

推薦論文

大規模な分散環境におけるユビキタス情報発見サービス

中 川 智 尋[†] 吉 川 貴[†]
太 田 賢[†] 倉 掛 正 治^{††}

センサネットワークから取得される実世界の詳細な情報を活用した高度なアプリケーションを実現するためには、膨大な情報源から目的のセンサデータを発見する機構が必須である。本論文では、大量の情報を蓄積し、目的の情報を発見するためのプラットフォームとして携帯端末に着目し、分散型の情報発見システムの設計について提案する。また、動的に電波状態が変化する無線ネットワーク上においてロバストに動作可能な情報発見プロトコルを提案する。提案方式を実装したシステムにより複数の経路を構築する情報発見プロトコルの性能を評価し、無線ネットワークでのリアルタイムな情報発見に有効であることを示す。

Design and Evaluation of Scalable Ubiquitous Discovery System

TOMOHIRO NAKAGAWA,[†] TAKASHI YOSHIKAWA,[†] KEN OHTA[†]
and SHOJI KURAKAKE^{††}

Detailed sensory data gathered from real world is helpful to realize new applications such as context-aware communication or object status tracking. In order to exploit a large number of sensor networks, it is necessary to develop a technology to discover required data from the Internet. We focus on mobile terminals as the platform to store sensory data and discover required data, and propose a design of distributed information storage and discovery system. Also we propose a P2P protocol that shows quick response even under dynamic change of radio status. The evaluation result using implemented proposed protocol shows that the multiple path constructed by the protocol is effective for realtime discovery of information on the wireless networks.

1. はじめに

各種センサの低廉化・小型化を背景として、実世界に広く分布したセンサネットワークによりデータを収集・蓄積することが実現しつつある。リアルタイムに得られるセンサデータを物流・交通情報・ヘルスケア・気象/環境/災害情報といった幅広い分野に活用し、これまでになかった高度なサービスを実現することが期待されている。大規模なセンサネットワークを有効に活用するためには、実世界に遍在するセンサデータを構造化して蓄積し、必要な情報を即座に発見してサービスに利用できる機構が必要となる。

センサネットワークとの連携によりサービスの可能性が飛躍的に広がる一方で、サービスを利用する際

の利便性を向上させるための検討も必要である。携帯端末上で利用できるサービスは増加の一途をたどり、ユーザがいかに必要なサービスを発見するかが大きな課題となっている。1つの解決方法として、実世界にあるモノから、そのモノに関連するサービスをたどることができる機構が有効であると考えられる。

筆者らは、実世界のモノと、そのモノに関連するサービスをお互いに結びつけるシステムをUDS (Ubiquitous Discovery Service) と呼んで検討している¹⁾。本論文では、UDSにおけるサービスの管理部分を分散化するように拡張したSUDS (Scalable UDS) について述べる。SUDSとは、携帯端末で獲得されたモノのIDとそのモノに関連するサービスやセンサデータをお互いに関連づけて蓄積するサービス・インフラ

[†] NTT ドコモマルチメディア研究所
NTT DoCoMo Multimedia Laboratories

^{††} NTT ドコモネットワーク研究所
NTT DoCoMo Network Laboratories

本論文の内容は2003年6月のマルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2003) シンポジウムにて報告され、DICOMO2003 プログラム委員会委員長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。

表 1 ID 関連技術との比較
Table 1 ID-related technologies.

	Auto ID Center	Ubiquitous ID Center	Scalable UDS
Structure of ID	Hierarchical	Hierarchical	Flat
Discovery	ONS (DNS-based)	TRON-based	Resolver
Data Collection	SAVANT (Pre-defined)	(To Be Developed)	(On-demand Query Routing)

トラックチャである。携帯端末の遍在性と人に対する追従性は、環境のセンサデータやセンサデータから得られるユーザのコンテキスト情報をリアルタイムに蓄積するのに適した特徴である。SUDS ではこの点に着目し、携帯端末をセンサデータを蓄積するためのプラットフォームとして利用する。SUDS を利用すれば、個人あるいはグループで利用するモノのトラッキングや、センサから取得されるコンテキスト情報を利用した知的なサービスを実現することが可能となる。

本論文では、ユーザの利用における利便性と、情報の蓄積および発見のリアルタイム性を特徴とする SUDS の設計について述べる。また、SUDS で収容可能なモバイル端末数の観点でのスケーラビリティ、膨大な数の端末から目的の情報を発見する際の応答性、およびモバイル端末特有のネットワークへの接続性を考慮した情報発見方式を提案する。

本論文の構成は以下のとおりである。2章では、ユーザの利用における利便性と、情報の蓄積および発見のリアルタイム性を特徴とする SUDS の設計について述べる。3章では、検討する通信モデルや要求条件について述べる。4章では、複数の経路を構築することを特徴とする提案方式について述べる。提案方式を実装したシステムによる評価結果について5章で述べ、最後に6章で結論と今後の課題を述べる。

2. Scalable UDS のアーキテクチャ

2.1 ID 関連技術の課題

SUDS プラットフォームに関連する研究として Auto ID Center や Ubiquitous ID Center による無線タグを利用した ID 関連技術がある(表 1)。Auto ID Center では、各製品に対して一意に定義された EPC (Electronic Product Code) を無線タグに格納し、その無線タグを製品に付与する。EPC とは、あらかじめ定義された階層的な体系に基づいて生成された ID である。EPC を製品の情報と関連づけて蓄積し、必要な製品情報を発見するための機構を実現している。Ubiquitous ID Center では、TRON (The Real-time

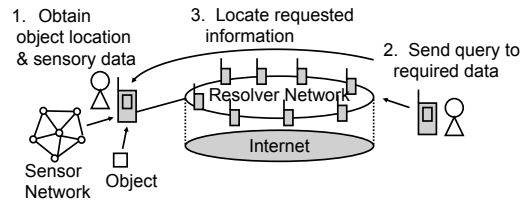


図 1 リゾルバネットワーク
Fig.1 Resolver network.

Operating system Nucleus) 技術を中心として検討を進めている。

すでに分散サーバ技術の詳細が公開されている Auto ID 技術には、その運用において 2 つの課題がある。1 つ目は、発行する ID の管理における煩雑さである。Auto ID 技術では、ID を階層的に定義するため発行した ID の管理を各部署で分担できるという利点がある一方で、ID の発行を許可し、階層を定義する処理が運用面でのオーバーヘッドとなる。各部署では下位の部署において必要となる ID の数を把握し、必要十分な数の ID が末端の部署に行き渡るように計画し、申請することが必要である。

2 つ目は、情報収集の手順を定義する際の煩雑さである。Auto ID 技術における情報収集は、管理の拠頭に配置された SAVANT²⁾ と呼ばれるサーバ群により実現される。事前に処理内容を記述したコードを作成し、SAVANT 上に配置する必要がある点が SAVANT を運用する際のオーバーヘッドとなる。

2.2 設 計

2.2.1 基本方針

SUDS では、情報を分散管理し、さらに目的の情報への転送経路を管理する機器をリゾルバ(resolver)と呼ぶ。リゾルバは、情報を分担して蓄積する機能や、クライアントの検索要求を受信した際に、要求された情報への転送経路を決定する機能を有する。

図 1 にリゾルバによって構成されるネットワークの動作を示す。リゾルバは近隣に存在するセンサネットワークからセンサ情報を収集すると同時に、周辺に存在するオブジェクトの情報も蓄積する(図 1 の 1)。オブジェクトの情報を検索したいユーザは、検索要求をリゾルバネットワークへ送信する(図 1 の 2)。リ

ゾルバネットワークは検索要求に記述された情報を元に、ユーザの要求する情報を蓄積するリゾルバへと検索要求を転送し、目的の情報を保持するリゾルバを発見する(図1の3)。

2.2.2 フラットな ID の構成

Auto ID 技術の運用面における課題を解決するため、SUDS では、ID の一意性を保証し、発行する ID の管理をシステム内で自動化する。SUDS では、バーコードのような既存のコードや Auto ID 技術における EPC のような将来現れるコード等の任意のコードに対して、UOI (Ubiquitous Object Identifier) と呼ぶ ID を対応づける。ユーザはモノに付与されたコードを携帯端末で読み取り、SUDS の UOI 発行管理サーバはそれらのコードに対応する UOI を発行する。

ユーザが容易に ID を利用できるようにするため、SUDS では ID の一意性の保証と発行に関する管理をシステム内で自動化する。UOI は以下のようなフォーマットで定義される。

UOI=tag:tagAuthority:specific

tagAuthority=account@uds.yrp.nttdocomo.co.jp,
date

specific=local_name_space:sequence_number

上記のフォーマットの中で、“tag” は規定の文字列である。account には UOI の発行を依頼するユーザのアカウント、“uds.yrp.nttdocomo.co.jp” は UOI を発行するサーバの名前、date は UOI の発行を依頼する日付を示す。また、local_name_space は、UOI を発行するサーバが、サーバ内において重複が発生しないように管理する名前空間の名称であり、sequence_number には SUDS 内で管理されるシーケンス番号が入る。

SUDS の UOI は EPC のような階層構成ではなくフラットな構成をとる。すなわち、UOI はモノを管理する拠点の階層とは独立に発行可能であり、システムは階層と ID を厳密に対応させて ID 管理を行う必要がない。

2.2.3 情報蓄積サーバの分散化

広域に分散した情報源からリアルタイムに発信される膨大なセンサデータを蓄積するには、情報を分散管理するアーキテクチャが適切である。一般的な検索エンジンは、検索対象であるインデックスをクラスタ化された数千台のサーバ群で集中的に管理する。情報は全世界に広く分散しているため、情報の更新に数日程度の遅れが出ることも珍しくない。

分散配置されたサーバを利用することにより、リアルタイムに発信される情報を即時に検索可能となる。たとえば、WISE (Wide-area Information Sharing Engine)⁴⁾ は、頻繁に発生する情報を局所的に蓄積する方法により情報更新の通信量を分散化する方式を提案している。更新される情報のうちごく一部が利用される場合、すべての情報を集中的に管理するのではなく、WISE のように分散管理する方が効率的である。

SUDS では、分散的にリアルタイムに発信される膨大な量のセンサデータを蓄積するために、携帯端末をリゾルバとして利用する。携帯端末は、ユーザの活動する領域に広く分布して存在し、ユーザに対する追随性が非常に高いデバイスである。これらの特徴は環境に存在するセンサネットワークから得られるセンサデータの蓄積に適している。

2.2.4 情報発見サーバの分散化

SUDS では、携帯端末を情報発見のための分散型リゾルバとして利用する。携帯電話等の端末はユーザの活動する時間帯と同期して非常に長時間にわたって電源が投入されており、国内だけでも数千万台という多数の端末が存在する。検索要求を発信するユーザ数が増加すると検索要求の処理に参加する端末数も増加するため、検索要求の観点でのスケーラビリティが期待できる。ただし、ユーザは他のユーザのためにリソースを提供することになるため、リソースを提供するユーザがそれに見合うメリットを得られるようなサービス形態を検討することが必要である。このようなユーザへのインセンティブを与える機能の検討は今後の課題である。

Auto ID 技術では、ID の階層構造に基づいて DNS (Domain Name Service) を応用した ONS (Object Name Service)³⁾ と呼ぶ分散型の情報発見機構を提案している。製品に関する仕様や位置情報・センサ情報等は PML (Physical Markup Language) という XML ベースの言語で記述され、PML サーバに蓄積される。EPC をキーとした問合せを受けたローカル ONS サーバは EPC を PML サーバのドメイン名に変換し、このドメイン名を ONS インフラストラクチャを利用して DNS と同様の手段で解決する。

SUDS では ID を利用する際の利便性の観点から ID のフォーマットが階層化されていないため、Auto ID 技術の ONS とは異なる分散型の発見機構を検討する必要がある。すなわち、ONS の階層構造に相当する論理的なトポロジを生成する情報発見機構を実現し、ONS とは異なるアプローチで発見の効率化を図る必要がある。

表 2 クエリルーチングアルゴリズムの比較

Table 2 Comparison of query routing algorithms.

	Pastry ⁵⁾	Tapestry ⁶⁾	Chord ⁷⁾	CAN ⁹⁾
# Routing Table Entries	$O(\log N)$			$O(d)$
# Routing Hops	$O(\log N)$			$O(dN^{1/d})$
Exploit Network Proximity				x

3. ID 検索技術への要求条件

3.1 通信モデル

Auto ID 技術のように ID の構成が階層的である場合、ID に関連づけられた情報を発見する機構は、ID の階層構成を利用した効率的な方法が利用できる。しかし、SUDDS のように ID が階層的な情報を含まないフラットな構成をとる場合、この ID に関連する情報を迅速に発見するためには、ID の情報を事前に構造化して保持することが必要となる。

SUDDS では、P2P (Peer-to-peer) 型の情報発見機構をリゾルバで実現し、広域に分散した情報を発見するための基盤とする。通信モデルを図 2 に示す。携帯端末や無線通信インタフェースを備えたセンサ搭載端末をリゾルバとする。すべてのリゾルバは分散サーバとして協調して動作し、任意の端末が他の端末に蓄積された情報を発見する機能を実現する。送信者 (sender) の発信した情報検索メッセージ (request) は必要に応じて複数の中継ノード (intermediate node) によって転送された後、要求された情報を蓄積する受信者 (receiver) に到達する。

リゾルバは、無線リンクを介してセルラ網や無線 LAN によるホットスポット等の無線アクセスネットワークに接続される。無線リンクは有線リンクと比較して不安定な通信特性を示し、電波状態が悪化した場合に一時的に通信が切断される。

3.2 効率化の指標

大規模に分散したユーザ同士がサーバを仲介せず、直接に通信して情報を共有する P2P 型の情報発見機構の研究には、Pastry⁵⁾、Tapestry⁶⁾、Chord⁷⁾、CAN⁹⁾ 等がある (表 2)。これらの研究では、情報の共有を目的としたユーザ同士がアプリケーション層におけるネットワークを構成し、ユーザ数の観点でのスケラビリティに優れた情報共有の基盤を構築する。P2P 型のネットワークの構成要素をピアと呼び、ピアが発信した要求メッセージをクエリと呼ぶ。P2P ネットワーク上のクエリルーチングでは、各ピアにおける経路表のサイズと、目的の情報を保持するピアを発見するまでの経路長が効率化の指標となる。ここで経路表とは、目的のコンテンツに対して次に転送するピアを示す

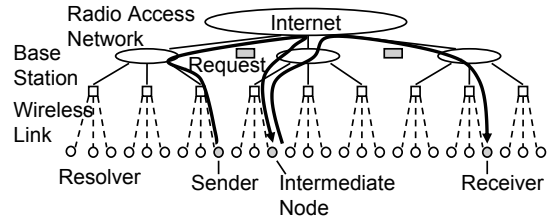


図 2 携帯端末によるリゾルバの通信モデル

Fig. 2 Communication model of mobile resolvers.

データベースである。経路表のサイズは、ピアがクエリを転送する際の転送先の検索時間や、経路表を保持するメモリのサイズに影響を及ぼす。また経路長は中継するピアの数を示すため、目的のピアを発見するまでの時間や、1つの探索処理がネットワーク全体にかかる負荷に影響する。

3.3 要求条件

携帯端末をリゾルバとして利用するにあたっての2つの要求条件を以下に示す。1つ目は、膨大な数のピアを収容可能なスケラビリティである。数千万台のリゾルバが接続されたネットワークにおいて、計算機能やメモリ容量に制約のある携帯端末を含むリゾルバへの負荷を軽減し、瞬時に目的のピアを発見するためには、経路表の大きさおよび経路の長さの両方に関して、リゾルバの数に対するスケラビリティを実現することが必須となる。

2つ目は、無線リンクの不確実性の問題である。携帯端末は固定 PC と異なり、一時的に無線リンクが不安定になるという特徴がある。このような場合、無線リンクが回復すれば携帯端末は元どおり共有リソースとして利用できる状態となる。従来の P2P ネットワークの研究においてはピアの頻繁な参加・離脱について検討が行われているが、一時的に離脱し即座に復旧するピアを考慮していない。たとえば、Chord⁷⁾ では、ピアの参加・脱退のたびに $O(1/N)$ の経路表エントリの移動が発生する。移動するエントリのサイズは決して大きくはないが、携帯端末のように通信および電源リソースの制約がある端末においては、このようなエントリの移動が重なると負担となる。また、データへの到達性も悪化する。これらの問題を解決するため、一時的な端末の離脱を補完するルーチング機能の検討

が必要である．また，Kademlia⁸⁾ は，検索要求の転送先を複数のノードの候補から選択することにより，ネットワークから切断されたノードを発見するまでの遅延を削減している．この方式の着眼点は本研究と同一であるが，転送先の決定方法が異なるため，ピアの参加・離脱が頻繁になった場合にトラフィックが増大するという問題が発生する．すなわち，ピアがグループを構成せずに独立に動作するため，ピアの構成が変化した場合に転送先を更新することが必要となる．このため，ピアの構成の変化が激しい場合には，転送先の更新情報が膨大となる．

4. ID 検索方式の検討

4.1 モバイル端末向けクエリルーチング

SUDS では，Chord を拡張することにより携帯端末向けのクエリルーチング方式を提案する．Chord をベースとする理由は以下の 2 点である．1 点目の理由は，Pastry，Tapestry，Chord 等では CAN に比べて経路長を小さく抑えられることである．CAN では $O(dN^{1/d})$ の程度の経路長となる．ここで， N は P2P ネットワークに参加するピアの数である．また， d は CAN において仮想的に構築する P2P ネットワークの座標空間の次元を示している． d の値が大きくなるほど経路長を短縮できる一方で，ピアの保持する経路情報が増大する．CAN では， d の値を適切に設定することが困難であるうえ， N の値が大きくなった際に経路長が大きくなるという問題がある．たとえば $d = 5$ ， $N = 10,000,000$ の場合， $dN^{1/d} \simeq 125.6$ であるのに対して，Chord では $\log N \simeq 23.3$ となる． d と N の値によって経路長は大きく変化するが，特に N の値が大きい場合には Chord の方が適している．

2 点目の理由は，Chord の経路表の拡張性である．Chord は Pastry，Tapestry と比較して経路表の作成方法を変更した際の挙動を把握しやすい．Pastry では，各ピアがピア ID のプレフィックスに基づいて構造化された経路表を作成する．ピア ID はピアの IP アドレスのハッシュ値として与えられる．経路制御はプレフィックスの一致するピアを転送先として選択する方式であり，転送先の決定方法は柔軟性に欠ける．Tapestry もピア ID のプレフィックスに基づく経路制御を行う．一方，Chord では，各ピアがピア ID に基づいて論理的なリング状のトポロジを構成する．また，コンテンツはファイル名のハッシュ値をコンテンツ ID として与えられ，同じリングトポロジ上にマッピングされる．ピア ID が $peer_id$ である場合に，このピアが転送先として保持するピアのアドレスは下記の式に

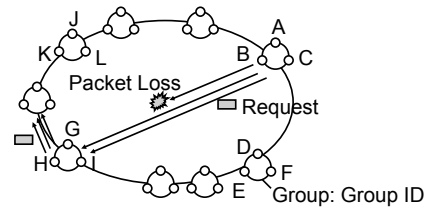


図 3 複数経路による検索要求のルーチング
Fig. 3 Query routing using multiple path.

従って決定される．

$$peer_id + 2^i (i \geq 0) \quad (1)$$

この転送先を決定する式を変更することにより，経路表の作成方法を容易に制御することができる．なお，Chord はネットワーク層のトポロジを考慮せずに P2P ネットワークの経路制御を行うため，論理的に小さいホップ数でも物理的に大きいホップ数の経路をとる可能性がある．この点ではネットワーク層での近さを考慮する Pastry，Tapestry に劣るが，経路表の制御の容易性に着目し，Chord を採用する．

4.2 複数経路による転送方式

無線リンクの通信の一時的な切断に対処するために，SUDS では複数の経路による転送方式を提案する．提案方式は，転送グループ生成機能および複製メッセージ転送機能により実現される．

転送グループ生成機能は，複数のリゾルバを選択しグループを生成する機能である．図 3 は複数の経路を利用した検索要求の経路制御を示している．グループ内の各リゾルバは，論理トポロジ上で同一のリゾルバとして振る舞う．グループに所属する各リゾルバは，同一のグループ ID を有し，Chord における 1 つのピアとして動作する．複数のリゾルバがグループを構成し，グループ単位でメッセージの転送を制御する．複数のリゾルバが 1 つのグループに参加し同一メッセージの転送を担当するため，グループ内のリゾルバが無線リンクの通信状態の悪化によりネットワークから一時的に切断されている場合でも，遅延を発生せずに検索要求メッセージを転送することができる．

複製メッセージ転送機能は，リゾルバが検索要求を複製し，転送先のグループに所属する複数のリゾルバに複製された検索要求を転送する機能である．図 4 に提案方式における経路表の構成を示す．経路表の左側に記された Key は，転送先を決定する際に参照する情報である．UOI のハッシュ値よりも小さく，かつ最大の値の Key を転送先として選択する．経路表には複数の転送先の候補が保持されている．これらの候補は同一のグループに所属するリゾルバである．これらの

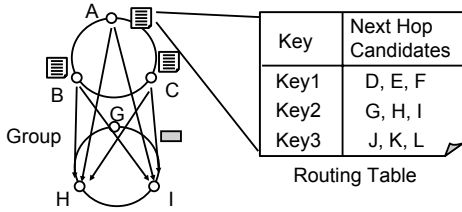


図 4 経路表の構成

Fig. 4 Composition of routing table.

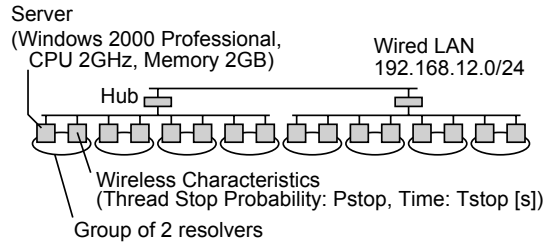


図 6 実験システムの構成

Fig. 6 Evaluation system.

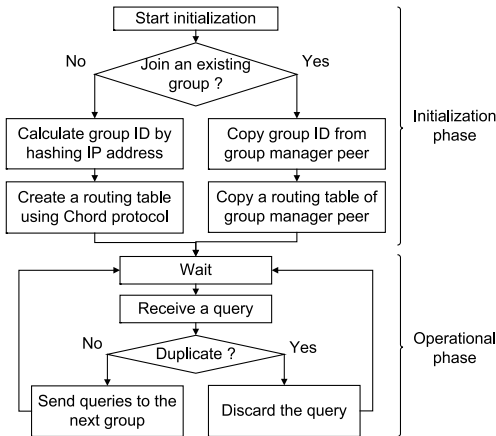


図 5 グループの生成手順

Fig. 5 Flowchart of group creation.

候補の中から転送先のリゾルバを選択し、同一のメッセージを複数の転送先に送信する。送信する検索要求のメッセージには、検索対象のオブジェクトを特定するための ID として UOI が記述される。中継ノードは受信したメッセージを記録し、同一のメッセージを複数受信した場合には、2 個目以降のメッセージに対して転送処理を行わない。中継ノードには、検索要求に含まれた UOI および検索要求を発信するサーバの付与したシーケンス番号を記録する。このシーケンス番号は UOI に含まれるシーケンス番号とは無関係に管理されるもので、検索要求メッセージの一意性を保証することが目的である。このように転送メッセージを記録することにより、中継するメッセージの量が爆発的に増加することを回避する。

4.3 グループの生成

提案方式が Chord と最も異なる点は、ピアがグループを構成することである。図 5 にグループを構成する際のフローチャートを示す。処理の流れは、前半の初期化フェーズと後半の動作フェーズの 2 つに大別される。初期化フェーズでは、まず、既存のグループにピアの欠員が存在するか否かを確認する。

ピアの欠員が存在する場合、グループマネージャの

ピアからグループ ID と経路表をコピーする。ピアの欠員が存在しない場合、Chord のプロトコルに従って IP アドレスをハッシュ化することによりグループ ID を生成し、経路表を新規に生成する。動作フェーズでは受信した検索要求の宛先と発信元を記録し、すでに転送した検索要求と同一の組合せであれば、重複する検索要求として破棄する。

5. 評価

提案するモバイル向けクエリルーティングでは経路の多重化により無線の電波状態の悪化に対するロバスト性が高まるという利点に対して、経路表のサイズやメッセージ転送量が増加する点が問題となる可能性がある。提案方式の有効性を確認するため、ルーティングプロトコルを実装した分散サーバによって、無線特性を模擬した環境で性能の評価を行った。

5.1 比較方式

提案方式の基本方針として採用した Chord を比較対象とする。Chord は P2P プロトコルの中では情報発見における転送ホップ数の最も少ないプロトコルの 1 つである。しかし、複数のサーバを経由して情報を発見するという性質上、中継リゾルバが一時的にネットワークから切断される無線ネットワークの環境下では、検索要求を発信してから結果を受信するまでの応答性が悪化すると考えられる。

5.2 システム構成と評価パラメータ

実験システムの構成を図 6 に示す。16 台のサーバ (Windows 2000 Professional, CPU 2 GHz, Memory 2 GB) に Chord および提案方式を実装し、同一のサブネット (192.168.12.0/24) に接続した。Chord では 16 台のサーバを独立のリゾルバとして動作させる。提案方式では 2 台のリゾルバを 1 つのグループとして動作させ、グループ内の 2 台のリゾルバが転送先のグループに属する 2 台のリゾルバへ計 4 つの検索要求を転送する。グループ間に 4 本の経路が構築されればロバスト性を向上させるのに十分であると考えられ

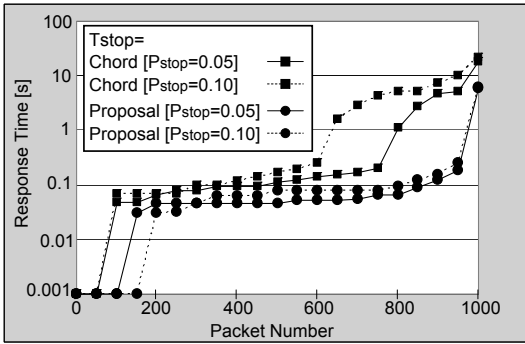


図 7 無線ネットワークにおける応答性の改善

Fig. 7 Improvement of response in wireless networks.

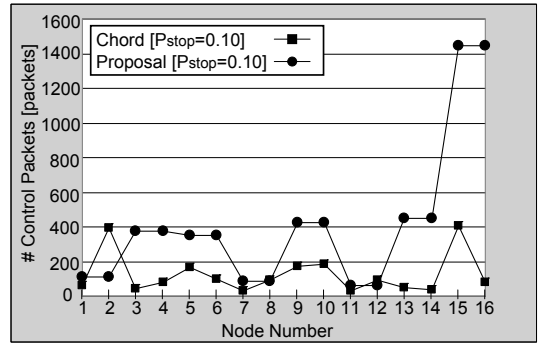


図 8 無線ネットワークにおける制御パケット数の増加

Fig. 8 Increase of control packets in wireless network.

るため、この実験ではグループ内のリゾルバを 2 台とした。

無線の電波状態はリゾルバが検索要求を受信した際にスレッドを停止する動作により模擬した。この実験では、リンク層におけるメッセージの効率的かつ迅速な再送が可能であるという前提のもとで、実装の簡略化のため、スレッドを停止する方法を採用した。検索要求を受信したリゾルバは、確率 P_{stop} で時間 T_{stop} [s] のあいだ動作を停止する。実験では、 $P_{stop} = \{0.00, 0.05, 0.10\}$, $T_{stop} = 5$ [s] とした。

初期設定として各リゾルバに 10,000 のコンテンツを用意し、各リゾルバに対してランダムに発信した合計 1,000 の検索要求について結果を集計した。システム起動直後の検索要求に対してシステムの応答性が安定せず、 $P_{stop} = 0.00$ とした場合で応答時間に 7.1[s] 以内のばらつきが生じた。この傾向は少なくとも 100 個の検索要求を処理した後は消失し、その後 1,000 個の検索要求に対して 375[ms] 以内の高い応答性を示した。実験の目的は無線ネットワークの特性の影響を確認することであるため、初期動作の不安定性の影響が消失した 101 番目から 1,100 番目までの 1,000 個の検索要求に対する応答を有効な実験結果として利用した。

5.3 評価結果

図 7 は検索要求を発信した端末が応答を受信するまでの時間を示している。Chord および提案方式について、 $P_{stop} = 0.05, 0.10$ の場合の応答時間を各検索要求ごとに記録し、応答時間の短い順に並べ替えた結果を示している。

$P_{stop} = 0.05$ の場合、Chord では応答の 20.2[%] が 1[s] 以上の長い応答時間を示した。提案方式において応答が 1[s] 以上の値を示した割合は $P_{stop} = 0.05$ の場合で 2.1[%] であり、ほぼすべての検索要求に対し

て 1[s] 以内に応答を得られることが確認された。

$P_{stop} = 0.10$ の場合、Chord の性能はさらに大幅に悪化し、応答の 37.6[%] が 1[s] 以上の値を示した。一方、提案方式では 1[s] 以上の応答時間を示す割合は 2.7[%] であり、 $P_{stop} = 0.05$ の場合と比較して応答性の悪化はほとんど見られなかった。以上の結果から、Chord では電波状態の悪化により通信を停止するリゾルバの割合が増加した際に応答時間の悪化が著しいのに対し、提案方式ではほぼすべての応答時間が 1[s] 以内に得られた。

また、 $P_{stop} = 0.05$ の場合、応答時間が 1[s] 以上の応答について、Chord では応答時間の平均値は 4.50[s]、最大値は 18.00[s] であるのに対し、提案方式の応答時間の平均値は 3.62[s]、最大値は 6.03[s] であった。このように、提案方式は応答時間の最大値を抑制できることが確認された。

なお、実験では $T_{stop} = 5.0$ [s] と一定の停止時間で評価を行ったが、1.0[s] 以上 5.0[s] 未満の応答時間を示す応答が存在する。これは、停止時間内に受信された検索要求が 5.0[s] 未満の停止時間を経て転送されるためである。

図 8 はネットワーク内で発信および転送された検索要求の数を示している。 $P_{stop} = 0.05$ の場合と $P_{stop} = 0.10$ の場合では、Chord および提案方式の双方についてほぼ同じ結果であった。図 8 では $P_{stop} = 0.10$ の場合の結果を示している。横軸はリゾルバの番号を示しており、1 と 2、3 と 4 等隣り合う 2 台のリゾルバは提案方式においてグループを構成する。Chord では各リゾルバが独立に動作する。

Chord における総メッセージ数は 2,026[packets] であるのに対して、提案方式における総メッセージ数は 6,612[packets] であった。提案方式ではグループに属するリゾルバを 2 台とし、各リゾルバが計 4[packet]

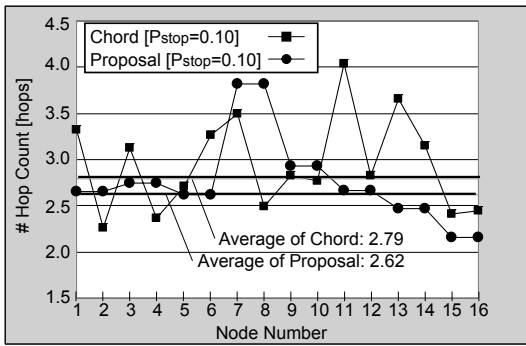


図9 各ノードから発信された検索要求のホップ数
Fig.9 Hop count of queries from each resolver.

を次のグループに転送するが、総メッセージ数を比較すると4倍未満となっている。これは、提案方式の方が転送ホップ数が短いためであると考えられる。提案方式では複数のリゾルバがグループを構成するため、論理トポロジ上で経路表を独立に生成するピアの実質的な数は、Chordに比べてグループを構成するリゾルバの数で割った数に減少している。実験ではChordのホップ数が計算上では $\log 16 = 4$ であるのに対して、提案方式のホップ数は $\log 8 = 3$ となる。

1つの検索要求のサイズは数10[Byte]以内であり、リゾルバの総数が増加するほど検索処理の負荷はシステム全体で分散される。このため、携帯端末において転送する制御パケット数が増加した場合でも、検索処理で発生する通信量は許容できる範囲内のデータ量と考えられる。しかしながら、図8の結果では、各リゾルバの処理する検索要求の量に大きな偏りが生じている。転送する制御パケット数の偏りが生じると、携帯端末の電源消費の偏りが問題となるため、検索処理の負荷を均等に分散する機能を検討することが必要である。

図9は各リゾルバが発信した検索要求を処理した際に経由したホップ数を示している。Chordは提案方式より平均して0.17[hops]だけ大きいホップ数を示しているが、これは前述したように、提案方式で論理トポロジ上のピアの数が減少するためである。

6. おわりに

本論文では、センサネットワークを利用したサービスの高度化を目的として、リアルタイムに発信されるセンサデータを動的に発見するためのプラットフォームSUDSの設計について述べた。SUDSの特徴は、IDの一意性の保証と発行の管理をシステム内で自動化したことによるユーザの利便性、広域に分散した情報源

を携帯端末のリゾルバで監視することによる情報蓄積・発見のリアルタイム性である。また、無線ネットワーク上で分散型の情報発見システムを実現するための情報発見プロトコルを提案し、実装したシステムにより無線環境下において既存プロトコルと比較して飛躍的に応答性を高められることを確認した。今後は、端末間における電力消費の偏りを解消するため、メッセージ転送の負荷をグループ間で分散化する機能を検討したい。

参考文献

- 磯 俊樹, 磯田佳徳, 大辻清太, 鈴木裕紀, 倉掛正治, 杉村利明: コピキタスサービスのための情報基盤技術, NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, Vol.11, No.1, pp.38-48 (Apr. 2003).
- OAT Systems & MIT Auto-ID Center: TECHNICAL MANUAL The Savant Version 0.1 (Alpha) (Feb. 2002).
<http://www.autoidcenter.org/research/MIT-AUTOID-TM-003.pdf>
- OAT Systems & MIT Auto-ID Center: TECHNICAL MANUAL The Object Name Service Version 0.5 (Beta) (Feb. 2002).
<http://www.autoidcenter.org/research/MIT-AUTOID-TM-004.pdf>
- 八木 哲, 高橋直久: 広域分散した動的な情報の共有システム WISEのデータベース, 情報処理学会データベースシステム研究会, 02-DBS-126-4 (Jan. 2002).
- Rowstron, A. and Druschel, P.: Pastry: Scalable, distributed object location and routing for large-scale peer-to-peer systems, *IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms (Middleware)* (Nov. 2001).
- Zhao, B.Y., Kubiawicz, J.D. and Joseph, A.D.: Tapestry: An Infrastructure for Fault-Tolerant Wide-Area Location and Routing, UC Berkeley Computer Science Division, Report No.UCB/CSD 01/1141 (Apr. 2001).
- Stoica, I. et al.: Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications, Technical Report TR-819, MIT (Mar. 2001).
- Maymounkov, P. and Mazières, D.: Kademlia: A peer to peer information system based on the xor metric, *Proc. IPTPS02*, Cambridge, USA (Mar. 2002).
- Ratnasamy, S., Francis, P., Handley, M., Karp, R. and Shenker, S.: A Scalable Content-Addressable Network, *Proc. ACM SIGCOMM 2001* (2001).
- Dabek, F. et al.: Wide-area cooperative stor-

age with CFS, *Proc. 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP'01)* (Oct. 2001).

(平成 15 年 12 月 25 日受付)

(平成 17 年 2 月 1 日採録)

推薦文

センサ・移動体が大量の情報をたえず発生するユビキタス情報環境での情報発見手法として有効と考えられる一意 ID に基づくリーズナブルなデータ蓄積・検索方法を提案している。本論文は、ユーザの利便性、スケーラビリティ、応答性、ネットワークへの接続性、電力消費等の実用性を考慮しており、今後のこの分野の研究に大きく貢献するものと認められる。

(DICOMO2003 プログラム委員会委員長 高橋 修)



中川 智尋 (正会員)

平成 10 年東京大学工学部電子情報工学科卒業。平成 12 年同大学大学院修士課程修了。同年 (株)NTT ドコモ入社。以来、アドホックネットワーク、モバイルサービス環境の研究に従事。現在、同社マルチメディア研究所勤務。

研究に従事。現在、同社マルチメディア研究所勤務。



吉川 貴 (正会員)

平成 11 年慶應義塾大学総合政策学部卒業。平成 13 年同大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。同年 (株)NTT ドコモ入社。以来、移动通信方式の研究・開発に従事。現在、同社マルチメディア研究所勤務。



太田 賢 (正会員)

平成 6 年静岡大学工学部情報知識工学科卒業。平成 8 年同大学大学院修士課程修了。平成 10 年同大学院博士課程修了。平成 11 年 NTT 移动通信網 (株)入社。現在 (株)NTT ドコモマルチメディア研究所勤務。平成 9 年度日本学術振興会特別研究会特別研究員。モバイルコンピューティングに関する研究に従事。



倉掛 正治 (正会員)

昭和 58 年東京大学工学部計数工学科卒業。昭和 60 年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話 (株)入社。平成 2 年より 1 年間、米国南カリフォルニア大学に客員研究員として滞在。平成 12 年より 2 年間、米国 DoCoMo USA Labs に勤務。文字認識、コンピュータビジョン、ユビキタスコンピューティング、モバイルサービス環境の研究に従事。現在、NTT ドコモネットワーク研究所主幹研究員。IEEE、ACM 各会員。