

## 推薦論文

マルチオーバーレイと分散エージェントの機構を  
統合した P2P プラットフォーム PIAX吉田 幹<sup>†1</sup> 奥田 剛<sup>†2</sup> 寺西 裕一<sup>†3</sup>  
春本 要<sup>†4</sup> 下條 真司<sup>†5</sup>

ユビキタス環境におけるアプリケーションでは、ユーザの位置を同定したうえで、物理的、意味的に近傍に位置するオブジェクトを探索し、発見された情報やサービスを相互に連携させて高度なサービスを実現する枠組みが必要となる。本論文では、分散環境に散在する情報やサービスを連携させるプラットフォームシステムの 1 つの実現形態として、P2P エージェントをモデルとした PIAX を提案する。PIAX の特徴は、能動的に動作するエージェントに、オーバーレイネットワークの持つ強力な情報探索機能を融合させることで、ユーザの地理的位置や情報の特性に基づくサービスの発見と連携をスケラブルに実現するところにある。オーバーレイネットワークについては、新しい機構を組み込むことができ、情報探索のニーズに応じて複数のオーバーレイネットワークを切り替える機能を持つ。アプリケーション構築に関しては、エージェント呼び出し機構とエージェントどうしが相互に発見・連携するための簡便な API を提供することで、高度な分散エージェントシステムを高い開発効率で構築することができる。本論文では、PIAX のベースとなった概念と現状の設計、マルチオーバーレイ、発見型メッセージング (discovery messaging) の機構、ならびに今後の課題について述べる。

PIAX: A P2P Platform for Integration of  
Multi-overlay and Distributed Agent MechanismsMIKIO YOSHIDA,<sup>†1</sup> TAKESHI OKUDA,<sup>†2</sup> YUICHI TERANISHI,<sup>†3</sup>  
KANAME HARUMOTO<sup>†4</sup> and SHINJI SHIMOJO<sup>†5</sup>

In the ubiquitous environment, applications must identify the user's current geographical location, discover objects which are located near the users both physically and semantically, and combine the discovered objects to realize highly intelligent services. In this study, we propose a new P2P-based agent platform called 'PIAX', to realize such services. PIAX achieves scalable discovery and automatic cooperation of distributed services by the combination of active agents and resource discovery function of the overlay network. Especially about overlay networks, PIAX can plug in a new overlay network mechanism and has a functionality which changes multiple overlay networks according to the need of applications. Moreover, PIAX provides simple and strong discovery-messaging API for efficient development of applications. In this paper, the basic design and architecture of PIAX, the multi-overlay and the discovery-messaging mechanisms, the current status and future tasks are described.

<sup>†1</sup> 株式会社 BBR  
BBR Inc.

<sup>†2</sup> 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科  
Nara Institute of Science and Technology Graduate  
School of Information Science

<sup>†3</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technol-  
ogy, Osaka University

<sup>†4</sup> 大阪大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Osaka University

<sup>†5</sup> 大阪大学サイバーメディアセンター  
Cyber Media Center, Osaka University

## 1. はじめに

ユビキタスネットワークは、携帯端末やウェアラブルコンピュータなどの小型のアプライアンス、センサや CCD のように環境中に埋め込まれた小型デバイス、家電機器や自動車といった生活に密着した装置など、多種多様なデバイスを結合することにより、大規

本論文の内容は 2006 年 9 月のマルチメディア通信と分散処理研究会にて報告され、同研究会主査により情報処理学会論文誌への掲載が推薦された論文である。

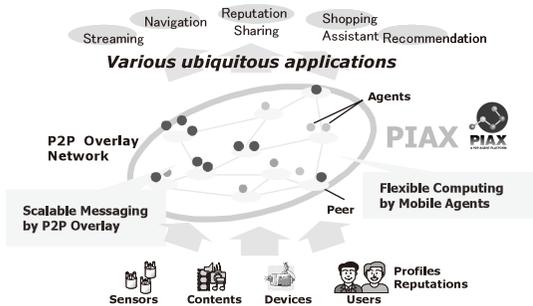


図 1 ユビキタスアプリケーションにおける共通プラットフォームの機能

Fig. 1 Function of the common platform of ubiquitous applications.

模な分散システムへと発展していく過程にあるといえる。その一方で、アプリケーションは、大規模なネットワーク上に無数に存在するデータやサービスの中から適切なものを選び出すと同時に、ユーザの置かれた状況にマッチする親和性の高いサービスをユーザに提供する必要がある。このように、3C (Computing, Contents, Connectivity) everywhere<sup>1)</sup> の面でネットワークが進化すればするほど、ユビキタス環境における、プロセッサ、コンテンツなどのオブジェクトの密度と多様性が高まり、アプリケーションに求められる要求はさらに高度化していくと考えられる。

このような高度化の中で、多様なオブジェクトを统一的に操作する手段と、広域に分散する大量のオブジェクトの中から瞬時に必要なものを探索し<sup>\*1</sup>、サービスとして活用する技術、の 2 つが早期に確立されることが求められている。

本論文では、上記要求を満たすシステムの 1 つの実現形態として、エージェントベースの P2P プラットフォーム PIAX (P2P Interactive Agent eXtensions) を提案する。PIAX は、P2P オーバーレイネットワーク (以降、オーバーレイと表現する) と分散エージェント機構を統合したプラットフォームであり、ネットワーク上に散在する複数のアプリケーションに対して、统一的なオブジェクト操作とスケーラブルなオブジェクト探索機能を提供する。さらに、PIAX は、エージェントに強力な情報探索機能を融合させることで、ユビキタスネットワークをエージェントにより統合化された大規模分散システムとして機能させることができる。

図 1 は PIAX がユビキタスアプリケーションの共通プラットフォームとして機能するイメージを示して

いる。図に示すとおり、PIAX は、ユビキタス環境に分散して存在する多様なコンテンツを、様々なアプリケーションから効率的に利用可能とする共通機能の提供を目指している。

以降、2 章でユビキタス環境における P2P サービスの要件、3 章で P2P エージェントと発見型メッセージングのコンセプト、4 章で PIAX の設計と特徴的な機構であるマルチオーバーレイと P2P エージェントの実現について説明する。5 章で関連研究、6 章でアプリケーションを使った実証、7 章で今後の課題について述べ、本論文をまとめる。

## 2. ユビキタス環境における P2P サービス

### 2.1 近傍性、近接性と相互作用

ユビキタスサービスでは、人々の挙動パターンを状況 (コンテキスト) にあわせて学習し、その結果を利用してサポートを行うことが要求される。このようなサービスを実現する場合、人やモノの位置を知ることが不可欠である。

位置情報には、地理的な扱いと記号的な扱いの 2 つがある<sup>2)</sup>。

ユビキタスサービスの典型的な手続きは、サービス対象となるユーザの位置を同定したうえで、近傍に位置するオブジェクトと、仮想空間上に蓄積された関連性のあるオブジェクトの両者を探索するところから始まる。探索するオブジェクトについて、前者においては物理空間における近傍性 (neighborhood)、後者においては意味空間における近接性 (proximity) が存在する。前者において、地理的な位置情報の扱いが重要となり、後者において、記号的な位置情報の扱いが重要となる。

近傍性と近接性を持つオブジェクトを探索した後の次の手続きは、これらのオブジェクトを使って、ユーザに適切なサービスを提供することにある。ここで注意すべきことは、探索したオブジェクトが必ずしも受動的な情報に限らない点である。例として、センサのように能動的に振る舞うオブジェクトや、サービスを提供するオブジェクトがある。サービスの実現において、単一のサービス主体が探索した情報を処理するだけでは弱く、複数のサービス主体と能動的オブジェクトが相互に連携しあうことでサービスを実現する枠組みが必要となる。

以上を定性的にまとめると、「ユビキタスサービスは、ユーザ (群) とその近傍、近接にあるオブジェクト間における相互作用により実現される」ととらえることができる。

\*1 本論文では、情報の検索と探索について「探索」の表現に統一し、「発見」は探索とその結果までを表す概念として記述した。

## 2.2 コビキタス P2P サービス

コビキタスサービスの実現において、センサや知識、サービスなどのオブジェクトの表現、オブジェクトの発見、発見した知識やサービスを合成するための競合・制約などの解消やプランニングなどの機構、さらには、センサやネットワークの自動組織化など、幅広い AI 関連の技術が必要となる。

セマンティック Web<sup>3)</sup> は、センサや知識、サービスなどのオブジェクトを統一的に表現する手段と、広域に分散する意味情報を統合的に扱うためのフレームワークを提供している。コビキタスサービスを現実のものとするためには、共通のフレームワークを設定することが必要であるが、セマンティック Web はコビキタスコンピューティングの共通フレームワークとして中心的な役割を果たすものと考えられる<sup>\*1</sup>。

コビキタスサービスのための共通基盤（プラットフォーム）を実現するうえで、P2P ネットワークは重要な技術として位置づけられる。セマンティック Web に着目すると、Web サービスの利点を取り入れ、セマンティック Web サービスへと進化してきている。他方、P2P システムは、DHT (Distributed Hash Table) 技術により構造化 (structured) オーバレイ (第 3 世代<sup>\*2</sup>) へと進化した後、P2PKM (Peer-to-Peer Knowledge Management) と呼ばれる技術分野に象徴される、セマンティックスを指向した方向性が現れてきている<sup>\*3</sup>。

一方、コビキタス環境に目を移すと、口コミ情報のようにユーザにより自由に作成される情報や、センサにより自動生成された情報など、様々な形式のコンテンツが存在する。コンテキストウェアな推薦サービスのように、広域に分散する多様な情報から適切な情報を探し出し、状況にマッチする形でユーザに提供するためには、P2P システムの持つ強力な探索機能と、コンテンツやユーザおよび環境が保持するコンテキストを意味も含めて統一的に扱えるセマンティック Web の技術が必要となる。

上記の考察から、図 2 に示す、セマンティック Web

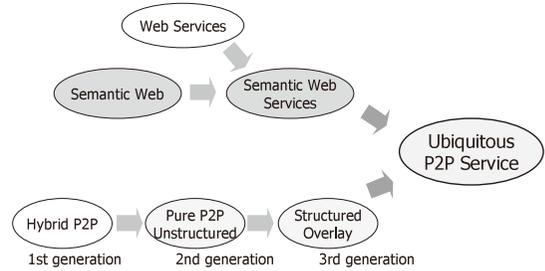


図 2 コビキタス P2P サービスの位置づけ  
Fig. 2 Positioning of ubiquitous P2P service.

と P2P システムの 2 つの技術の進化融合形が見えてくる。本論文ではこのコビキタスサービスに最適と考えられるシステム形態をコビキタス P2P サービスと表現する。

### 2.3 コビキタス P2P サービスのシステム要件

コンテキストウェアな推薦サービスに代表されるコビキタスサービスを構築するためには、次のような課題を克服する必要がある。

#### (a) 多様なオブジェクトに対する統一的操作

センサや口コミ情報のように、動的に生成され、頻繁に移動もしくは変化するオブジェクトに対し、統一的に操作する手段をどのように提供するか。場合によっては、不定形オブジェクトを想定する必要がある。

#### (b) 広域に分散するオブジェクトの探索

広域に分散する膨大な数のオブジェクトから瞬時に必要なものを探索する機能をどのように提供するか。

#### (c) 意味空間における近接処理

意味空間における近接性など、状況によって適用先が異なる意味的な処理をどのように組み込むか。

既存システムでは、Web サイトに情報を集約し、Web サービスを使ってサイトどうしを連携させる形でユーザに必要なサービスを提供するといった手法が一般的である。しかしながら、コビキタスサービスの場合、口コミ情報や自家用車に搭載された車載センサのようにプライバシー上、外部機関を無制限に信頼し、情報の集約を許可することが好ましくない場合がある。また、(a) やスキーマが定まらない情報が存在するケースを想定すると、サイトへの登録に特定の条件と時間を要する現状の方法はコストとリアルタイム性の両面から見て現実的ではない。

情報を特定の箇所に集約しないことを仮定すると、システムは必然的に P2P の形態になる。この場合、(b) の課題に応えるために十分な探索能力を備える必要があるが、既存の P2P システムは単一の探索要求にのみ応えるケースが大半で、そうでない場合でも、新

\*1 セマンティック Web の体系をコビキタスコンピューティングに活用したエージェントシステムの例として、CONSORTS<sup>4)</sup> などがある。

\*2 P2P システムの世代認識には構造化オーバレイを第 2 世代とするものと第 3 世代とするものがある。本論文では非構造化 (unstructured) オーバレイをビュア P2P を生み出した重要な世代と考え、構造化オーバレイを第 3 世代ととらえる。

\*3 2004 年よりこの技術分野を対象とした国際会議<sup>5)</sup> が開かれている。セマンティック Web サービスを P2P 形態に進化させる研究事例として文献 6) がある。

たに発生した要望への対処は困難である。また、(c)の意味処理の適用に際しても、考えられる意味処理をあらかじめ持たせる必要があり、硬直的で変更が難しいシステムとなる恐れがある。

上記の課題に応えるためには、P2P のシステム形態を前提とし、近傍・近接処理を加味したうえで、ユビキタス P2P サービスに求められる以下のシステム要件を満たす必要がある。

#### 資源分散と負荷分散

小型のアプライアンス、センサなどの多種多様なアプライアンスが接続される大規模なネットワークを想定し、探索対象となる情報（資源）と探索に要する負荷の両面について、ネットワーク上に集中点が生じないように分散化を図る必要がある。

#### 柔軟な探索機能

(b)に対処するため、広域に分散する様々な情報に対して、アプリケーションの要求する条件に従い、柔軟な探索が行える必要がある。また、探索アルゴリズムにはスケーラビリティが要求される。

#### 近傍・近接処理機能

地理的近傍にある情報（資源）を探索する機能を持つ必要がある。また、(c)に求められるよう、複数の情報（資源）間に存在するセマンティックを適切に処理する機能が必要となる。具体的には統計処理機能、演繹処理機能とそれらが密に連携するための機構が必要となる。このとき、近接・隣接したオブジェクト間での相互連携・相互作用をアプリケーションとして容易に記述・実行できる必要がある。

また、P2P システムにおいて、システムに接続するピアに対して、均一な動作条件を要求することはできない。ソフトウェアモジュール（クラス）の具備状況、ハードウェアの構成や性能など、多様なシステム形態に対応できる必要がある。これにともない、システム形態の変化により処理が中断しないためのサービスの持続性と、ネットワークの構成変化に対する耐性も必要となる。

### 3. P2P エージェントプラットフォーム PIAX

#### 3.1 P2P エージェント

2.3 節の要件から、オブジェクトにおける相互連携性と自律性、そして、オブジェクトを含めた資源に対する効率的な探索機能の 2 つは重要なシステム機能であるといえる。このことより、相互連携性と自律性の実現手段としてモバイルエージェント、探索機能の実現手段として、P2P ネットワーク構成技術であるオーバーレイを使うことが有効であると考えられる。本論文

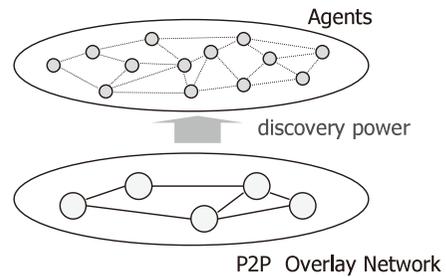


図 3 P2P エージェントの概念  
Fig.3 Intention of P2P agents.

では、このようにオーバーレイの探索機能により強化されたエージェントを P2P エージェントと呼ぶ。

図 3 に P2P エージェントの概念を示す。P2P エージェントは、オーバーレイの持つ強力な情報探索機能を利用することで、ユビキタスネットワークに求められる“what to find”<sup>\*1</sup>をスケーラブルに実現することができる。

P2P エージェントにより、サービス主体と能動的オブジェクトを含めたオブジェクトを表現することができる。P2P エージェント間の相互連携により、2.1 節で述べたオブジェクト間の相互作用が実現される。このことより、P2P エージェントは、近傍性、近接性を扱う 1 つのシステムモデルと考えられる。

#### 3.2 P2P エージェントのモビリティ

資源分散と負荷分散の観点より、P2P エージェントにおいて、モビリティは重要な特性と考えられる。以下に、モビリティにより得られる優位性について記す。なお、(1)、(2) は既存のエージェントシステムにも共通する優位性、(3)、(4) は P2P エージェント特有の優位性である。

##### (1) 帯域の効率的利用

通信頻度の高い相手の近傍にエージェントを移動させることで、ネットワーク全体の帯域消費を抑えることができる。

##### (2) 負荷の平準化

負荷の高いエージェントを複製し、リクエスト元のピアの近傍に移動させることで負荷の平準化が図れる。

##### (3) サービスの持続性

ネットワークから離脱するピアのエージェントを安定したピアへ退避させることや、エージェントの複

\*1 文献 1) で提示されている位置非依存ネーミングの概念。本論文では、特に名前表の存在を前提とせず、アドレスを指定しないで、属性を指定することで必要なオブジェクトを見つけ出す概念として使用している。

製を他のピアに持たせることにより、ユーザが利用  
するアクセスピアが変化することに対して、サービ  
スをそれに追従させることができる。

(4) アプリケーションの耐性向上

頻繁なピアの参加、離脱、停止といったネットワー  
クの急激な構成変化によって引き起こされる分散ア  
プリケーションに対するダメージを、エージェント  
の複製と移動により抑えることができる。

3.3 発見型メッセージング

オーバーレイによって強化された P2P エージェン  
トのメッセージング機構を発見型メッセージング  
(discovery messaging) と呼ぶ。

モバイルエージェントを含め、これまでの分散シス  
テムでは、メッセージングを行う前提として、送信相  
手のアドレスを知っている必要があった\*1。P2P エ  
ージェントでは、送信相手を探索条件によって指定す  
ることができる。以下に、擬似言語によるメッセージ  
ングの記述例を示す。(a) がアドレスを指定するメッセ  
ージングで、(b) が探索条件を指定するメッセージング  
である。

(a) send(destinationAddress, message);

(b) send(queryCondition, message);

(a) が従来のメッセージングで、(b) が発見型メッ  
セージングに相当する。発見型メッセージングにより、  
近傍性、近接性を持った P2P エージェントへのメッ  
セージングが容易に記述、実行可能となる。

PIAX は以上の特徴を持つ P2P エージェントを稼働  
されるためのプラットフォームである。我々は、PIAX  
が前章で示したユビキタス P2P サービスの 1 つの実現  
形となることを目的に、エージェントベースの P2P プ  
ラットフォーム PIAX の研究開発を進めている。PIAX  
の特徴は、オーバーレイ層の上に P2P エージェント  
層を置き、アプリケーション開発を P2P エージェン  
トの枠組みで行えるよう API を提供している点にあ  
る。このための設計上の特徴として、次の 4 つがある。

- 階層的アーキテクチャ
- マルチオーバーレイ
- エージェントの多様性と弱モビリティ
- 発見型メソッド呼び出し

以降、上記の特徴を中心に、PIAX の設計と実装に  
ついて説明する。

4. PIAX の設計と実装

4.1 PIAX のアーキテクチャ

PIAX は図 4 に示すよう階層的なアーキテクチャを  
持つ。下位のレイヤは上位のレイヤから機能的に独立  
していることと、レイヤ間の API が決まっているこ  
とにより、高いモジュール性と拡張性を実現できる。  
各レイヤにおいて実現される機能を下位のレイヤか  
ら順に記す。

(1) Physical Network

物理ネットワークの通信機能を socket を使って実  
現する。

(2) Overlay Transport, RPC

上位のレイヤに対し物理的な通信インタフェースを  
隠蔽し、ピア ID を指定するだけで相手ピアと接続  
できる ID 透過な通信機能と RPC 機能を提供する。

(3) Multi-Overlay

4.2 節で述べるマルチオーバーレイを実現する。プラ  
グインの機構により、複数のオーバーレイを管理する。  
上位レイヤに対しては、用途に応じてオーバーレイを  
切り替えることで必要な機能を提供できるようにな  
っている。現在、LL-Net (Location-based Logi-  
cal P2P Network)<sup>7)</sup>、DHT、ALM (Application  
Layer Multicast)、ソーシャルネットの 4 種類のオー  
バーレイが実現されている。

(4) Discovery Messaging

Multi-Overlay のレイヤと連携し、発見型メッセ  
ージングを実現する。上位レイヤに対しては、オーバ  
レイの実装を隠蔽する働きを持つ。

(5) P2P Agents

P2P エージェントを稼働させるための機能を持つ。  
共通に使用される P2P エージェントをライブラリ  
として揃えることで機能拡充ができる。現在、2.3 節

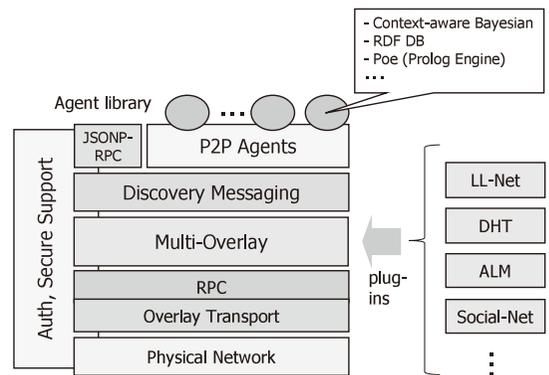


図 4 PIAX 階層構成  
Fig. 4 Layered architecture of PIAX.

\*1 相手先の論理名を物理アドレスに変換するネームサーバを用い  
る場合もこれに含めている。

の要件にある近接性処理に関し、統計ベースと演繹ベースの2つのアプローチにより機能拡充を進めている。状況適合型のページアンフィクタ、RDF リポジトリ、演繹エンジンなどの機能を持つエージェントがこれに相当する。

#### (6) JSONP-RPC

外部システムに対して、ピアおよび P2P エージェントの機能を提供するインタフェースとして、JSON ベースの RPC、JSONP-RPC を用意している。JSONP-RPC は、JSONP (JSON with Padding<sup>8)</sup>) を使用するクライアントのために JSON-RPC<sup>9)</sup> を拡張した RPC 用プロトコルである。データのシリアライズのために XML を使った SOAP または XML-RPC と比べ軽量である。また、JavaScript のようなスクリプト言語との親和性が高く、クロスドメイン通信を使用することができるなど、Web システムからみた P2P システムの可用性を高める効果がある。

#### (7) Auth, Secure Support

ピアおよび P2P エージェントの認証とセキュアなエージェントの移動とメソッド呼び出しのための機能を提供する。

#### 4.2 マルチオーバーレイ

PIAX は、P2P システムにおいて複数のオーバーレイをサポートする機構、マルチオーバーレイを持つ。

PIAX は、ユビキタスサービスのための共通的なプラットフォームとして機能する必要があるが、単一のオーバーレイをサポートするだけでは、多様なアプリケーションからの探索要求に応えることができない。このため、想定されるクエリパターンの数だけオーバーレイを用意し、適切にオーバーレイを切り替えることによって、アプリケーションからの探索要求に応えることが必要となる。

##### 4.2.1 クエリパターン

オーバーレイに求められる情報探索のクエリパターンとして、以下が想定される。

##### 完全一致探索

指定されたキーワードに完全に一致する属性を持つ情報を探索する。

##### 部分一致探索

指定されたキーワードに部分的に一致する属性を持つ情報を探索する。

##### 範囲探索 (1 次元または $N$ 次元)

指定された範囲に含まれる属性を持つ情報を探索する。地理的領域指定の探索はこれに相当する。

##### 連想探索

リンクをたどって得られる情報を対象に含めて、完全 (または部分) 一致探索または範囲探索を行う。SNS、口コミ情報を対象とした探索はこれに相当する。

##### 意味探索

指定された表現と同じ意味表現を持つ情報を探索する。RDF などのメタデータの探索はこれに相当する。

連想探索を除き、以上で述べたクエリパターンは、構造化オーバーレイを使って処理できる。構造化オーバーレイには、DHT ベースのものとはそれ以外がある。それ以外に分類されるオーバーレイに LL-Net と Skip Graph<sup>10)</sup> がある。LL-Net は地理的情報探索、Skip Graph は完全一致探索と範囲探索に向く。

部分一致探索と意味探索については、オーバーレイの持つ基本機能だけでは実現できないため、専用の機構を付与する必要がある。文献 11)、pSearch<sup>12)</sup> は DHT をベースにしたそれぞれの代表的な実現例である。

連想探索については、ピアどうしのリンク関係をもとに形成されるオーバーレイを用いる。口コミ情報を用いる場合は、人の関係に基づくネットワーク (PIAX の実装ではソーシャルネットと呼ぶ) を使う。

ここでは、単一のクエリパターンについて述べたが、一般的には複数のクエリパターンを組み合わせた複合的なクエリをサポートする必要がある。このためには、該当するオーバーレイの探索を効果的にインタリーブさせる仕組みが必要となる。

##### 4.2.2 マルチオーバーレイの機構

PIAX は、個々のオーバーレイをプラグイン可能なオブジェクトとして扱うことで、新たなニーズが発生した際に新しくオーバーレイを追加拡張できる。また、アプリケーションが組み込まれたオーバーレイを使う際には、オーバーレイを指定させるのではなく、与えられた検索条件により自動的に最適なオーバーレイを選び出すといった機能も持つ。

図 5 に複数のオーバーレイを扱う機構 (Multi-Overlay Handling と呼ぶ) について示す。Multi-Overlay Handling において、クエリ条件とそれを解決するオーバーレイの対応表を管理している。Discovery Messaging レイヤからクエリ条件をともらったリクエストが来ると、対応表より適切なオーバーレイを選択し、クエリを処理させる。新しくオーバーレイを追加する場合は、この対応表にオーバーレイを登録する。オーバーレイのローディングについては、実行時に追加できるよう、動的ローディングをサポートしている。

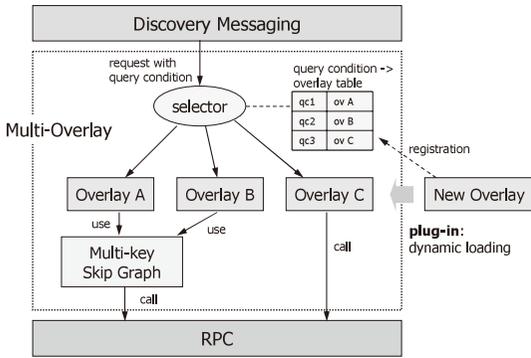


図 5 マルチオーバーレイの機構

Fig. 5 Overlay handling in the Multi-Overlay layer.

また、PIAX では核となるオーバレイとして、1つのピアで複数のキーを扱うことができる Multi-key Skip Graph<sup>13)</sup> を用意している。Multi-key Skip Graph は異なる種類のキーに対して範囲探索ができるため、LL-Net といった目的別のオーバレイを実装できる。たとえば、図5の Overlay A と Overlay B は Multi-key Skip Graph を使っていることを示している。

### 4.2.3 代表的なオーバレイ

現在、PIAX でサポートされている代表的なオーバレイについて記す。

#### (1) LL-Net

指定された地理的領域に含まれる情報をスケラブルに探索する機能を持つ。ピアには経度、緯度の位置座標を設定する必要がある。2.3 節の要件で述べた近傍オブジェクトの探索に使用する。

#### (2) DHT

(キー、値)のペアをキーのハッシュ値をもとに P2P ネットワーク上に分散配置することで、特定のキーを持つ情報をスケラブルに探索することができるオーバレイを指す。PIAX では、この DHT の機能を Multi-key Skip Graph を用いて実装している。

#### (3) ALM

アプリケーションレイヤにおけるエニーキャストおよびマルチキャストを実現するオーバレイを指す。PIAX では、ALM の機能を Multi-key Skip Graph の持つ範囲探索の機能を用いて実装している。

#### (4) ソーシャルネット

人の関係を単方向グラフで表現したリンク構造をもとに形成されるオーバレイで、SNS のバックボーンとなる。リンクには、複数の属性とそれに対する重み(信頼度)を持たせる。最大返答数、最大ホップ数、属性、信頼度の範囲を指定したクエリが使用でき、ユビキタスサービスでは、口コミ情報収集に活用される。

## 4.3 P2P エージェントの実現

### 4.3.1 記述言語とローディング環境

自己拡張する P2P ネットワーク環境において、稼働する P2P エージェントがつねに同一の言語、および、単一のクラス・モジュール集合からロードされることを想定することはできない。PIAX において、P2P エージェントの実装言語と P2P エージェントのローディング環境<sup>\*1</sup>については、次のように前提をおいている。

#### (1) 複数言語サポート

Java のような強い型付け (strong typing) のオブジェクト指向言語だけでなく、動的に型付けを行うスクリプト言語も対象とする。

#### (2) 多様なローディング環境

個々の P2P エージェントが異なるクラス・モジュール集合からロードされる実行環境を想定する。この想定において、たとえば、クラス名が同一で実装の異なる P2P エージェントが同一のピア上で稼働することが許容される。

(2) の実現のため、P2P エージェント専用のクラスローダを用意した。(1) について、PIAX の実装言語は Java であるが、P2P エージェントを実装する言語については Java 以外の言語を選択することが可能である<sup>\*2</sup>。

### 4.3.2 弱モビリティ

PIAX では P2P エージェントを弱モビリティ<sup>13)</sup> を持ったモバイルエージェントとして実装している。弱モビリティの場合、移動させる情報がプログラムコードとオブジェクトで済むのに対し、強モビリティの場合は、さらにスタックフレームを含めたスレッドコンテキストを移動させる必要がある。強モビリティは対応可能なプラットフォームが制限されるだけでなく、安全に強モビリティを実行するためには、移動元と移動先に同一のエージェント実行環境を想定する必要がある。P2P システムのようなピアの能力が多様な環境で効果的にモビリティを実現するためには弱モビリ

\*1 実行コードのローディングに使用されるクラス・モジュール集合を規定した実行環境を意味する。Java 言語では、CLASSPATH を切り替えることにより、実行時にロードするクラスの実行コードを切り替えることができる。このため、P2P エージェントの機能を規定するためにはクラス名だけでは不十分で、ロードされるクラス集合が情報として必要である。この特性は Java に限らずリンクパスを動的に設定できる言語においてもあてはまる。

\*2 Java 6 のリリースにより、PHP、Python、Ruby、JavaScript といったスクリプト言語が JVM 上でサポートされるようになった。また、JRuby<sup>17)</sup> のようにインタプリタを Java を使って実装することで、Java との連携が容易になる例もある。実際に、PIAX では現在、JavaScript と Lisp を記述言語とする P2P エージェントを開発中であり、一部動作を確認している。

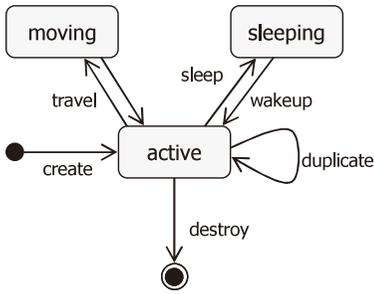


図 6 P2P エージェントの状態遷移  
Fig. 6 State transition of P2P agents.

ティが必要条件となる。

P2P エージェントのモビリティの実現に際しては、簡潔なモビリティ方式を持つ Aglets<sup>15)</sup>, AgentSpace<sup>16)</sup>を参考にした。

### 4.3.3 P2P エージェントの API

P2P エージェント実装のために用意されている代表的なメソッドについて記す。

#### (1) P2P エージェントの状態遷移

PIAX では一般的なモバイルエージェントシステムと同様、P2P エージェントの生成 (create)、消滅 (destroy)、複製 (duplicate)、永続化 (sleep)、永続状態からの復帰 (wakeup)、他のピアへの移動 (travel) などのメソッドをサポートしている。図 6 にその P2P エージェントの状態遷移を示す。

他のモバイルエージェントシステムと異なる特徴として、エージェント移動の際の移動先指定がある。ピアのモビリティや IP アドレスが変化する環境を想定し、PIAX では、ピア ID を指定する。これによって、開発者はピアの物理的なアドレスを意識することなく、エージェント移動を実装することができる。

#### (2) 非同期型、1 方向型、同報型メソッド呼び出し

PIAX では、エージェント間の通信方式として、メッセージを交換する形態ではなく、RPC を採用した。これは、ローカルに存在するエージェントに対する操作がメソッド呼び出しになることから、リモートのピアに存在するエージェントを通常のメソッド呼び出しと同じ形式にすることを意図している。しかしながら、RPC では、メッセージを交換する形態に比べ、1 方向にメッセージを伝達したり、複数の相手先に同報的にメッセージを伝達したりするといった面で制約が生じる。これに対処するため、PIAX では、通常の同期型に加え、非同期型、1 方向型、同報型のメソッド呼び出しを用意した。

図 7 に、リモートメソッド呼び出しにおける、それぞれの呼び出し形態をサポートする代表的なメソッド

```

1. Object remoteCall(PeerId peerId,
   AgentId agentId, String method,
   Object... args)
2. FutureReturn<Object>
   remoteCallAsync(PeerId peerId,
   AgentId agentId, String method,
   Object... args)
3. void remoteCallOneway(PeerId peerId,
   AgentId agentId, String method,
   Object... args)
4. ReturnSet<Object> remoteCallMulti(
   PeerId peerId, FilterCondition cCond,
   String method, Object... args)
    
```

図 7 リモートメソッド呼び出しの定義例  
Fig. 7 Sample signatures of remote method calls.

```

ReturnSet<Object>
discoveryCall(QueryCondition qCond,
String method, Object... args)
    
```

図 8 発見型メソッド呼び出しの定義例  
Fig. 8 A sample signature of discovery method call.

定義例 (Java による定義) を示す。1 から順に、同期型、非同期型、1 方向型、同報型メソッド呼び出しとなっている。同期型メソッド呼び出しは呼び出し先の処理が終了するまで、呼び出し元がブロックするのに対し、非同期型メソッド呼び出しはブロックしない。このため、戻り値を非同期的に取り出すためのクラスとして、FutureReturn クラスを用意した。1 方向型メソッド呼び出しは戻り値および呼び先での例外をとらないため、通知メッセージを送るような用途に合う。同報型メソッド呼び出しでは、P2P エージェントを絞り込むため FilterCondition という条件を指定する。同報の結果として返される複数の戻り値を非同期的に取り出すためのクラスとして、ReturnSet クラスを用意した。

なお、図 7 にはあげていないが、操作の統一性を出すため、ローカルメソッド呼び出しについても、同様の呼び出し形態をサポートした。

#### (3) 発見型メソッド呼び出し

同報型と同じ仕組みを持つメソッド呼び出しに発見型メソッド呼び出しがある。これは、発見型メッセージングを実現する特別なメソッド呼び出しの形態である。図 8 に、発見型メソッド呼び出しの定義例を示す。

クエリ条件は、QueryCondition インタフェースを使って指定する。指定されたクエリ条件は 4.2.2 項で述べたマルチオーバレイの機構に渡され、その後、必要なオーバレイが選択された後、そのオーバレイへクエリが渡される。たとえば、次の例のように、条件

部分に地理的領域を与えることで、オーバーレイとして LL-Net が選択され、その領域に属するピアを対象に同報的にメソッド呼び出しを行うことができる。

```
ReturnSet rset = home.discoveryCall(
    new Rectangle(135.0, 35.0, 1.0, 1.0),
    "getScore", myProfile);
```

発見型メソッド呼び出しにより、P2P エージェントは、広域ネットワークの中から条件に合致する P2P エージェントを探し出すと同時にメソッド呼び出しをかけることができる。発見型メソッド呼び出しを活用することにより、近接・隣接したオブジェクト間での相互連携・相互作用をアプリケーションとして容易に記述・実行可能となる。

## 5. 関連研究

P2P ネットワークと分散エージェントを統合することによって新たなシステム価値を生み出すことを狙った研究は様々な方面で行われている。

文献 18) は、パーベイシブネットワーク上の Web サービス連携を、モバイルエージェントを使って行うシステム事例で、不安定な通信環境におけるモバイルエージェントの活用例を示している。文献 19) は、P2P ネットワークとエージェントシステムを融合するフレームワークについての研究で、P2P ネットワークとエージェントがそれぞれ分散処理とコミュニケーションの機能を分担するシステム形態を提案している。しかし、いずれもエージェントが P2P ネットワークの探索機能を活用する形態ではなかった。

BestPeer<sup>20)</sup> は、モバイルエージェントに Aglets を使ったシステムである。P2P ネットワーク上に配置された分散データベースを使って、高い記述性を持ったクエリを効率的に処理できる。ABLA<sup>21)</sup> は分散型のインターネット観測システムで、ユーザの要求に応じて、モバイルエージェントが P2P ネットワーク上の観測点を移動し、観測情報を収集するといった特徴を持つ。BestPeer, ABLA はいずれも均一な実行環境を想定しており、多様なシステム形態に対応することができない。

また、上記のいずれにおいても、P2P ネットワークとエージェントの機能は分離されており、近傍性、近接性のための機構も持たない。PIAX が有する、マルチオーバーレイや、発見型メッセージングといったユビキタス環境における共通プラットフォームとしての機能を実現するものはない。

## 6. 実証アプリケーション

PIAX の特徴は、発見型メッセージングにより機能強化された P2P エージェントを使って、ユビキタスサービスを高い開発効率で構築できるところにある。2.3 節で述べたユビキタスサービスを構築する際の課題については、次のように対応している。

### (a) 多様なオブジェクトに対する統一的操作

モビリティを持った P2P エージェントにより対応した。動的に生成され、頻繁に移動もしくは変化するオブジェクトをエージェントとして扱うことにより<sup>\*1</sup>、オブジェクトに自律性をもたらし、発見型メッセージングにより、関連するサービス (P2P エージェント) と連携がとれるようにした。

### (b) 広域に分散するオブジェクトの探索

LL-Net, DHT などの高いスケーラビリティを持つ構造化オーバーレイにより対応した。クエリパターンによって探索に向くオーバーレイが異なる問題 (たとえば、地理的探索のような例だと、DHT は効力を発揮しない) については、マルチオーバーレイの機構により対応した。アプリケーションからの要求に従い、オーバーレイを選択できる機構を設けることで、スケーラビリティの適用範囲を広げることができた。

### (c) 意味空間における近接処理

意味処理を行う P2P エージェントをライブラリとして必要なピアに移動させることで対応した。特に意味空間における近接性処理に関しては、統計ベースと演繹ベースの 2 つのアプローチを持たせ、状況適合型のベイジアンフィルタ、RDF リポジトリ、演繹エンジンなどの機能を持つエージェントを用意した。

上記課題への対応に関し、PIAX の持つ有効性とフィジビリティを検証する目的で、アプリケーションの開発を行ってきた。以下はその代表的な実証アプリケーションである。

#### (1) 状況適合型コンテンツ推薦システム

PIAX の代表的なアプリケーションに状況適合型のコンテンツ推薦システムがある。2005 年末より、我々のグループが属する UAA プロジェクト<sup>22)</sup> で、ショッピングモールを対象としたコンテンツ推薦システムを開発し、2006 年 2 月 4 日～3 月 5 日の 1 カ月間にわたる実証実験をのべ 2,000 人のユーザを対象に実施した<sup>23)</sup>。

\*1 能動的に作用しないオブジェクトや粒度の小さいオブジェクトについては、それらを管理するエージェントを設け、操作の統一性を引き出した。

## (2) MapWiki の P2P 実装

2006年9月、我々のグループでは、PIAXの地理的領域に含まれる情報探索機能の活用例として、地図上の口コミ情報共有アプリケーション MapWiki<sup>24)</sup>を拡張し、P2Pに基づく実装を行った<sup>25)</sup>。

## (3) PIAX nano

同時期に、センサネットワークへの可用性を検証する目的で、PIAXを軽量のアプライアンスで動作させる PIAX nano<sup>26)</sup>と呼ぶプロジェクトをスタートさせた。この中で、携帯電話やPDAのCPUとして用いられる ARM9 上へ PIAX を移植し、先の MapWiki と連携させる形で、同年10月3日~7日に開催された CEATEC JAPAN 2006<sup>27)</sup>で動態展示を行った。

上記のアプリケーション事例、および、実験を通し、PIAXの持つ性能と可用性、安定性について次のように検証することができた。

(1)の実証実験を通し、P2P エージェントと発見型メッセージングを用いて、実用レベルのコンテキストウェアな推薦サービスを構築できることを確認した。19ピア、900エージェントが稼働する環境で、19日間無停止、1秒以内のレスポンス時間を達成した。これによりスケラブルな地理的検索サービスを簡便に実装できることが確認できた。実験の際、機構上の問題箇所が発見されたが、それについてはその後の改良へとつなげている。

(2)において、MapWikiの地図コンテンツ表示処理をPIAXに移植することを通し、負荷分散処理の効果を検証することができた。これまで、集中処理のため、クライアント数に比例して増大してしまっていた処理時間(4クライアント同時で約4秒)がクライアント数によらず約1秒程度で処理可能となった。

(3)の実験では、PIAXが軽量のアプライアンス上でも、PC上で動かす場合と比べて遜色なく機能することを確認した。さらに、この実験では温度センサをアプライアンスに着脱する実験を行ったが、P2Pエージェントの機構を用いることで、ネットワーク上に動的に出現・消滅する温度値をリアルタイムに認識できることを確認した。

## 7. おわりに

本論文では、ユビキタス環境におけるアプリケーションプラットフォームの要件、その要件に基づいたPIAXの設計とアーキテクチャ、および、実証アプリケーションについて述べた。

現在、PIAXの開発は基本機能のブラッシュアップ

を進めている段階にある。PIAXにおける今後の課題として次の事項があげられる。

### (1) P2P ネットワークとして耐性強化

PIAXの核は、構造化オーバーレイによるP2Pネットワークである。構造化オーバーレイは探索において、非構造化オーバーレイと比べて非常に高いスケラビリティと成功率を持つ反面、ルーティングテーブルの秩序性が損なわれると機能しないという弱点を持つ。2.3節であげたとおり、構造化オーバーレイの利点を様々なアプリケーションに提供するためには、ピアの突然の停止や、意図しないピアの暴走や外部からの攻撃に対し、高い耐性を備える必要がある。構造化オーバーレイにおける耐性の研究はスタートしたばかりである。今後の研究領域の成果を取り込むとともにフィールドでの検証を繰り返すことで耐性強化を図る必要がある。

### (2) 近接オブジェクト発見のための機能強化

4.1節(5)で近接性処理を行うエージェントについて述べたが、状況適合型ベイジアンフィルタと分散演繹<sup>28)</sup>については、P2Pネットワークの視点からも研究を継続する必要がある。実用性を備えた技術として確立するためには、フィールド評価を視野に含めた研究を進めていく必要がある。

### (3) P2P エージェントにおける移動透過性と複製透過性の実現

P2P エージェントの移動透過性と複製透過性とは、複製された一群のP2Pエージェントをその位置に関係なく論理的に単一のP2Pエージェントとして扱える性質である。この機構をPIAXに用意することにより、P2Pエージェントの持つ耐性が著しく向上するだけでなく、アプリケーション側がP2Pエージェントの存在位置や複製履歴を意識する必要がなくなるといった効果ももたらす。

### (4) セキュリティ、プライバシー保護の強化

PIAXの持つセキュリティ機能としては、ピアとP2Pエージェントに対するPKIベースの認証機能とセキュアなエージェント移動、メソッド呼び出しがある。ユビキタスアプリケーションには、「安心・安全」が求められる。より高い安全性を得るためには、セキュリティの研究知見をシステムに反映し、実証を通して検証していくことが重要であると考えている。

分散環境に散在する情報やサービスを連携させるプラットフォームシステムの1つの実現形態として、P2PエージェントをモデルとしたPIAXを提案し、実装した。P2Pエージェントと発見型メッセージングの

コンセプトを融合したモデルとすることで、オブジェクトに対する統一的な操作、オブジェクト探索、意味的な近接処理を実現し、アプリケーションをスケーラブルかつ柔軟に実現可能とした。また、実証アプリケーションをいくつか実装し、実証実験などを通じてその有効性を確認した。

PIAXは、JDK 5以上のJVM環境で動作するプログラムとして開発を進めている。2007年3月には共通プラットフォームとして広く使用されることを目的にオープンソースとして公開した<sup>29)</sup>。オープンソースとして広く利用されることで得られる知見をもとに、さらなる改良・高機能化を進めたい。

謝辞 本研究は、平成18年度総務省委託研究「ユビキタスネットワーク認証・エージェント技術の研究開発」の一環として実施したものである。研究開発にあたり、貴重な助言をいただいたUAAプロジェクトのメンバに深謝する。

### 参 考 文 献

- 1) 森川博之, 南 正輝, 青山友紀: ユビキタスネットワークへの道, 情報処理学会誌, Vol.43, No.6, pp.631-638 (2002).
- 2) Leonhardt, U.: Supporting Location-Awareness in Open Distributed Systems, Ph.D. thesis, Imperial College, University of London (1998).
- 3) W3C: Semantic Web (2001). <http://www.w3.org/2001/sw/>
- 4) 幸島昭男, 和泉憲明, 車谷浩一, 中島秀之: ユビキタス計算環境におけるコンテンツ流通のためのマルチエージェントアーキテクチャ: CONSORTS, 人工知能学会論文誌, Vol.19, No.4, pp.322-333 (2004).
- 5) ICST: International Workshop on Peer-to-Peer Knowledge Management (P2PKM). <http://www.p2pkm.org/>
- 6) Schlosser, M., Sintek, M., Decker, S. and Nejd, W.: A Scalable and Ontology-Based P2P Infrastructure for Semantic Web Services, *2nd International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P'02)*, pp.104-111 (2002).
- 7) 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, Vol.46, No.SIG18, pp.1-15 (2005).
- 8) ajaxian: JSONP: JSON With Padding (2005). <http://ajaxian.com/archives/jsonp-json-with-padding>
- 9) json-rpc.org: JSON-RPC (2004). <http://json-rpc.org/>
- 10) Aspnes, J. and Shah, G.: Skip Graphs, *Proc. 14th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA)*, pp.384-393 (2003).
- 11) Harren, M., Hellerstein, J.M., Huebsch, R., Loo, B.T., Shenker, S. and Stoica, I.: Complex Queries in DHT-based Peer-to-Peer Networks, *Proc. 1st International Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS'02)*, pp.242-259 (2002).
- 12) Tang, C., Xu, Z. and Mahalingam, M.: pSearch: Information Retrieval in Structured Overlays, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, pp.89-94 (2003).
- 13) 小西佑治, 吉田 幹, 寺西裕一, 春本 要, 下條真司: 単一ピアに複数キーを保持可能とする Skip Graph 拡張の提案, 情報処理学会, 第131回マルチメディア通信と分散処理研究会, pp.25-30 (June 2007).
- 14) Fuggetta, A., Picco, G.P. and Vigna, G.: Understanding Code Mobility, *IEEE Trans. Softw. Eng.*, Vol.24, No.5, pp.342-361 (1998).
- 15) IBM Research: Aglets Software Development Kit (2002). <http://www.trl.ibm.com/aglets/>
- 16) Satoh, I.: A Mobile Agent-Based Framework for Active Networks, *Proc. IEEE Systems, Man, and Cybernetics Conference (SMC'99)*, pp.71-76 (1999).
- 17) The Codehaus: JRuby — Java powered Ruby implementation (2006). <http://jruby.codehaus.org/>
- 18) 石川冬樹, 吉岡信和, 本位田真一: パーベイシブネットワークにおける Web サービス連携のためのモバイルエージェントシステム, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-D-I, No.7, pp.782-795 (2004).
- 19) Overeinder, B.J., Posthumus, E. and Brazier, F.M.T.: Integrating Peer-to-Peer Networking and Computing in the AgentScape Framework, *2nd International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P'02)*, pp.96-103 (2002).
- 20) Ng, W.S., Ooi, B.C. and Tan, K.L.: BestPeer: A Self-Configurable Peer-to-Peer System, *The 18th International Conference on Data Engineering 2002* (2002).
- 21) ABLA (2005). <http://abla.sourceforge.jp/>
- 22) ユビキタス認証エージェント技術委員会: UAA Project (2005). <http://www.uaa-project.org/>
- 23) 石 芳正, 新井イスマイル, 寺西裕一, 春本 要, 下條真司, 武本充治, 須永 宏, 田中絵里香, 西木健哉: ユビキタス環境における P2P エージェントプラットフォームを用いた情報推薦機構の提案と実装, 情報処理学会, 第127回マルチメディア通信と分散処理研究会, pp.69-74 (June 2006).
- 24) Teranishi, Y., Kamahara, J. and Shimojo, S.: MapWiki: A Map-based Content Sharing System for Distributed Location-dependent

Information, Academy Publisher, *JOURNAL OF COMPUTERS*, Vol.1, Issue 3, pp.13-19 (2006).

- 25) Teranishi, Y.: A P2P IMPLEMENTATION OF WEB-BASED LOCATION-DEPENDENT CONTENT SHARING SYSTEM, *Proc. APPLIED COMPUTING 2007*, pp.43-50 (2007).
- 26) PIAX nano (2006).  
<http://www.piax.org/?PiaxNano>
- 27) CEATEC JAPAN 2006.  
<http://www.ceatec.com/>
- 28) 大谷隆三, 竹内 亨, 吉田 幹, 寺西裕一, 春本要, 下條真司: 状況依存型サービスのための分散演繹機構の提案, 情報処理学会, 第 126 回マルチメディア通信と分散処理研究会, pp.305-310 (Mar. 2006).
- 29) PIAX (2006). <http://www.piax.org/>

(平成 19 年 3 月 15 日受付)

(平成 19 年 10 月 2 日採録)

## 推薦文

本論文は, 分散環境上に散在する情報やサービスを連携させるシステムの 1 つの実現形態として, P2P エージェントプラットフォームを提案するものである。本論文は, 能動的に動作するエージェントに, オーバーレイネットワークの持つ強力な資源探索機能を融合させることで, サービスの発見と連携をスケラブルに実現する手法を示している。本論文では, 提案手法を実用的なプラットフォームとして実現する手法を示している点で有用性が高く, 推薦論文として推薦する。(マルチメディア通信と分散処理研究会主査

櫻井 紀彦)



吉田 幹 (正会員)

1986 年京都大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程修了。1986 年日本アイ・ピー・エム株式会社入社。東京基礎研究所勤務。1994 年新日鉄ソリューションズ株式会社入社, 2002 年株式会社ビービーアール設立, 現在に至る。人工知能学会会員。



奥田 剛

1998 年大阪大学大学院基礎工学研究科数理系専攻前期課程修了。1998 年大阪大学大学院国際公共政策研究科助手。2001 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手, 現在に至る。マルチメディア通信システム等の研究に従事。IEEE 会員。



寺西 裕一 (正会員)

1995 年 3 月大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻情報工学分野博士前期課程修了。1995 年 4 月日本電信電話株式会社入社, 同情報通信研究所勤務。2002 年西日本電信電話株式会社研究開発センター勤務。2004 年 4 月同主査。2005 年 1 月大阪大学サイバーメディアセンター応用情報システム研究部門講師, 2007 年 11 月大阪大学大学院情報科学研究科准教授, 現在に至る。博士(工学)(2004 年 3 月, 大阪大学)。



春本 要 (正会員)

1994 年大阪大学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。1999 年大阪大学大型計算機センター講師, 2000 年同大学サイバーメディアセンター講師を経て, 2004 年同大学大学院工学研究科助教授(2007 年より准教授), 現在に至る。博士(工学)。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。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



下條 真司 (正会員)

1986 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士後期課程修了。工学博士。1986 年大阪大学基礎工学部助手。1989 年大阪大学大型計算機センター講師。1991 年大阪大学大型計算機センター助教授。この間(1996 年 2 月から 9 月まで), 米国カリフォルニア大学アーバイン校客員研究員。1998 年大阪大学大型計算機センター教授。2000 年大阪大学サイバーメディアセンター教授(副センター長, 2006 年 8 月から 2007 年 8 月まで同センター長), 現在に至る。電子情報通信学会, ACM, IEEE, ソフトウェア科学会各会員。