集している状況では、周辺に十分なピアが存在し、隣接ピアからすべての周辺情報を取得できる。すなわち、ピアが特定の場所に集中することによって発生するバースト的なサーバ負荷を軽減することができる。すなわち、サーバ負荷のピーク値を抑えることができ、サービスの管理・運用やサーバ許容量の設計の

負荷も軽減できる。

また、特定のエリアに情報を通知するときは、そのエリア内のいくつかのピアに情報を通知し、そこから周辺のピアにバケツリレー式に情報を伝搬させる。このときも通知エリア内のピア数に依存せずコンテンツの通知が可能である。

本稿では、ピア間の通信として携帯電話網を用いることとする。局所的な情報のキャッシュには、Wi-Fi や Bluetooth といった Ad-Hoc 通信を用いた方法も考えられる。Ad-Hoc 通信を利用した場合は、トポロジ構築のコストが小さいという利点があるが、狭い範囲で閉じたネットワークを形成する可能性があるため、特定のエリアへの情報通知を注力する必要がある。また現在、携帯電話網基地局の情報を必要とする Assisted GPS が広く利用されている。このため、Ad-Hoc 通信を利用するためには、携帯電話網と同時にもう 1 つ無線インタフェースを待ち受け状態にしておく必要があり、携帯電話網のみを利用する場合の方が消費電力の点でも有利であると考えられる⁶⁾。

2.4 位置情報に基づいた P2P 技術

位置（2 次元情報）での検索を実現する P2P 技術は、これまでいくつか提案されている^{4),5)}。これらの技術はピアの位置に基づいた P2P ネットワークを構築し、特定エリア内のピアを検索する機能（領域検索）を実現する。これらは大きく、2 次元情報を 1 次元情報に変換し P2P ネットワークを構築する技術と、2 次元空間のまま P2P ネットワークを構築する技術に分類できる。

ZNet⁵⁾ は位置（2 次元情報）を 1 次元の値に z-curves⁷⁾ などの空間充填法を用いて変換し、その値を ID として SkipGraphs⁸⁾ をベースにした P2P ネットワークを構築する。図 2 (a) に ZNet の構成要素である z-curves と SkipGraphs を示す。SkipGraphs はピア間で、いくつかのレベルからなる双方向リストを構成する。最下位レベルのリストはすべてのノードをキー順に並べたリストである。SkipGraphs は範囲検索を実現しており、ZNet では領域検索を SkipGraphs の範囲検索に変換して実現する。

GeoPeer⁴⁾ はドロネー図ベースのオーバレイネットワークを構築する。図 2 (b) にドロネー図の例を示す。ドロネー図はポロノイ図の双対グラフである。ポロノイ図は、任意の位置に配置された複数個の点（母点）に対して、同一距離空間上の他の点がどの母点に近いかによって領域（ポロノイ領域）分けされた図のことである。ドロネー図はポロノイ領域の隣接関係を表している。GeoPeer はピア間でドロネー図を構成し、位置による検索を効率的に実現している。GeoPeer⁴⁾ ではドロネー図の構築に関する具体的な手順を示していないが、大西ら⁹⁾ が分散生成アルゴリズムを提案している。

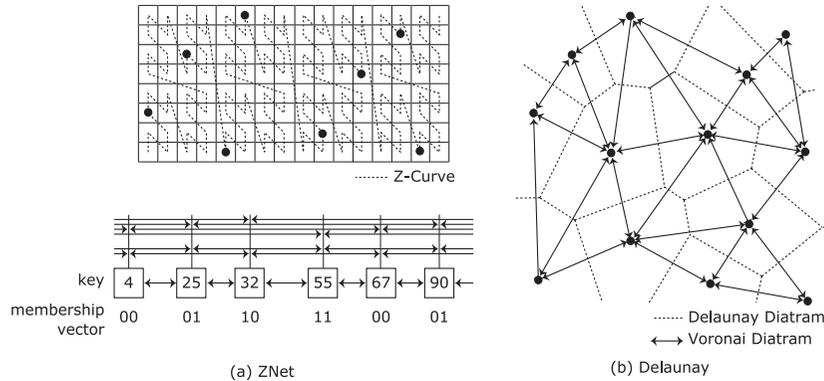


図 2 ZNet とドロネー図の例
Fig. 2 ZNet and Delaunay diagram.

3. 位置に基づいた情報通知サービスのためのプラットフォーム

3.1 概 略

本節では、位置に基づいた情報通知サービスのためのプラットフォームを提案する。本プラットフォームは、サーバと多数の携帯電話端末上のクライアント（ピア）からなる。サーバは位置とコンテンツのタイトル、プロパティと詳細情報へのリンクからなるコンテンツを保持している。ピアは、ピアの位置に基づいた P2P ネットワークを構築し、ピアの位置管理とコンテンツのやりとりを行う。

ピア間で構築する P2P ネットワークは、ZNet⁵⁾ とドロネー^{4),9)} を想定する。これらはサーバを必要としない P2P に分類され、ピアの位置に基づいた P2P ネットワークを構築する。このため、ピアの移動は P2P ネットワークの再構成を必要とする。すでに提案されている位置に基づく P2P ネットワークでは、移動に関する処理が含まれていないため、提案プラットフォームでは移動に関して独自の拡張を行っている。また、P2P ネットワークへの参加に必要な初期ピアの解決は、サーバを利用する。

2.1 節で述べたように、本プラットフォームが想定するサービスでは都市部など限られた領域にコンテンツやサービスを利用するピアが集中する。このため、P2P ネットワークの構築が必要な領域としては数 km 四方程度であると考えられる。サーバはピアの新規参加および移動時に、ピア周辺にあるコンテンツ数やピアの密集度から、P2P ネットワークを構築

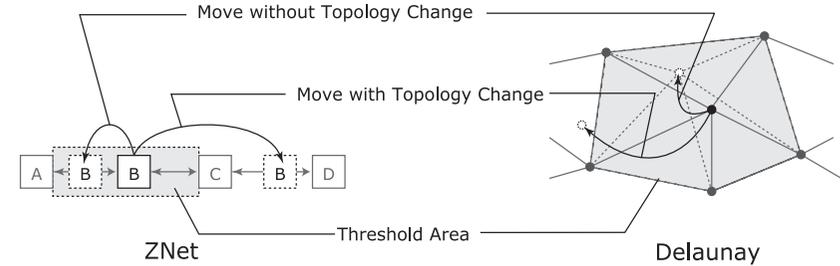


図 3 トポロジが変更されない境界
Fig. 3 Threshold area of position change on P2P network.

すべきかどうか判断し、ピアに P2P ネットワークへの参加を促す。

3.2 移動処理

提案プラットフォームでは、ピアの位置に基づいた P2P ネットワークを構築するため、ピアの位置が変更されると P2P ネットワーク上の位置も変更する必要がある。本プラットフォームでは、ピアは快適なサービスに必要な短い時間（5 秒）で位置を測位するため、位置更新処理は負荷の大きい処理となる。そこで、トポロジの変更を引き起こす位置変更のみを P2P ネットワークに通知することにより、P2P ネットワーク上の位置の更新頻度を軽減する。これにより、実環境におけるピアの位置（実位置）と P2P ネットワーク上での位置（仮想位置）が完全に一致しないという問題が生じる。しかしながら、P2P ネットワークはそのトポロジを利用して検索を行うため、位置を完全に一致させたときと隣接ノードテーブルが同一であるならば、検索結果は等しくなるといえる。

図 3 に 2 つのモデルのオーバーレイネットワークのトポロジが変更されない境界を示す。ZNet の場合、SkipGraphs の最下位レベルの隣接ピアを越える移動をしない限り、トポロジは変化しない。このため、最下位レベルの隣接ピアの間が仮想位置を変更しない領域となる。ドロネーの場合、厳密には移動のたびにドロネー図の再計算を行い、トポロジが変化するかどうかを確認する必要がある。しかしながら、ドロネー図の再計算には隣接ピアの情報だけでは不十分であり、2 ホップ先のピアの位置情報も必要となる。そこで本稿では、隣接ピアの情報のみで計算可能な、隣接ピアからなる多角形を仮想位置を変更しない領域とする。この領域を越えたとき、明らかにドロネー図のトポロジは変化する。

移動処理は、古い位置のピアの離脱と新しい位置のピアの参加を同時に行うことで実現する。ただし、ピアの移動による位置変更のみを扱い、大きく変動することはないため、新し

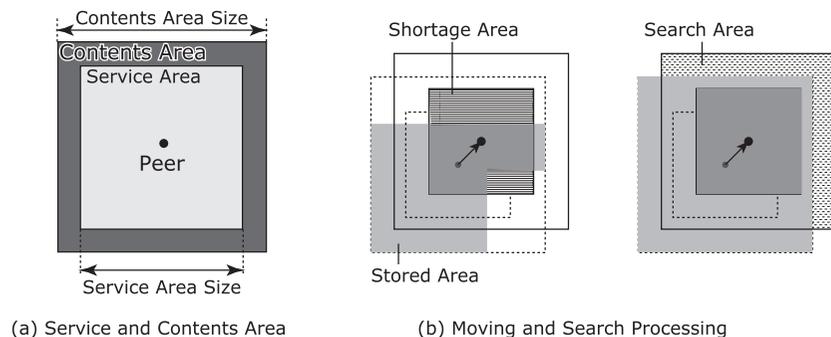


図 4 2つの領域と移動処理

Fig. 4 Two areas and moving processing.

い位置に最も近い隣接ノードに対して参加処理を行うことにより迅速に移動処理を行うことができる。

3.3 保持コンテンツの管理

携帯電話のリソースは限られているため、保持する情報は制限される。しかしながら、P2P ネットワーク上でのコンテンツ検索は、hop-by-hop での検索となるため、サーバによる検索と比較すると応答までに時間を要する。そのため、コンテンツ検索中にもサービスを提供するため、サービス提供に必要な最小限な領域より大きな領域の情報を保持する必要がある。そこで、提案プラットフォームでは、ピアは2つの領域を用いてコンテンツを管理する。

図4(a)にピアが管理する実位置を中心とした2つの領域を示す。サービス領域はユーザに通知される領域を示し、ピアはサービス領域内のコンテンツからユーザのコンテキストに一致するものを選択しユーザへ通知する。コンテンツ領域は、ピアに保持されるコンテンツの領域を表し、本領域外のコンテンツはピアから消去される。コンテンツ領域はサービス領域を固定長分拡張した領域とする。

図4(b)にピアが移動したときの処理を示す。ピアが移動したとき、サービス領域とコンテンツ領域の位置は更新され、ピアは新しいサービス領域内のコンテンツをすべて保持しているかを確認する。もし右図のように、すべてのコンテンツを保持していた場合、すなわちサービスに必要なコンテンツをすべて保持していた場合は、ユーザに通知すべき情報があれば通知し、更新されたコンテンツ領域の中で保持していないコンテンツをP2Pネットワークを用いて検索する。一方左図のように、すべてのコンテンツを所持していなかった場

合は、サービス提供のためのコンテンツが不足しているため、サーバより更新されたコンテンツ領域の情報を取得し、即座にサービスを行えるようにする。

コンテンツ領域に必要な大きさはピアの移動速度に依存し、サーバの負荷を軽減するには、次の移動(たとえば5秒後)までにサービス領域がコンテンツ領域外に出ないことが求められる。また、新しいコンテンツの追加やコンテンツの更新があったとき、サーバはそのコンテンツを保持している可能性のあるピアに対して通知し、各ピアのコンテンツ領域内の情報を変更する。このコンテンツ領域内のコンテンツの更新は、3.5節で述べるエリア内情報通知処理とほぼ同様にして実現できる。相違はメッセージがあったことをユーザに通知しない点である。

3.4 参加処理

ピアがP2Pネットワークに参加するとき、P2Pネットワークにおける隣接ピアテーブル生成と、コンテンツ領域内のコンテンツ取得を行う必要がある。隣接ピアテーブルの生成に関しては、既存のP2P技術の参加処理に従う^{5),9)}。P2Pネットワークの参加処理には、すでにP2Pネットワークに参加しているピアのIPアドレスを少なくとも1つは知っている必要がある。このピアを初期ピアと呼ぶ。提案プラットフォームでは初期ピアをサーバより取得し、同時に起動処理の1つであるコンテンツ領域内のコンテンツも取得する。

初期ピアは任意のピアで問題ないが、高速な参加処理のためには、初期ピアはオーバーレイネットワーク上で新規参加ピアに最も近いピアが好ましい。もちろん、サーバがすべてのピアの位置を知っている場合、最適な初期ピアを選択可能である。しかしながら、本プラットフォームでは、ピアの位置を自律分散管理しており、サーバがすべてのピアの位置を知らないことを前提としている。初期ピアの決定方法を以下に示す。

サーバは、エントリ数の上限がある「初期ピアテーブル」を所持する。ピアがサーバにコンテンツを要求したとき、そのピアのIPアドレスと位置など参加に必要な情報を初期ピアテーブルに追加する。初期ピアテーブルが、あらかじめ決められているサイズを超えた場合、最も古く追加されたピアの情報から削除する。サーバは、新規参加ピアから初期ピアを要求されたとき、P2Pネットワーク上で新規参加ピアに最も近いピアを初期ピアテーブル上から検索し、そのピアのIPアドレスを返す。ただし、初期テーブル上のノードがすでに離脱している可能性を考慮し、複数個の初期ピア候補を新規参加ピアには返す。

上記処理により、初期ピアテーブル管理のための新たな通信を必要とせず、適切な初期ピアを選択可能である。サーバは各ピアの位置をリアルタイムには把握しておらず、現在位置と初期ピアテーブル上の位置が乖離している場合も考えられる。しかし、初期ピアは最適な

ものである必要はなく、近傍のピアであれば十分高速に起動処理を完了することができる。

3.5 エリア内情報通知処理

本プラットフォームが提供する機能の 1 つである、任意のエリアに滞在するすべてのピアへの情報通知機能の手順を以下に示す。

サーバは初期ピアテーブルから、通知エリア内のピアもしくは通知エリアに近いピアから順に数個検索する。サーバは検索されたピアに対して通知メッセージを送信する。通知メッセージを受信したピアは、自らが通知エリア外であった場合は、通知エリアに最も近い隣接ピアに通知メッセージを転送する。自らが通知エリア内であった場合は、必要に応じてユーザに通知する。また、各 P2P ネットワークの手順に従い、通知エリア内もしくは通知エリアに近いピアに対して通知メッセージを転送する。通知メッセージはサーバより付加された識別子を持っており、各ピアはすでに受信したメッセージに関して転送処理を行わない。転送されるメッセージがなくなった時点で通知処理は完了する。

初期ピアの選択手順を除いては、既存 P2P 技術で実装されている領域検索手順^{5),9)}と同じ手順で任意のエリアへの情報通知が可能となる。本機能は災害情報など緊急性を持つ情報を広報するだけでなく、新規コンテンツの追加やコンテンツの更新通知に利用される。

4. 評価

4.1 シミュレーション環境

提案プラットフォームの評価を行うためにシミュレーションソフトウェアを新たに構築した。シミュレータはサイクルベースのシミュレータであり、サイクル時間は 100 ms とした。ピア間通信の遅延は 100 ms、すなわち 1 サイクルとした。ピア間通信の遅延は、3G 携帯電話網を想定した値である。また、サーバやピア間での送信メッセージ数の評価には、通信遅延未済の粒度は必要としないため、サイクル時間と通信遅延を同値とした。表 1 にシミュレーションのパラメータを示す。ピアはポアソン分布に従って参加する。その後、バッテリー消費などの問題から長時間サービスを受けることが現実的でないため、平均 30 分、分散 10.0^2 のガウス分布に従う時間が経過した後 P2P ネットワークから離脱する。ピアの参加数と離脱数がほぼ等しくなる定常状態におけるピア数は、ポアソン分布の平均値 λ により決定される。初期ピアテーブルのエントリ数は 100 とする。サービス領域は 60 m 四方の矩形とし、コンテンツ領域はシナリオにより変化させる。

移動を実装するために、本シミュレータは道と交差点からなる地図を用いる。ピアはランダムに決定された、ある 1 つの交差点上に出現する。次に、ピアはランダムに交差点からの

表 1 シミュレーションパラメータ
Table 1 Summary of simulation parameters.

Simulation Cycle	100 [ms]
End-to-End Delay	100 [ms]
Peer Appearing	Poisson Process
Average of Poisson Process (λ)	0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 0.3, 0.4, 0.5, ..., 1.0 [peers/s]
Stay Time	$N(30, (10)^2)$ [min]
Velocity	$N(4, (1)^2)$ [km/h]
Bootstrap Table	50 [entry]
Service Area	60 m square
Simulation Time	70 [min]
Measurement Time	60 - 70 [min]

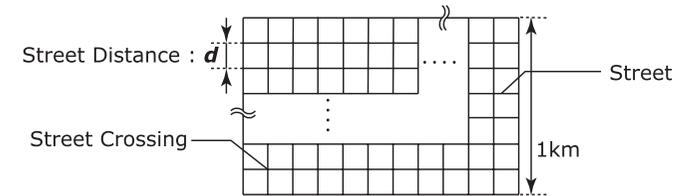


図 5 メッシュマップ
Fig. 5 Mesh map.

びる道を 1 つ選択し、道沿いに移動を行う。ピアは反対側の交差点に到着後、再び道の選択を行い移動を行う。ピアは参加時に平均 4.0 km/h、分散 1.0^2 のガウス分布に従う移動速度を決定し、以後その速度で移動する。評価はメッシュマップ (図 5) を用いる。メッシュマップは 1 km 四方の空間の中に間隔 d で縦横に道が通っている。

評価は定常状態、すなわち単位時間でのピアの参加数と離脱数がほぼ等しい状態で評価を行う。このため、ピア数が 0 の状態からシミュレーションを開始し、平均滞在時間の 2 倍である 60 分動作させた後、10 分間のデータを計測する。シミュレータは参加ピア数の瞬間値、1 秒間での受信メッセージ数を 1 秒間隔で出力する。

P2P ネットワークとしては、つねにピアが移動している環境下においても安定して動作する³⁾ ドローンを用いる。P2P ネットワークを構築しないサーバクライアントモデルも比

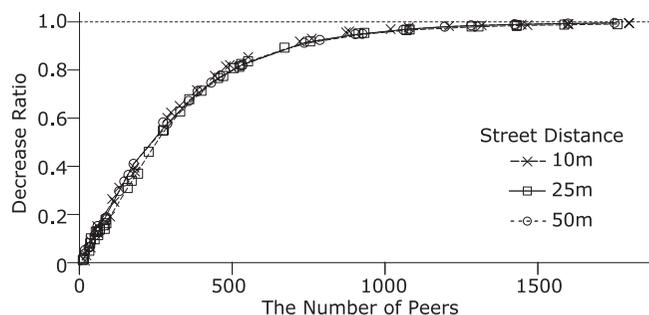


図 6 サーバ負荷軽減率の理想値

Fig. 6 Ideal decrease ratio of server load.

較のため用意した。

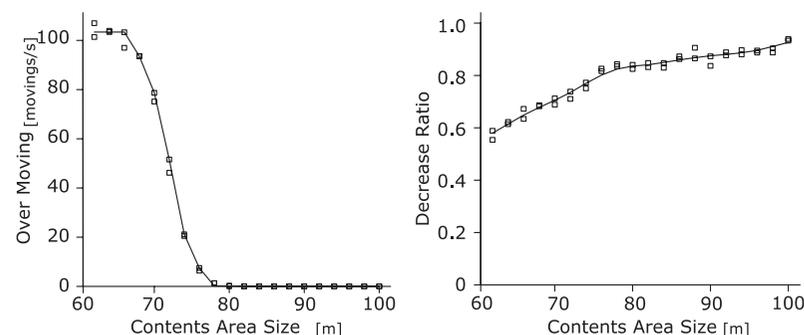
4.2 近傍ピアのコンテンツ利用によるサーバ負荷軽減効果

P2P ネットワークによるサーバ負荷軽減効果を評価するため、ピアが移動し新しいコンテンツを必要としたとき、そのコンテンツが自分以外のピアのコンテンツ領域に含まれる割合をシミュレーションを用いて求めた。すなわち、移動後、図 4 (b) 右図の状態となり、かつ、検索領域すべてが、他ノードのコンテンツ領域に含まれる確率を求めた。その結果を図 6 に示す。コンテンツ領域のサイズは 80 m 四方、格子サイズは 10 m, 25 m, 50 m とした。10 分間分のデータ計測結果から確率を求めプロットし、曲線はプロットした点を LOWESS¹⁰⁾ により平滑化した曲線である。

本結果より 1 km² に 500 ユーザ滞在中のとき、80% 程度のコンテンツ検索はサーバではなく、P2P ネットワーク上で取得可能であることが分かる。また、その確率は地図の形状ではなく面積あたりのユーザ数で決定するといえる。ただし、本結果は自分以外のピアがコンテンツ領域のコンテンツをすべて保持しているという理想的な条件での結果である。実際にピア間で P2P ネットワークを構築し、サーバ負荷軽減効果を解析した結果は 4.4 節で述べる。

4.3 コンテンツ領域サイズ

コンテンツ領域のサイズはピアのリソースに依存するパラメータである。しかしながら、提案手法は 1 回の移動により、サービス領域がコンテンツ領域から外れないことを前提としている。もし、サービス領域が 1 回の移動によりコンテンツ領域から外れた場合、たとえ P2P ネットワークを利用してサービス領域のコンテンツをすべて取得できた場合において



(a) Moving over Contents Area (b) Ideal Decrease Ratio of Server Load

図 7 コンテンツ領域とコンテンツ領域を越える移動の回数およびサーバ負荷軽減率の関係

Fig. 7 Storage area size vs over moving and ideal decrease ratio of server load.

も、コンテンツが不足しサーバへのアクセスが発生する。このため、最低限必要なコンテンツ領域のサイズが存在する。

図 7 (a) に、コンテンツ領域のサイズとコンテンツ領域を越えて移動した回数のグラフを示す。道の間隔は 25 m, $\lambda = 0.3$ (平均滞在ピア数 500 ピア程度) とした。移動領域を越えて移動した回数は、毎秒あたりの発生回数の平均値で算出した。これより、コンテンツ領域として 80 m 四方を確保すれば、ほぼコンテンツ領域を越えて移動することはないことが分かる。

また、コンテンツ領域のサイズを大きくした場合、1 ピアが持つコンテンツが増加するため、P2P ネットワークでのコンテンツ検索ヒット率が増加することが考えられる。図 7 (b) に、コンテンツ領域のサイズとサーバ負荷軽減率の理想値を示す。理想値の導出方法は 4.2 節と同様とし、道の間隔は 25 m, $\lambda = 0.3$ とした。コンテンツ領域のサイズが大きくなるほどサーバの負荷は軽減されているが、その軽減率の増加は 80 m あたりから鈍くなっている。これは、80 m 以上でコンテンツ領域を越えた移動が発生しないこと、ピアの密度が十分でありコンテンツ領域を拡張しても検索ヒット率に変化がないためである。すなわち、大きすぎる記憶領域は、ピアのリソースを浪費するだけであり、サーバの負荷軽減に与える効果は小さいといえる。以上より以後、コンテンツ領域のサイズを 80 m 四方として評価する。

4.4 P2P ネットワーク構築時のサーバ負荷軽減効果

4.2 節で述べたとおり、近傍のピアが所持しているコンテンツを利用することによって、

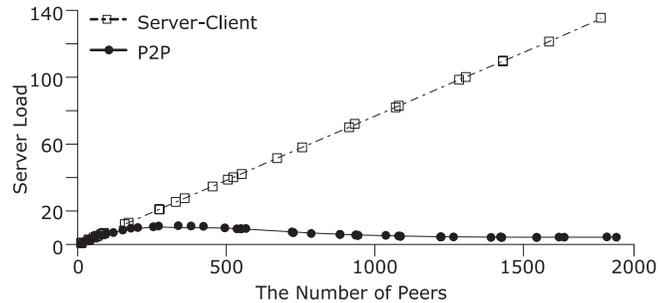


図 8 ピア数とサーバ負荷の関係

Fig. 8 The number of peers vs the server load.

周辺情報の取得に関するサーバへの負荷を大きく軽減することができる。このため、ピア間で P2P ネットワークを構築し、近傍のピアが取得しているコンテンツを収集する提案プラットフォームはサーバ負荷を大きく軽減することが期待される。しかしながら、すべてのピアが移動している環境下では P2P ネットワークトポロジはつねに不安定な状態であり、近傍のピアが所有しているコンテンツをすべて検索可能であるとは限らない。また、ピアはコンテンツ領域のコンテンツをすべて所有している保証もない。これらの影響を明らかにするため、実際にピア間で P2P ネットワークを構築したときのサーバ負荷軽減効果について解析する。

図 8 にピア数とサーバ負荷の関係を示す。サーバ負荷は 1 秒間でサーバに到着する検索メッセージ総数の平均値とした。ピア数は 1 秒ごとの瞬間ピア数の平均とした。コンテンツ領域のサイズは 80 m、道の間隔は 25 m とした。これより、すべてのピアが常時移動している環境下においても、ピア間で P2P ネットワークを構築することにより、サーバ負荷がピア数に比例せず、急激にピア数が増加した場合においてもサーバ負荷が急増することはないといえる。

図 9 (a) に 4.2 節で求めたサーバ負荷軽減率の理想値と、シミュレーションの結果の比較を示す。シミュレーションの結果としては、3.2 節で提案したトポロジの変化がない場合には P2P ネットワーク上での位置 (仮想位置) を変更しない場合 (Proposed) と、仮想位置と実環境における位置 (実位置) を完全に一致させる場合 (Full matching) を評価した。シミュレーション結果はサーバクライアントの結果を線形近似し、これを母数として減少率を求めた。これより、提案手法は理想値より 3% 程度乖離しているが、ほぼ理想値どおりの結

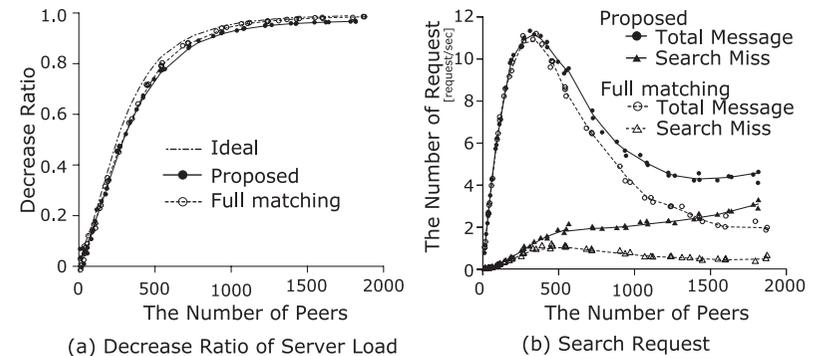


図 9 サーバ負荷軽減率とサーバへの検索要求の原因

Fig. 9 Decrease ratio of server load and cause of search request.

果がでていることが分かる。

理論値との乖離の原因は、不安定な P2P ネットワークに起因する検索の失敗と、ピアがコンテンツ領域全体のコンテンツを保持していないことに起因するコンテンツの不足が考えられる。そこで、図 9 (b) に検索要求の総数と、P2P ネットワーク上での検索ミスに起因する要求数を示す。検索ミスとは、他ピアが保持しているコンテンツでカバーできるにもかかわらず、サーバへの検索要求を行うことである。すなわち、P2P ネットワーク上での検索に何らかの問題があった場合である。検索ミス以外の検索要求の原因は、コンテンツ領域を越える移動のためと、他のピアがコンテンツを保持していないための 2 つが考えられる。ピア数が 1,000 ピア以下の場合には、検索ミスに起因する検索要求はほとんどなく、ほぼ、コンテンツの不足がサーバへの検索要求の要因である。コンテンツの不足は、ピア数が増加するに従い減少し、検索要求の総数も減少している。それに対して、検索ミスはピア数が増加するほど増加していることが分かる。

検索ミスの原因としては、頻繁なピアの参加・離脱にともなう不整合 (Churn 問題) と、仮想位置と実位置の不一致にともなう不整合が考えられる。図 10 (a), (b) にピアの参加・離脱がない場合との比較結果を示す。これより、参加・離脱がサーバの負荷・検索メッセージ数に与える影響はほとんどないといえる。これは、ピアは参加時に初期ノード表と同時に、ピアが保持すべきコンテンツをサーバから取得するため、新規ピアは迅速に他のピアと同等に動作することができ、参加・離脱による影響が少ないためである。また、図 9 (b) より、仮想位置と実位置を一致させた場合と比較すると、提案手法は検索ミスが大きく増加

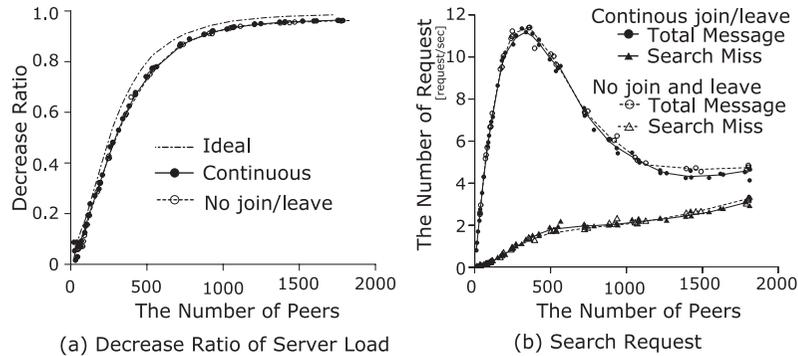


図 10 ピアの頻繁な参加/離脱が検索メッセージに与える影響
Fig. 10 The infuence of peers continuous arrival and departure.

していることが分かる。これは、ピアが保持している隣接ノードの位置が実際の位置とは異なるため、トポロジを保持しているつもりでも実際にはトポロジが変化してしまっていることに起因する。しかしながら、図 8 より、サーバクライアント方式におけるサーバ負荷と比較すると、十分にサーバ負荷が抑えられていることが分かる。

4.5 P2P ネットワーク上のメッセージ数

本節では、P2P ネットワーク上を流れるメッセージについて評価する。提案プラットフォームでは、流通するコンテンツデータサイズも小さく、ネットワークの負荷ならびにピアでの計算量の負荷を評価するにはメッセージ数の評価が適している。

図 11 に P2P ネットワーク上の制御メッセージ数とピア数の関係を示す。メッセージは参加離脱時のメッセージ、移動にともなう P2P ネットワーク再構成のメッセージ、コンテンツ検索のためのメッセージの 3 種類に分類される。1 秒間に流れた総メッセージ数をピア数で割り、その平均をプロットした。

メッセージ総数はピア数の増加にともない増加しており、その大部分は、再構成のためのメッセージが占めている。また、仮想位置と実位置を完全に一致させたときのメッセージ総数と比較すると、ピア数が 500 人で 20.0%，1,500 人で 8.6%のメッセージを削減している。ピア数が多くなるに従い削減率が減少している原因は 4.4 節で述べた検索ミス増加にともなう検索メッセージの増加である。

図 12 (a) にピア数と P2P ネットワーク上で 1 秒間に位置が変更されたピアの総数の平均を示す。3.2 節で述べたように、トポロジの変化が生じない移動において P2P ネットワー

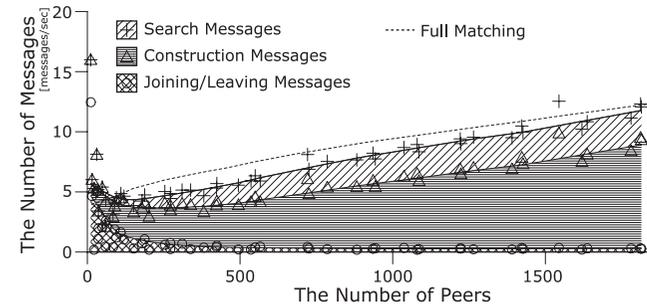


図 11 ピアごとの P2P 制御メッセージ数
Fig. 11 The number of control message on P2P network.

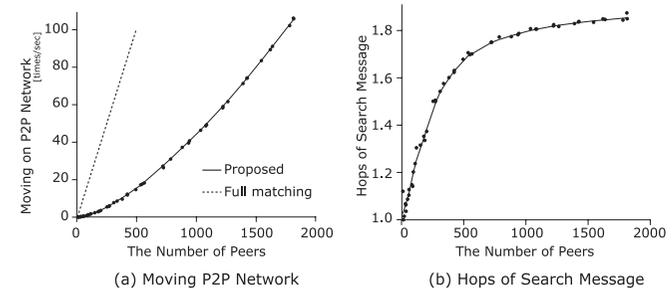


図 12 P2P ネットワーク上での移動回数と検索メッセージの平均ホップ数
Fig. 12 The number of moving on P2P network and average hop count of search message.

ク上の仮想位置の変更は行わないため、トポロジの変更をともなうと判断された総数を意味する。実位置と仮想位置を完全に一致させたときと比較して、移動処理を大きく減らすことを実現していることが分かる。ピアの移動回数の減少率と比較して図 11 の総メッセージ数の減少率が小さいが、これはトポロジの変更をともなわない移動処理では、隣接ピアに対して自ピアの新しい位置を通知するのみで、メッセージがそれ以上広がらないためである。

一方、検索メッセージ数は、ピア数の増加に対してさほど大きく増加していない。図 12 (b) にピア数と P2P ネットワーク上での検索メッセージの平均ホップ数を示す。ピア数の増加にともない平均ホップ数も増加しているが、その上昇は緩やかである。現実的なピア数では 2 ホップ以内で検索が完了しており、効率的な検索を実現できていることが分かる。

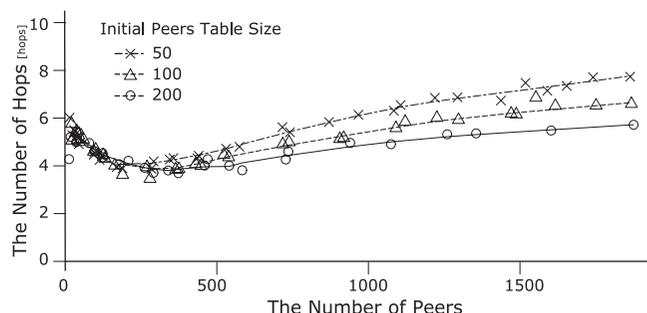


図 13 エリア内情報通知メッセージのホップ数とピア数の関係
Fig. 13 Hop count for notification to all clients.

4.6 エリア内情報通知処理

本節では、エリア内情報通知処理について評価する。サーバが通知メッセージを直接送信するピアは 3 とした。通知エリアはランダムに 100 m 四方の正方形エリアとし、定常状態において 400 回サーバから通知メッセージを送信した。このとき、ピアが初めてサーバより通知メッセージを受信してから、すべての通知メッセージの転送が完了するまでのサイクル数、すなわち、通知メッセージの最大ホップ数を計測した。

図 13 に通知メッセージの最大ホップ数の平均とピア数の関係を示す。ピア数が増加すると通知エリア内のピア数が増加するため、最大ホップ数も増加する。また、初期ピアテーブルのサイズが大きい場合には、より通知エリアに近いピアを検索可能となるため、最大ホップ数を減らすことができる。

4.7 ピア密度に偏りのある環境下での評価

メッシュ型のマップではマップ全体でピアの偏りなどは存在しない。そこで、最後にピア密度に偏りのある環境下での評価を行った。図 14 は実際の地図をトレースし、作成したマップ上でピアからサーバに対して検索要求があったエリアをプロットしたものである。10 m² 四方で検索要求数を平均し、頻繁に要求されたエリアほど濃い色でプロットしている。λ = 1.0 (平均滞在ピア数 1,700 ピア程度)、コンテンツ領域のサイズを 80 m とした。

本シミュレーションでピアは必ず交差点に出現するため、交差点が密集する場所と疎な場所ではピアの密度に差が生じる。すなわち図 14 において、中央部ではピアが密集しており、右下や左下の部分ではピアがあまり滞在していない。このため、それぞれのエリアにおいてサーバに対する検索要求が生じている原因は異なり、中央部では不安定な P2P ネットワー

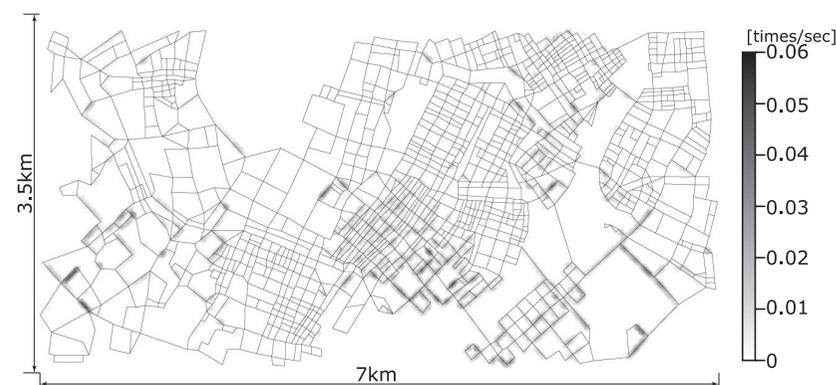


図 14 ピア密度に偏りのある環境下でのサーバへの検索要求頻度
Fig. 14 Search request frequency with biased density of peers.

ク上での検索失敗が原因であり、右下や左下の部分では滞在ピアが不足していることによるコンテンツの不足が原因である。

また、サーバの検索要求頻度の値は小さく、ピア密度に偏りのある環境下においても、提案プラットフォームはサーバを負荷軽減する役割があることが分かる。

5. 関連研究

P2P 技術は、サーバなどの負荷が集中する機器がなく、大規模化に向いているといわれている。この特徴を生かすために、PC だけでなくゲーム端末、携帯電話などのモバイル端末の情報配信技術としても検討されている。たとえば、サーバの負荷をピア間の通信で軽減する情報配信技術の 1 つである BitTorrent¹¹⁾ は、モバイル端末に実装されている^{12),13)}。Conti¹⁴⁾ は、広く利用されている P2P ファイル交換アプリケーションの 1 つである Gnutella を MANET 上で動作させた場合の性能評価を行っている。しかしながら、これらの P2P 技術は位置情報に基づいた情報検索に対応していない。

また、Wi-Fi や Bluetooth などの Ad-Hoc 通信を用いて構築した MANET (Mobile Ad-Hoc Network) に関する研究開発も多く行われている^{15),16)}。Hsieh ら¹⁵⁾ は、携帯電話網 (セルラ網) のエリア外において MANET を利用して接続性を確保する技術を提案している。また、Luo¹⁶⁾ は携帯電話網と MANET を融合して利用し、スループットを向上させる技術を提案している。しかしながら、これらの目的は MANET による携帯電話網のエリ

ア拡充やスループット向上である。

近年、センサネットワークの計測結果管理を目的として、位置に基づいた検索を可能とする P2P 技術が提案されている^{17),18)}。Ratnasamy ら¹⁷⁾ は P2P 技術の 1 つである分散ハッシュテーブル (DHT: Distributed Hash Table) を利用して MANET 上でストレージを構築する GHT (A Geographic Hash Table for Data-Centric Storage) を提案している。GHT はハッシュキーをセンサノードの位置と対応させることで位置に基づいた検索を実現している。Landsiedel ら¹⁹⁾ は、ピアの移動を考慮した MANET 上での DHT である MHT (Mobile Hash Table) を提案している。MHT はピアの位置だけでなく、速度や移動方向を周囲のピアに通知することによりデータをより長く保持できるピアがデータを蓄積する。これらは、Ad-Hoc 通信を用いるため隣接ピアの管理などの点で有利であるが、狭い領域で閉じたネットワークを形成する可能性があるため、情報の更新やエリア内情報通知を注意して行う必要がある。

本稿で述べた ZNet⁵⁾ や GeoPeer⁴⁾ だけでなく、位置情報に基づいた P2P 技術が提案されている。Tanin ら¹⁸⁾ は、4 分木を用いてユークリッド空間を分割し、分割空間を DHT に格納する方法を提案している。これらも本稿で提案したプラットフォームへの適用は可能であり、サーバへの負荷軽減効果としては同様の結果が得られる。しかしながら、すべてのピアが移動し、頻繁に参加離脱を行う環境下では、メッセージの到着遅延に起因する不整合状態が発生しやすい。これは、ZNet などのようにリストや木構造をベースとした P2P では重大な問題であり、例外処理のためのメッセージを多く送受信する必要がある。

6. おわりに

本稿では、位置に基づく通知サービスのためのプラットフォームを提案した。本プラットフォーム上のクライアントは、位置に基づく P2P ネットワークを構築しサーバ負荷を軽減する。具体的には、1 km² あたり 500 以上のピアが存在するとき、理想的にはサーバの負荷を 80~90% 軽減可能である。さらに、ドローン図ベースの P2P をシミュレーション上に実装し、ピアがつねに移動している条件下においても、ほぼ理想値と等しいサーバ負荷軽減が実現可能であることを示した。

P2P ネットワークによるサーバ負荷軽減効果は、ピア数が増加するほど高い効果を得られる。このため、ピア数に関係なくサーバの負荷は一定に保つことができる。これはピア密度によるサーバ負荷の偏りを無視できるため、大規模にサービスを行う際のサーバ設計を容易にすることができる。

しかしながらピアが狭い範囲に密集した場合、P2P ネットワークのトポロジ変更が頻繁に発生し、P2P ネットワークが不安定となる。また、トポロジ変更に起因するメッセージが増加しアクセス回線の帯域を圧迫する。このため、ピア数が密集している地域では P2P ネットワークを階層化するなど、P2P ネットワークの安定化が必要となる。

本結果より、提案プラットフォームにより、サーバの負荷を低く保ちながら多数の携帯電話ユーザに対して位置に基づいたサービスを提供可能であることを示した。今後本技術は、広く利用されることが期待される。

参 考 文 献

- 1) TCA: 社団法人電機通信事業者協会. <http://www.tca.or.jp/>
- 2) Baldauf, M., Dustdar, A. and Rosenberg, F.: A Survey on Context-aware Systems, *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, Vol.2, No.4, pp.263-277 (2007).
- 3) Tagami, A., Ano, S. and Tomiura, Y.: Simulation Analysis of Moving Peer Influence on Location-aware P2P Network, *Proc. IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, Perth, Australia, pp.1121-1127 (2010).
- 4) Araújo, F. and Rodrigues, L.: Geopeer: A Location-Aware Peer-to-Peer System, *IEEE International Conference on Network Computing and Applications (NCA)*, Cambridge, MA (2004).
- 5) Shu, Y., Ooi, B., Tan, K. and Zhou, A.: Supporting Multi-dimensional Range Queries in Peer-to-Peer Systems, *IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P)*, Konstanz, Germany, pp.173-180 (2005).
- 6) Mahmud, K., Inoue, M., Murakami, H., Hasegawa, M. and Morikawa, H.: Energy consumption measurement of wireless interfaces in multi-service user terminals for heterogeneous networks, *IEICE Trans. Comm.*, Vol.E88-B, No.3, pp.1097-1110 (2005).
- 7) Orenstein, J.A. and Merrett, T.H.: A class of data structures for associative searching, *ACM SIGACT-SIGMOD Symposium on Principles of Database Systems*, Ontario, Canada, pp.181-190 (1984).
- 8) Aspnes, J. and Shah, G.: Skip graphs, *ACM Trans. on Algorithms (TALG)*, Vol.3, No.4, p.37 (2007).
- 9) 大西真晶, 源元佑太, 江口隆之, 加藤宏幸, 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*, Vol.47, No.4, pp.51-64 (2006).
- 10) Cleveland, W.: LOWESS: A program for smoothing scatterplots by robust locally

- weighted regression, *American Statistician*, Vol.35, No.1, p.54 (1981).
- 11) BitTorrent. <http://www.bittorrent.com/>
 - 12) Rajagopalan, S. and Shen, C.C.: A Cross-layer Decentralized BitTorrent for Mobile Ad hoc Networks, *International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems (BIQUITOUS)*, Los Alamitos, CA, pp.1–10 (2006).
 - 13) Ekler, P., Nurminen, J.K. and Kiss, A.: Experiences of implementing BitTorrent on Java ME platform, *IEEE Workshop on Peer-to-Peer for Handheld Devices*, Las Vegas, NV, pp.1154–1158 (2008).
 - 14) Conti, M., Gregori, E. and Turi, G.: A cross-layer optimization of gnutella for mobile ad hoc networks, *ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Urbana-Champaign, IL, pp.343–354 (2005).
 - 15) Hsieh, H.Y. and Sivakumar, R.: Performance comparison of cellular and multi-hop wireless networks: A quantitative study, *ACM International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems (SIGMETRICS)*, Cambridge, MA (2001).
 - 16) Luo, H., Ramjee, R., Sinha, P., Li, L. and Lu, S.: UCAN: A Unified Cellular and Ad-Hoc Network Architecture, *International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, New York, NY, pp.353–367 (2003).
 - 17) Ratnasamy, S., Karp, B., Yin, L., Yu, F., Estrin, D., Govindan, R. and Shenker, S.: GHT: A Geographic Hash table for Data-Centric Storage, *ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*, Atlanta, GA, pp.78–87 (2002).
 - 18) Tanin, E., Harwood, A. and Samet, H.: A Distributed Quadtree Index for Peer-to-Peer Settings, *International Conference on Data Engineering (ICDE)*, Tokyo, Japan, pp.254–255 (2005).
 - 19) Landsiedel, O., Gotz, Z. and Wehrle, K.: Towards Scalable Mobility in Distributed Hash Tables, *Proc. IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P)*, Cambridge, MA, pp.203–209 (2006).

(平成 22 年 5 月 31 日受付)

(平成 22 年 11 月 5 日採録)



田上 敦士 (正会員)

平成 9 年九州大学大学院システム情報科学研究科知能システム学専攻修士課程修了。同年 KDDI (株) 入社。以来, 研究所にて, 高速通信プロトコル, オーバーレイネットワークに関する研究に従事。現在, (株) KDDI 研究所 IP 品質制御システムグループ主任研究員。博士 (工学)。平成 22 年度電子情報処理学会通信ソサイエティ優秀論文賞。



阿野 茂浩 (正会員)

平成元年早稲田大学大学院修士課程修了。同年 KDDI (株) 入社。以来, 研究所にて, ATM 交換方式, IP ネットワーク管理・制御, 次世代インターネットの研究に従事。現在, (株) KDDI 研究所 IP 品質制御システムグループリーダー。平成 22 年度電子情報処理学会通信ソサイエティ優秀論文賞。



富浦 洋一 (正会員)

昭和 59 年九州大学工学部電子工学科卒業, 平成元年同大学院工学研究科電子工学専攻博士課程単位取得退学。同年九州大学工学部助手, 平成 7 年同助教授, 現在, 九州大学大学院システム情報科学研究院准教授。博士 (工学)。統計的自然言語処理, 計算言語学に関する研究に従事。平成 2 年度情報処理学会研究賞。Pacling2005 Best Paper Award, Pacling2009 Best Paper Award, FIT2006 論文賞受賞。平成 22 年度電子情報処理学会通信ソサイエティ優秀論文賞。