

位置依存情報配信を目的とした IPv6 マルチキャストアドレスの設計と評価

岡田 和也^{1,a)} 奥田 剛^{1,b)} 門林 雄基^{1,c)} 山口 英^{1,d)}

受付日 2013年5月14日, 採録日 2013年10月9日

概要: スマートフォンの普及にともない, 輸送障害・災害情報の配信, 周辺施設の広告配信といった利用者の位置に依存した情報配信に対する期待が高まっている. サービス提供者は, 各端末から定期的に送られてくる位置情報を管理し, 各端末や各基地局に情報を送信することでサービスを実現しており, 端末位置を管理する仕組みが必須である. 我々は, 位置に依存した情報配信をネットワーク層で配信する方式として位置依存マルチキャスト (LBM: Location-Based Multicast) の実現を目指し, ネットワーク層で端末の位置を一意に表す IPv6 マルチキャストアドレスとして GALMA (Geographically Aggregatable Location-based Multicast Address) を提案した. LBM は, 端末が自律的に位置情報から GALMA を決定することで, 現在位置・領域に対するパケットを受信可能にする. このアドレスは, 階層的なアドレス構造により, アドレス表記のみで柔軟な領域指定と階層的な経路集約を同時に実現する. 評価では, 実際の人の移動データを用いて各階層における総アドレス数, アドレス更新頻度を端末数ごとに解析した. また, GALMA は, 他のアドレス割当て方式と比較してアドレス構造による経路集約, 領域指定ができる点で優れていることを示した.

キーワード: 位置情報サービス, IPv6, 位置依存マルチキャスト, IP マルチキャスト

Design and Evaluation of Geographically Aggregatable and Location-based IPv6 Multicast Address

KAZUYA OKADA^{1,a)} TAKESHI OKUDA^{1,b)} YOUKI KADOBAYASHI^{1,c)} SUGURU YAMAGUCHI^{1,d)}

Received: May 14, 2013, Accepted: October 9, 2013

Abstract: Location-aware information delivery is one of the most promising applications of mobile Internet, where one can automatically distribute information such as weather forecast, disaster information and advertisement to a user based on their location. While service provider has to periodically observe users' device location and deliver location-aware information to users, there are no public service or infrastructure available for the purpose. In this paper, we propose new IPv6 multicast address assignment scheme for Location-based Multicast (LBM). A packet is forwarded to a location or an area of the destination multicast address on the multicast. We call the address GALMA; Geographically Aggregatable Location-based Multicast Address. GALMA has hierarchical area specification and route aggregation in its structure which is modeled after unicast IP address. We evaluate the number of generated addresses in individual aggregation level and update ratio of the address by using a massive trajectory data. In addition, we examine the advantages of GALMA's route aggregation and area specification by using address structure compared with other location based address assignment strategies.

Keywords: LBS, IPv6, location based multicast, IP multicast

¹ 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nara Institute of
Science and Technology, Ikoma, Nara 630-0192, Japan

a) kazuya-o@is.naist.jp

b) okuda@is.naist.jp

c) youki-k@is.naist.jp

d) suguru@is.naist.jp

1. はじめに

携帯端末利用者の位置に依存した情報配信が普及してきている。このようなサービスには、端末の現在地周辺の輸送障害・災害情報・施設情報配信がある。

位置に依存した情報配信は、移動体通信事業者（以下、キャリア）、アプリケーションごとの位置情報取得により実現されている。キャリアでは、携帯端末の位置を基地局から把握できるため容易に情報配信ができる。一方で、キャリア以外のサービス提供者は、端末からの位置情報通知なしに端末へ情報提供ができない。また、各サービス提供者の端末位置管理システムは、キャリア、サービス事業者ごとに閉じており相互に位置情報を共有できない。

こうした問題を解決するための共通情報配信基盤として位置依存マルチキャスト (LBM: Location-Based Multicast) が提案されている [1]。LBM は、利用者端末の現在位置に応じた情報配信をネットワーク層で実現する。送信者からの情報は、情報の配信対象領域を指すマルチキャストアドレスに対して送信し、ルータが宛先アドレスの領域に含まれている端末へと自律的に複製・転送していく。端末は、現在位置に応じたマルチキャストアドレスを持つことで、その位置・領域宛に配送されてきた情報を受信する。送信者は、配信対象の端末の位置を関知する必要がなく、端末も個別のサービス提供者への位置情報提供が不要になる。

本論文では、IP 網で位置・領域の識別子として機能する GALMA (Geographically Aggregatable Location-based Multicast Address) を提案する。GALMA は、端末の位置・領域を IPv6 マルチキャストアドレスに変換することで IP マルチキャストによる位置依存情報配信を実現する。

IP マルチキャストは、ネットワーク層で 1 対多の通信を実現する通信方式である。IP マルチキャストでは、単一の端末ではなく端末の集合であるグループに対して識別子を割り当て、その識別子宛のパケットをマルチキャスト経路制御により対象の端末群（グループ）に属する端末へと複製し配信する。ユニキャスト通信で複数の端末に同じデータを配信するには、配信対象の端末数 n 個分のデータを送信元から送信しなければならない。マルチキャスト通信では、グループを 1 つのマルチキャストアドレスで識別することで、送信者が受信端末数に関係なく、1 つの宛先へデータを送信することでグループへ配信される。グループへの配信過程では、ルータ・スイッチにおいて宛先グループの端末が存在しているルータ・スイッチへと適宜複製されて配送されていく。グループ識別子は、IPv4 および IPv6 でユニキャストアドレスと別に割り当てられたマルチキャストアドレスを利用する [2], [3], [4], [5]。

しかし、既存の IP マルチキャストでは、識別子に実世界の位置情報を埋め込むことは想定されていない。また、マルチキャストアドレスの構造は、ユニキャストアドレス

のような階層構造を有していない。そのため、ルータが管理するマルチキャスト経路数は、グループ数に比例して増加してしまうという問題がある。GALMA は、アドレス構造に四分木の階層構造を導入することで、柔軟な経路集約を実現しルータが保持するマルチキャスト経路数を削減する。一方、位置に応じた情報配信では、様々な大きさを有する領域を対象とした配信も多い。LBM では、GALMA の階層的なアドレス構造を用い、柔軟な領域指定を経路集約機能と同時に実現する。

本研究の意義は、位置依存マルチキャストを IP 網で実現することにある。IP 網で実現することにより、個別の通信事業者、サービス事業者に依存しない位置依存情報配信が可能となる。LBM の実現には、LBM に適したマルチキャストアドレス、メンバシップ管理、経路制御が必要不可欠である。本論文では、LBM に適したマルチキャストアドレスの設計と評価を行う。

本論文の構成は以下のとおりである。2 章では、端末の位置に応じて情報配信を行う既存研究を紹介する。3 章では、位置依存マルチキャストの概要と要件定義を示す。4 章では、LBM の実現に必要な識別子の要件定義と GALMA の設計を行う。5 章では、GALMA の特徴と性質を実際の移動軌跡データを用いて明らかにする。6 章は、LBM を実現するために必要な端末管理、経路制御手法について議論する。最後に 7 章で本論文のまとめとする。

2. 位置に基づいた情報配信

インターネットにおける位置に基づいた情報配信は、アドホックネットワーク、固定通信網、オーバレイネットワークにおいて先行研究が存在する。

2.1 アドホックネットワークにおける地理的経路制御

アドホックネットワークでは、特定の位置・領域を宛先としたパケット経路制御手法として地理的経路制御 (Geographical Routing) が提案されている [6]。Geographical Routing は、位置・領域を宛先とするパケットを右手の法則に基づいて目的地に近い端末へ転送する方式である。この方式では、端末自身の位置と隣接端末の位置を経路表とし、宛先領域に近い端末へパケットを転送していく。しかし、固定・移動体通信網では、ルータ、端末間のネットワークにおける論理的な位置関係と実世界における機器の地理的な位置関係が一致しない。そのため、既存のインターネット環境では、文献 [6] のような手法により端末の位置情報を基にパケットを宛先領域まで転送できない。

2.2 IP アドレスを利用した位置依存情報配信

固定通信網では、端末の位置を GPS もしくは 3G 網の基地局情報を参照して取得することができない。そこで CDN (Contents Delivery Network) 事業者では、IP アド

レスから端末の位置情報を推定することで位置に依存したコンテンツ配信が行われる場合がある。この手法では、対象ホストの IP アドレスまでの経路情報、位置情報が既知の端末から測定した遅延を対象ホストの位置を推定する [7]。しかしながら、IP アドレスに基づいた位置推定精度は低く、特に移動体通信網では、平均 70 km の誤差が生じることが報告されている [8]。位置に依存した情報配信では、配信対象領域が配信コンテンツ・アプリケーションに依存して細かいものから粗いものまで様々である。そのため、IP アドレスから推定した位置情報の精度では、細かな領域を対象とした配信に不向きである。

2.3 位置情報を用いたオーバレイネットワーク

オーバレイネットワークの LLNet [9] では、端末の位置をキーとした端末の探索を実現できる。しかしながら、オーバレイネットワークでは、参加ノード間でのピア管理が必要である。また、オーバレイネットワークの構造は、物理的なネットワーク構造と乖離するため配信遅延が生じる。

3. 位置依存マルチキャスト

本研究では、固定・移動体通信網においてキャリア、サービスから独立した位置依存情報配信をネットワーク層で実現する位置依存マルチキャスト (LBM: Location-Based Multicast) の実現を目指す。LBM は、端末の位置情報をもとにマルチキャストアドレスを決定し、そのアドレスに対してマルチキャストパケットを送信することで端末位置に応じた情報配信を実現する。

3.1 位置依存情報配信の問題

既存の位置依存情報配信では、IP アドレスから推定した位置情報、もしくは端末が取得した位置情報をサービス提供者のサーバへ送信し、サーバ側がその位置に応じた情報を端末へ配信する。この仕組みでは、個別のサービス提供者が利用者端末の位置を管理しなければならない。また、端末位置を追従して情報を配信するためには、常時端末の位置を管理する必要がある。サービス提供者側は、端末からの通知なしに各端末の現在位置を把握できないため、端末の現在地を反映させるためには端末側から適宜位置情報を取得しなければならない。また、既存の仕組みでは、サービス間で位置情報は共有されず、端末が利用しているサービスの数だけ位置情報の通知が必要である。既存の情報配信は、同じ位置・領域に対する情報であっても端末ごとにユニキャストにより配信しなければならない。

3.2 位置依存マルチキャストの概要

図 1 は、LBM の概念図である。LBM は、利用者 (端末)、サービス提供者、通信網から構成される。利用者は、スマートフォン、PC といった端末を携帯しているもの

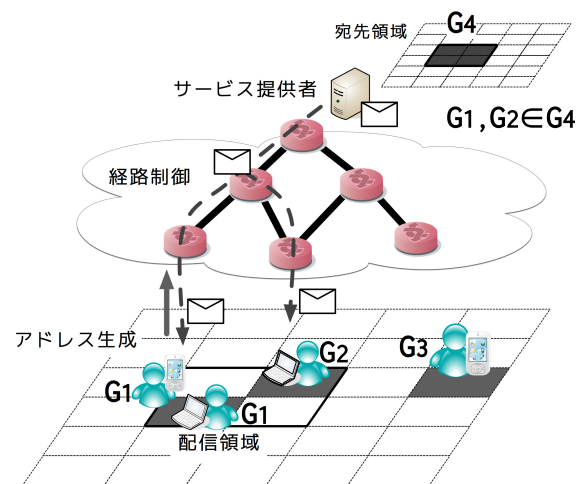


図 1 位置依存マルチキャストの概念
Fig. 1 Overview of Location-Based Multicast.

とする。利用者端末は、無線もしくは固定通信網に接続し、GPS、WiFi、3G から位置情報を取得可能と想定する。LBM は、利用者端末の現在位置に応じた情報配信をネットワーク層で実現する。送信者からの情報は、情報の配信対象領域のアドレスに対して送信し、ルータが宛先アドレスの領域に含まれている端末へと自律的に複製・転送していく。端末は、現在位置に応じた IPv6 マルチキャストアドレスを持つことで、その位置・領域宛に配送されてきた情報を受信する。送信者は、配信対象の端末の位置を関知する必要がなく、端末も個別のサービス提供者への位置情報通知が不要になる。

図中の 4 台の端末は、端末の位置に対応したマルチキャストアドレス G_1 , G_2 , G_3 を自律的に決定し、各グループに参加 (join) する。このとき、位置が同じアドレス領域に含まれる端末は、同じマルチキャストアドレスを決定する。これは、既存の IP マルチキャストと同様の仕組みを用いてネットワークがメンバシップ管理を行う。この際、各端末のマルチキャストアドレスは、端末を収容しているルータ・スイッチにより関知されている。そのため、サービス提供者側では、端末のマルチキャストアドレスを関知する必要がない。サービス提供者からの配信は、配信対象位置・領域のマルチキャストアドレスを宛先としたパケットを送信する。図 1 では、アドレス G_1 , G_2 を包含するアドレス G_4 に対してパケットを送信することで、 G_1 , G_2 に存在する端末へと情報が配信される。通信網内では、経路制御により宛先マルチキャストアドレスに参加している端末が収容されているルータへ転送されていく。端末位置は、利用者の移動にともない変化する。そのため、端末が移動した場合は、個々の端末が新たな位置情報をもとに自律的にアドレス決定し、位置に応じたグループへ参加し直すことで対応する。図 2 は、端末、ルータ、送信者間のやりとりを表したシーケンス図である。LBM の実現には、上記の位置に応じたマルチキャストアドレス決定、ネット

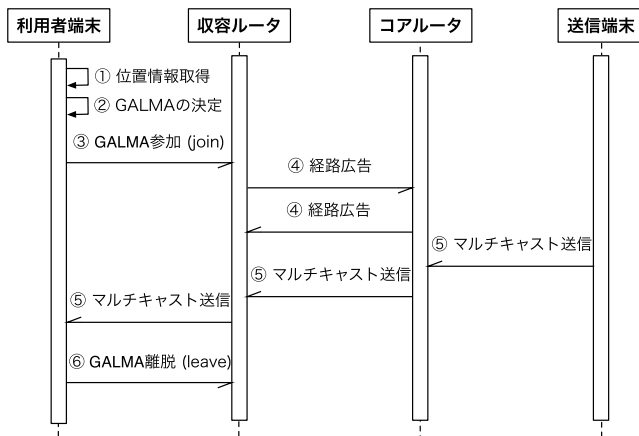


図 2 位置依存マルチキャストシーケンス図

Fig. 2 Sequence diagram of Location-Based Multicast.

ワークへの参加・離脱管理，経路制御，端末移動の反映が必要である。

LBM の利点は，各サービス提供者への位置情報通知が不要となり，同時にサービス側も個別の端末位置を管理しなくてよい点である。また，LBM は，マルチキャストで配信されるため，端末ごとにユニキャストで配信することに比べて通信量が削減できる。端末は，自身の位置に合わせてアドレスを決定し，マルチキャストグループに参加 (join) するだけでその位置に応じた情報を受信可能となる。

3.3 LBM におけるマルチキャストモデル

マルチキャストには，グループ内の任意の端末が送信可能な ASM (Any Source Multicast) [10] と送信者をあらかじめ限定する SSM (Source Specific Multicast) [11] がある。ASM は，受信者がグループアドレス G に join し，任意の端末からマルチキャストグループ G 宛のデータを受信できる。SSM では，受信者端末がマルチキャストグループに join する際にグループアドレス G に加えてマルチキャスト通信の送信者 S を指定する。送信者は， S に限定され，受信端末が指定した送信端末 S 以外からマルチキャストデータを受信することはない。LBM のユースケースでは，利用者端末で利用されるアプリケーションが限定されるため，SSM が適している。また，ASM では，既存の IP マルチキャストと同様に LBM においても送信者が限定されないことにより不確定な通信トラフィックが通信網に発生してしまう。ASM は，LBM が想定するような固定，移動体通信網といった大規模なネットワーク環境での運用には適していない。

3.4 LBM の要件

LBM を実現するための要件を述べる。前提条件として，利用者端末は WGS84 形式の位置情報（緯度，経度）を取得できるものとする。LBM は，キャリア，サービスから独

立し，通信網で自律的に位置依存情報配信を提供するためにネットワーク層へ実装する。以上を前提条件とし，LBM を実現するための要件を下記にあげる。

マルチキャストアドレス：既存のマルチキャストアドレスは，IP ネットワークにおける端末群（グループ）の識別子である。そのため，既存のアドレスでは，実世界における位置，領域を識別することは対象としていない。LBM を実現するためには，位置，領域を識別できるように，実世界の位置とアドレス空間を対応させなければならない。

メンバシップ管理：LBM では，マルチキャスト配信を行うために，収容ルータがどの端末がどの位置・領域のグループに所属しているかを管理しなければならない。

経路制御プロトコル：LBM は，IP ネットワーク上で動作させるために，新たなマルチキャストアドレスに対応した経路制御が必要である。

移動性：移動体端末の位置は，人々の移動に合わせて時々刻々と変化する。そのため，端末が現在位置に応じた情報を受信するためには，位置に応じてアドレスを更新しなければならない。通信網は，端末の位置変化にともなうアドレス更新を許容できる処理能力が必要となる。また，端末の通信手段は，つねに固定されているわけではなく，時と場所により変化するため，通信網に依存しない配信ネットワークが実現されていなければならない。

4. 位置依存マルチキャストアドレスの設計

我々は，LBM の要件を満たす識別子として GALMA (Geographically Aggregatable Location-based Multicast Address) を提案する。GALMA は，実世界の位置を一意に識別する IPv6 マルチキャストアドレスである。このアドレスは，ユニキャストアドレスのような階層構造を応用することで，アドレス表記のみで領域指定と経路集約を同時に実現する。本章では，LBM で端末の識別子に用いる GALMA の仕組みと設計について述べる。

4.1 識別子の要件

LBM の要件から識別子が満たすべき要件を明らかにする。

一意な位置識別：LBM において識別子は，地球上の任意の位置・領域を一意に識別できなければならない。

領域指定：位置依存情報配信では，特定の位置だけでなく一定の領域を宛先とした配信が多い。たとえば，気象，災害情報は，都道府県や市区町村といった規模での配信が望まれる。配信領域は，個別のサービスに依存するため，位置に加えて柔軟な領域指定に対応できなければならない。

経路集約：LBM では，端末の位置・領域に対してアドレスが割り当てられるため，端末が存在する位置の数だけマルチキャストグループが生成される。そのため，端末の収容ルータ・スイッチは，グループ数に応じ

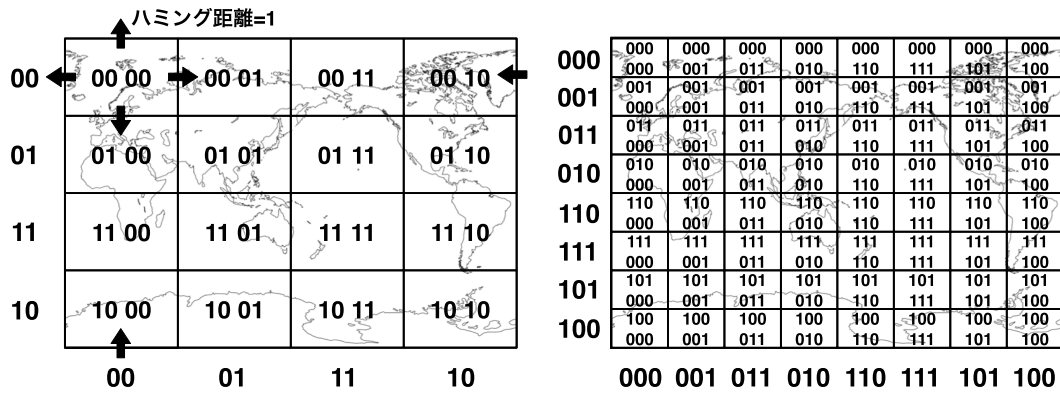


図 3 アドレスの割当て例 (2 ビット, 3 ビット)

Fig. 3 Examples of address assignment (cases of 2 and 3 bits).

た経路をルータが保持しなければならない。ユニキャストの経路制御では、広告する経路をプレフィックス長により集約することで経路数の爆発を防いでいる。たとえば、IPv6 ユニキャストの {2001:200:16a:1010::/64, 2001:200:16a:1020::/64, ..., 2001:200:16a:10f0::/64} という経路は、{2001:200:016a:1000::/56} と集約され 1 経路として経路広告できる。しかし、既存の IP マルチキャスト経路制御およびマルチキャストアドレスの割当ては、マルチキャスト経路集約を考慮していない。そのため、既存のマルチキャストを LBM に適応すると、利用者端末が存在する位置の数に応じてマルチキャスト経路が増加してしまう。そこで、LBM では、ユニキャスト経路制御のようにアドレス構造により経路集約し、ルータが保持すべきマルチキャスト経路数を削減しなければならない。また、この経路集約は、前述の領域指定の要件と合わせて地理的に集約されなければならない。

4.2 GALMA: Geographically Aggregatable Location-based Multicast Address

本研究では、実世界の領域を格子状に分割し、交番二進符号で一意な識別子を各格子に割り当てることでマルチキャストアドレスを決定する方式を提案し、GALMA (Geographically Aggregatable Location-based Multicast Address) と名付ける。図 3 は、緯度、経度方向に 16 分割 (4 ビット) と 64 分割 (6 ビット) した例である。GALMA は、分割時のビット数が大きくなるほど格子の粒度は細くなる。この割当て方式では、隣接する格子との符号間のハミング距離がつねに 1 となる。

GALMA のアドレス構造は、図 4 に示す四分木の階層構造を有している。階層数は、緯度経度に割り当てられたビット長が階層数となる。たとえば、図 3 は、左の 2 ビット側が第 2 階層、右の 3 ビット側が第 3 階層となる。第 $n+1$ 階層の上位 n ビットが共通している 4 グリッドは、 n 階層で 1 つのグリッドに一意に必ず対応する。この際、 $n+1$ 階層の 4 つのグリッド識別子は、共通している上位

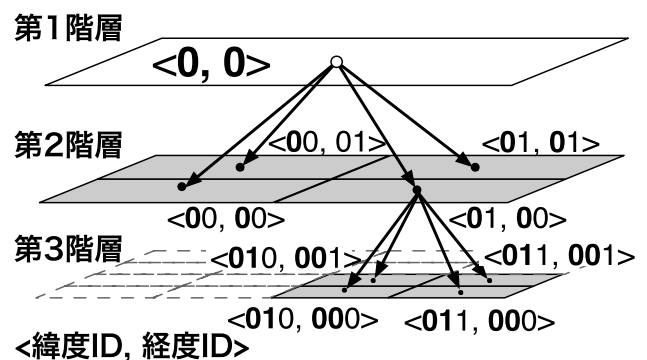


図 4 GALMA の四分木構造

Fig. 4 Quad tree structure in GALMA.

n ビットが上位階層のグリッドの識別子となる。グリッドの大きさは、同階層のグリッドであっても地球の形状により一定ではない。赤道付近で単位グリッドあたりの大きさが最大となり、極に近づくにつれて単位グリッドあたりの大きさは最小となる。たとえば東京都千代田区付近の緯度では、第 22 階層で約 $5\text{m} \times 5\text{m}$ になる。一方で赤道近くのシンガポールでは、第 22 階層で約 $8\text{m} \times 8\text{m}$ となる。したがって、端末が GALMA を決定する際とサービス提供者が情報を配信する際には、緯度を考慮して階層数を決める必要がある。

位置情報を交番二進符号に変換する方式は、他にも提案されている。GeoHash[12] は、位置情報を交番二進符号に変換しさらに base32 の文字列に変換する。GeoHash により決定された文字列どうしは、物理的な位置が近いほど符号間の距離も近くなる。そのため、位置情報サービスにおいて周辺検索等に応用されている。同様の符号化手法には、Natural Area Coding[13] もある。

IP アドレスに位置情報を埋め込み、位置に依存した情報配信を行う仕組みとしては GeoCast[14] がある。GeoCast は、緯度経度の値を直接埋め込むことで自由な矩形、円形領域を指定できる。ただし、アドレス自体の仕組みとして経路集約ができないため、大規模な環境下で端末数に比例して経路数が増加してしまうという問題がある。

GALMA と類似したアドレス割当て方式は、IETF (Internet Engineering Task Force) にインターネットドラフト [15] として提案されている。このドラフトでは、IPv6 ユニキャストアドレスに位置情報をもとにしたビット列を埋め込む方式を提案している。同ドラフトでは、IP マルチキャストへの適用も示唆されているが、具体的な実現方法やその効果が明らかにされていない。また、本ドラフトはすでに失効しており、標準化には至っていない。

4.3 経路集約と領域指定の実現

GALMA は、マルチキャストアドレスの階層構造により宛先の柔軟な領域指定と経路集約を同時に実現できる。経路集約は、収容ルータにおいて収容端末群の GALMA を包含する上位階層の GALMA を計算により求めることで実現する。各ルータは、それぞれが保持している経路を 1 つないし少数の GALMA に集約し、上位ルータに広告することでバックボーンネットワークにおいてルータが保持すべき経路数を削減する。領域を指定した配信は、配信したい領域の細かなアドレスに個別に配送するのではなく、領域全体を包含する上位階層のアドレスを宛先として配信する。GALMA は、各アドレスが矩形領域である。そのため、矩形以外の領域への配信は、領域を構成する複数の矩形領域を宛先として送信しなければならない。配送時に経由するルータにおいて、宛先領域に包含される経路を保持するルータへ段階的にマルチキャスト転送をしていく。これにより、メッセージを宛先領域内に存在するすべての端末に配送できる。この配送方式では、宛先 GALMA よりも深い階層の GALMA を端末が持っていた場合に端末はその情報を受信できる。一方、宛先 GALMA よりも浅い階層の GALMA を持つ端末は、宛先 GALMA がその領域内に位置していても受信できない。

従来の IP マルチキャストにおいてルータが保持するマルチキャスト経路数の増加を抑制する Aggregated Multicast [16] は、マルチキャストグループごとに構成されている配送木上で共通する部分配送木を共有することで、ルータが保持するマルチキャスト経路数を削減している。しかし、共有可能な部分配送木を計算により求める必要がある。また、ルータにおいてマルチキャストグループから部分配送木との対応付けが必要であり、マルチキャスト経路数の削減効果は限定的である。

4.4 GALMA の決定方法

端末の緯度経度から GALMA を決定する方法を説明する。緯度 C_{lat} 、経度 C_{lon} は、端末の位置である。なお、以下の説明と式において緯度経度は、測地系として WGS84 の十進数表記を想定する。WGS84 において緯度は $(-90, +90)$ 、経度は $(-180, +180)$ の値をとる。緯度側の階層 D_{lat} 、経度側の階層 D_{lon} は、指定され与えられるものとする。式

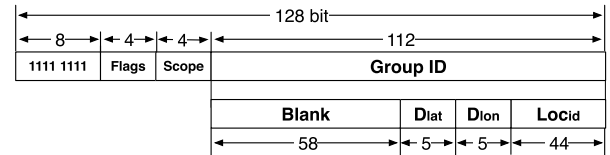


図 5 GALMA のアドレス構造

Fig. 5 Address structure of GALMA.

(1), (2) で緯度、経度を $0^\circ - 180^\circ$, $0^\circ - 360^\circ$ に正規化する。そして、式 (3), (4) で緯度・経度方向のグリッド番号 CID_{lat} , CID_{lon} を得る。次に、グリッド番号を交番二進進符号に変換し G_{lat} , G_{lon} を得る。得られた G_{lat} , G_{lon} のビット列を上位ビットから交互に並べたビット列を Loc_{id} とする。

$$C'_{lat} = C_{lat} + 90 \quad (1)$$

$$C'_{lon} = \begin{cases} C_{lon} & (0^\circ E < C_{lon} < 180^\circ E) \\ 360 - C_{lon} & (0^\circ W < C_{lon} < 180^\circ W) \end{cases} \quad (2)$$

$$CID_{lat} = \lfloor (2^{D_{lat}} \times C'_{lat}) / 180 \rfloor \quad (3)$$

$$CID_{lon} = \lfloor (2^{D_{lon}} \times C'_{lon}) / 360 \rfloor \quad (4)$$

GALMA は、上記の手順で決定された Loc_{id} を IPv6 アドレスに埋め込むことで決定する。アドレス構造は、図 5 に示すように IPv6 マルチキャストアドレスの Group ID (112 ビット) に Loc_{id} と緯度、経度方向の階層 D_{lat} , D_{lon} を埋め込む。 D_{lat} , D_{lon} には、5 ビットずつ合計 10 ビットを割り当てる。 Loc_{id} と D_{lat} , D_{lon} の合計ビット数は、54 ビットとなる。Group ID の残りの 58 ビットは、空白部分とし 0 で埋める。なお、LBM の用途により最大の階層数は、112 ビット以内に収まる範囲で変更できる。最大の階層数を深くすると、数十 cm から数 cm 単位の粒度でアドレスを割り当てることができる。

たとえば、東京都千代田区の緯度 35.681296 度、経度 139.766945 度における第 22 階層での Loc_{id} への変換過程は式 (5) から式 (12) のとおりである。

$$C_{lat} = 35.681296, C_{lon} = 139.766945 \quad (5)$$

$$C'_{lat} = 125.681296, C'_{lon} = 139.766945 \quad (6)$$

$$CID_{lat} = 2928586, CID_{lon} = 1628402 \quad (7)$$

式 (8), (9) では、 CID_{lat} , CID_{lon} とそれらを 1 ビット右シフトした値との排他的論理和をとり、交番二進符号値 G_{lat} , G_{lon} を求める。 $G_{lat(2)}$, $G_{lon(2)}$ は、 G_{lat} , G_{lon} の 2 進数表現である。 $G_{lat(2)}$, $G_{lon(2)}$ のそれぞれの最上位ビットから交互に並べたものが Loc_{id} となる。上記のように、緯度、経度、階層数から GALMA を決定できる。

$$G_{lat} = CID_{lat} \oplus CID_{lat} \gg 1 = 3864623 \quad (8)$$

$$G_{lon} = CID_{lon} \oplus CID_{lon} \gg 1 = 1356939 \quad (9)$$

$$G_{lat(2)} = [1110101111100000101111] \quad (10)$$

$$G_{lon(2)} = [0101001011010010001011] \quad (11)$$

$$Loc_{id} = [1011100110001110111110 \\ 0100000100100011101111] \quad (12)$$

5. GALMA の性能評価

5.1 各階層におけるアドレス数

実際の位置情報データを用いて、GALMA の各階層で決定されるアドレス数を解析する。

位置情報データは、東京大学空間情報科学研究センター [17] が提供している人の流れデータ（以下、PF データ）を利用した。PF データは、地方自治体が数年ごとに実施しているアンケート形式のパーソントリップ調査により得られた離散的な移動データをもとに、被験者の滞在地点間を 1 分単位で最短経路補間したデータである。アンケートでは、選ばれた住民が定められた期間内の行動（移動元、移動先、移動した時間、移動手段）を記録する。評価では、1998 年度東京都市圏 PF データから全データ 72 万 2,000 人分の 12:00 時点での位置データ（緯度、経度）を抽出し、第 1 から 22 階層の階層ごとに GALMA へ変換する。東京都市圏 PF データは、東京を中心とする半径約 80 km 圏域で、東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県、茨城県（南部）が対象である。

図 6 は、各階層での総アドレス数を図示したものである。グラフは、 x 軸が階層番号、 y 軸がアドレス数（対数軸）である。階層数が 22 階層から順に浅い階層になるにつれて総アドレス数が減少している。第 22 階層での総アドレス数は、53,821 個である。第 4 階層より浅い階層では、PF データの地理的な広がりを上回るために 1 個のアドレスに集約される。

5.2 GALMA の更新頻度

LBM では、携帯端末の位置が利用者の移動にともない

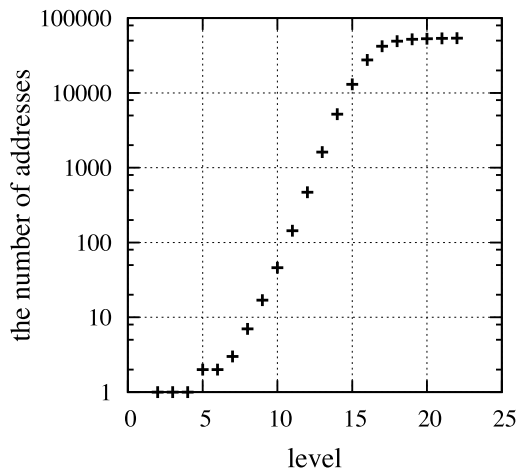


図 6 各階層におけるアドレス数

Fig. 6 The number of address in each level.

変化する。端末の位置に応じた情報配信には、端末の位置に応じて GALMA が更新されなければならない。アドレスの更新は、端末から収容ネットワークに対して更新を通知することで行われる。この際、アドレス更新が頻繁に発生すると、ネットワーク全体に負荷をかけてしまう。そこで、PF データを用いて GALMA の更新頻度を解析する。

まず、PF データからランダムに利用者 ID を 100, 1,000, 10,000, 100,000 人分それぞれの人数につき 10 個の異なるデータセットを作成する。各データから 00:00 から 23:59 までの位置情報を 1 分ごとに読み、各端末の GALMA を第 22 階層で決定する。時刻 t で決定されたアドレスが $t-1$ のアドレスと異なる場合には、GALMA が更新されたと見なす。

図 7 は、端末数 100, 1,000, 10,000, 100,000 での更新数の時間変化を示している。午前 02:00 から午前 08:00 にかけて徐々に更新数が増加していく。これは、通勤・通学の時間帯であり人々が最も移動する時間帯であるため、GALMA も逐次更新されている。最もアドレス更新が発生する時間は、午前 08:00 前後であることも分かる。図 8 は、各端末数に対する最大更新数の割合を箱ひげ図で示している。同時に更新される最大数は、端末数が増加すると

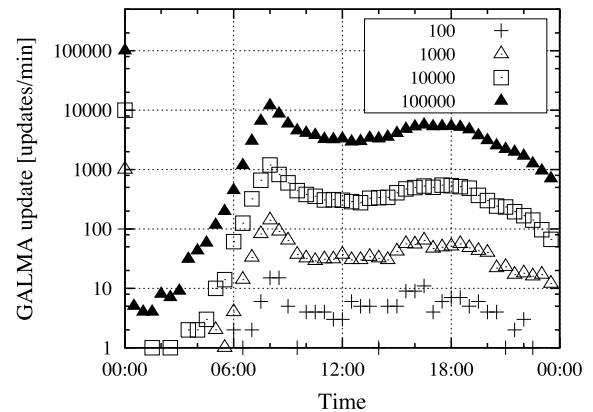


図 7 GALMA 更新数の時間変化

Fig. 7 Time sequence of GALMA update.

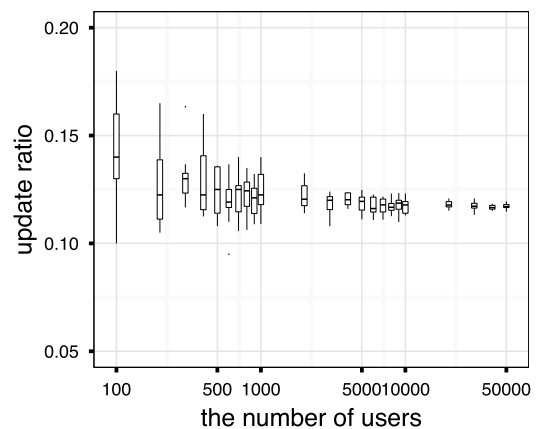


図 8 端末数に対する GALMA の最大更新数の割合

Fig. 8 GALMA update ratio in the number of devices.

表 1 マルチキャストアドレス割当て方式の比較
Table 1 Comparison of address assignment strategies.

アドレス方式	地点	街区	GALMA
経路数	$O(U_i)$	$O(U_i)$	コア： $O(\#ER)$ エッジ： $O(U_i)$
アドレス形状	点	区画形状	矩形
領域指定機能	なし	あり	あり
経路集約機能	なし	なし	あり
事前情報	不要	必要 (行政区画の位置情報)	不要

更新する端末数が約 11% に収束する．そのため，LBM の経路制御では，同時更新数を全端末数の 11% と前提としたプロトコルの設計と評価が求められる．

5.3 異なるアドレス割当て方式との比較

GALMA は，地球上を矩形領域に分割しマルチキャストアドレスを割り当てる．LBM のためのマルチキャストアドレスの割当て方式は，他にもいくつかの方式が考えられる．そこで，GALMA と他のアドレス割当て方式と比較し，GALMA の優位性を明らかにする．

1 つ目は，位置情報をマルチキャストアドレスに 1:1 で対応させる地点方式である．この方式では，マルチキャストアドレスに包含関係がなく集約できないものとする．2 つ目は，行政区画単位でマルチキャストアドレスを割り当てる街区方式である．この方式は，端末の位置情報から現在地の行政区画（都道府県，市区町村，街区大字町丁目）を割り出し，区画ごとに一意にマルチキャストアドレスを割り当てる方式である．

表 1 は，GALMA と地点，街区方式の比較表である．まず，各方式を採用した際にバックボーンネットワークが保持しなければならないマルチキャスト経路数を見積もる．地点，街区をもとにした場合には，経路集約ができないため端末の位置の数 U_i だけアドレスが決定される．そのため，ネットワークが管理すべきマルチキャスト経路数は， $O(U_i)$ となる．ただし，街区方式での最大経路数は，行政区画の数である．GALMA では，ルータにおいて経路集約が施されるため，端末を収容するエッジルータでの経路数は他方式と同様に経路数が端末数に比例する．しかし，GALMA では，ルータが収容している経路を包含するアドレスを決定しコアルータに対して集約された経路を広告できる．そのため，コアの経路数は，エッジルータの数を $\#ER$ とすると $O(\#ER)$ となる．

街区方式では，アドレス決定のために各端末に位置と行政区画の変換を行うための参照データベースが必要不可欠である．一方で地点方式，GALMA は，参照データなしに位置情報から計算により一意にアドレスを決定できる．

図 9 は，地点・街区・GALMA（22 階層）による端末数に対するアドレス数を解析した結果である．解析は，PF

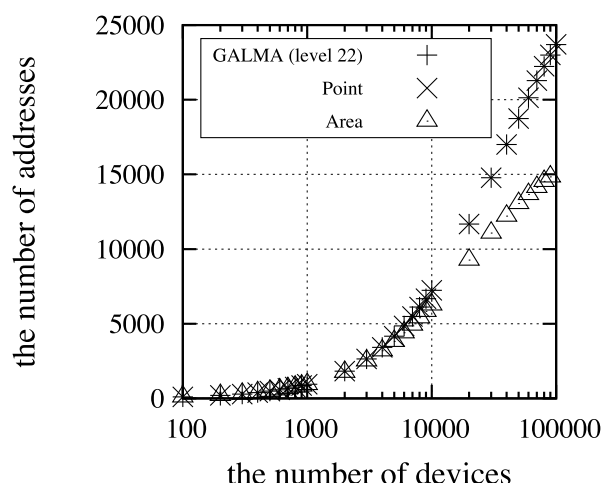


図 9 地点・街区方式によるアドレス割当て数の推移

Fig. 9 The number of addresses in point and area based address assignment.

データから 100–100,000 人のデータをランダムに選択し各被験者の位置情報を地点，街区方式で変換した．街区方式では，各地点に該当する街区（市区町村–町丁目）に変換しマルチキャストアドレスとする*1．図中の x 軸は，端末数の対数軸であり， y 軸は，決定されたアドレス総数である．各方式では，端末数の増加に応じてアドレス数が増加する．地点と GALMA のアドレス数は，端末数によらずほぼ等しい．これは，解析に利用した「人の流れデータ」の位置精度が GALMA の 22 階層の粒度に近いためである．実際の GPS センサは，より位置精度が高く，受信状況や外乱の影響により同じ位置であっても必ずしも同じ緯度，経度とはならない．そのため，地点方式では，異なる地点として認識されるためアドレス数が GALMA に比べて多くなるはずである．街区方式では，1 アドレスあたりの面積が広いため端末数が増加すると地点・GALMA 方式に比べて総アドレス数が少なくなる．また，グラフ中の GALMA のアドレス数は，端末収容ルータにおけるアドレス数である．上位のルータが保持する経路数は，収容ルータがアドレスを集約することで大幅に削減することができる．たとえば，各収容ルータに収容される端末の GALMA を 1 つに集約すれば，上位ルータでの経路数を最大でも収容ルータ数程度に抑えることができる．他の地点・街区方式では，アドレスレベルでの経路集約が施せないため，グラフに示されるような経路数を各ルータが保持しなければならず現実的ではない．

表 2 は，主要な移動体通信事業者 3 社の関東地区における 3G 用基地局数と GALMA を利用した場合に基地局ルータ 1 台あたりが管理しなければならない経路数である．経路数は，総アドレス数を各事業者の基地局数で割ることで算出した．なお，簡単化のため各基地局に IP 網用ルータ

*1 位置情報から街区の変換には，国土交通省国土政策局位置参照情報を利用

表 2 基地局ごとの経路数比較

Table 2 The number of multicast routes on a base station.

事業者	基地局数*2	基地局あたりの経路数
A	16,353	1.4
B	17,124	1.3
C	27,427	0.8

が設置されており，端末が収容されていると仮定する．そのため，各基地局のルータが収容する経路数は，約 1 経路である．実際は，基地局と収容ルータの構成，基地局の物理的配置が一様でないために経路の偏りが生じる．基地局ルータから上位ルータに広告された経路は，再集約することで経路数が大幅に減少する．他方の地点，街区方式を用いた IP マルチキャストでは，経路集約できないため端末の位置数に応じた経路を網全体で保持しなければならない．

6. 議論

6.1 端末位置の追従

5.2 節では，第 22 階層での GALMA 更新頻度を解析した．GALMA の同時最大更新数は，総端末数に対して約 11% であることが分かった．しかしながら，各端末が実際に必要とする GALMA の階層は，端末の利用者，アプリケーションに応じて設定される．第 22 階層以上では，1 アドレスあたりの領域サイズが大きくなるためアドレスの更新間隔が延びる．したがって，端末を収容するネットワークは，1 分あたりに最大でも収容端末数の 11% 程度の同時更新に耐えられるように設計されなければならない．このアドレス更新により，端末の位置が移動してもその地点に応じた情報配信ができる．

6.2 配信領域の指定

地点，街区，GALMA 方式での配信時の領域指定について述べる．地点方式では，地点にしかアドレスが割り当てられないため特定の地点しか宛先に指定できない．街区方式では，アドレス自体が行政区画の領域を反映しているため，容易に領域を指定した配信ができる．GALMA では，形状が矩形領域であるため，特定の行政区画を対象とする場合にその行政区画を包含する 1 つないし複数のアドレスを決定することで同様の宛先への配信を実現できる．GALMA は，他の 2 方式に比べて経路集約が可能であり，かつ領域指定も可能である点が優れている．したがって，ネットワークの規模拡張性を考慮すると IP マルチキャストで LBM を実現する識別子として GALMA が適していると考えられる．

6.3 GALMA を用いたマルチキャスト経路制御

本節では，GALMA を用いて LBM を実現するうえで必

要な経路制御技術に関して考察する．LBM を実現するためには，本論文で述べたマルチキャストアドレスの割当てに加えて，端末のメンバシップ管理，マルチキャスト経路制御が必要となる．

現在の IP マルチキャストでは，IGMP，MLD により端末のマルチキャストグループの所属関係を管理している．端末の収容ルータ・スイッチが，Membership Query を定期的に端末へ送信し，端末は Report を返すことでマルチキャストグループへの参加 (join)，離脱 (leave) を管理する．LBM においても端末のグループ所属管理は，GALMA が IPv6 マルチキャストアドレスに位置情報を埋め込むため MLD を採用できると考える．LBM では，端末が位置に応じて自律的に GALMA を決定し，収容ルータに対して join する．端末が移動し GALMA が変更された場合には，新しい GALMA に join する．これにより，端末の移動に追従した情報配信を実現する．

マルチキャスト送信者から LBM パケットを配送するためには，送信者端末から配送先端末まで転送できるようにしなければならない．GALMA は，IPv6 マルチキャストアドレスとであるため，経路制御に既存の IP マルチキャスト経路制御プロトコルを適応できる．しかし，現在のマルチキャスト経路制御では，ルータが保持するマルチキャスト経路数がグループ数に比例する．そのため，端末位置をグループとして識別する LBM では，端末の存在する位置の数だけグループが決定されるため，マルチキャスト経路数が膨大になってしまう．ルータが保持する経路数を削減し規模拡張性を実現するためには，GALMA のアドレス階層構造を生かしたマルチキャスト経路制御手法が必要である．また，配送制御では，宛先 GALMA の領域に含まれるすべての端末に配信できるように，その GALMA に包含される GALMA へと複製・転送していかなければならない．

同一地域内でサービスを提供している ISP は，同じマルチキャスト経路を保持する．また，複数の国・地域にまたがる単一 ISP は国・地域を包含する 1 経路もしくは複数に分割した経路を広告することが想定される．そのため，ドメイン間マルチキャスト経路制御の実現には，ドメイン内経路制御と同様に GALMA の包含関係を考慮したパケット複製・転送機能が必要である．

6.4 位置情報の保護

LBM では，端末が自律的に GALMA を決定し端末の収容ルータ・スイッチへマルチキャスト join する．そのため，個々のサービス提供者に端末のマルチキャストアドレスを知られることはない．

利用者端末と GALMA の対応付けは，端末の収容ルータ・スイッチでのみ保持されている．そのため，第三者が端末の位置情報を知るには，収容ルータ・スイッチから

*2 総務省：無線局統計情報（2013 年 1 月現在）

GALMA と MAC アドレスの対応表を取得しなければならない。万が一取得された場合には、端末の利用者自身が GALMA の階層を指定できる仕組みにより解決できる。位置情報サービスが必要とする位置情報の粒度は、サービスごとに異なり、必ずしも詳細な位置情報を必要としない。GALMA は、階層が深くなればグリッドが細くなり端末の位置を特定されやすい、一方で上位階層の GALMA は、グリッドが粗くなり端末の位置を特定されにくくなる。したがって、利用者が GALMA の階層数を指定することで利用者個人の方針に合わせて位置情報の粒度を制御できる。

7. おわりに

本論文では、端末の位置に依存した情報配信をネットワーク層で実現する LBM のために IPv6 マルチキャストアドレスとして GALMA を提案した。LBM は、IP マルチキャストとして実装されるためキャリア・サービス提供者に非依存に位置依存情報配信をネットワーク層で実現できる。GALMA は、端末の位置情報とマルチキャストアドレスを一意に対応付け、位置に応じた情報配信を IP マルチキャストにより実現する。このアドレスは、階層的なアドレス構造を利用し、ユニキャストアドレスのような経路集約機能と、柔軟な領域指定をアドレスのみで同時に実現する。

評価では、実際に人の移動軌跡データを集めた人の流れデータを用い、端末数に対するアドレス数の変化、アドレスの更新頻度、他方式に対する優位性を明らかにした。GALMA の 1 分あたりの同時最大更新数は、総端末数の約 11% であることが分かった。また、GALMA は、他のアドレス割当て方式が端末の位置に応じて増加するのに対して、経路集約によりコアネットワークでの経路数を大幅に削減できる。

今後は、6 章で述べた経路制御プロトコルの詳細設計、評価を行う。既存の IP マルチキャスト経路制御プロトコルは、マルチキャストアドレスの動的な集約ができない。そのため、GALMA を利用した経路制御を行うには新たな経路制御プロトコルが必要不可欠である。本論文で議論した経路制御手法をより詳細化し、手法の規模拡張性、各種ネットワークトポロジでの適応性等を評価する。

謝辞 本研究の評価には、東京大学空間情報科学センターより提供いただいた「人の流れデータ」を利用させていただいた。データをご利用いただいたことに深謝する。

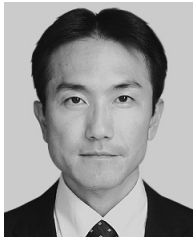
参考文献

- [1] 岡田和也, 奥田 剛, 門林雄基, 山口 英: GALMA: 地理的に集約可能な位置依存マルチキャストアドレスの設計, 情報処理学会研究会 2012-DPS-152 (2012).
- [2] Deering, S.: Host Extensions for IP Multicasting, RFC 1112 (Standard) (1989). Updated by RFC 2236.
- [3] Cotton, M., Vegoda, L. and Meyer, D.: IANA Guidelines for IPv4 Multicast Address Assignments, RFC 5771 (Best Current Practice) (2010).
- [4] Haberman, B.: Allocation Guidelines for IPv6 Multicast Addresses, RFC 3307 (Proposed Standard) (2002).
- [5] Hinden, R. and Deering, S.: IP Version 6 Addressing Architecture, RFC 4291 (Draft Standard) (2006). Updated by RFCs 5952, 6052.
- [6] Karp, B. and Kung, H.T.: GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks, *MobiCom '00*, pp.243–254, ACM (2000).
- [7] Katz-Bassett, E., John, J.P., Krishnamurthy, A., Wetherall, D., Anderson, T. and Chawathe, Y.: Towards IP Geolocation Using Delay and Topology Measurements, *IMC '06*, pp.71–84, ACM (2006).
- [8] Triukose, S., Ardon, S., Mahanti, A. and Seth, A.: Geolocating IP Addresses in Cellular Data Networks, *PAM'12*, pp.158–167, Springer-Verlag (2012).
- [9] 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: データベース, Vol.46, No.18, pp.1–15 (2005).
- [10] Deering, S.E. and Cheriton, D.R.: Multicast Routing in Datagram Internetworks and Extended LANs, *ACM Trans. Comput. Syst.*, Vol.8, No.2, pp.85–110 (1990).
- [11] Holbrook, H.W. and Cheriton, D.R.: IP Multicast Channels: EXPRESS Support for Large-scale Single-source Applications, *Proc. Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication, SIGCOMM '99*, pp.65–78, ACM (1999).
- [12] Niemeyer, G.: GeoHash, available from <http://geohash.org/> (accessed 2013-07-25).
- [13] NAC Geographic Products Inc: NaturalAreaCoding, available from <http://www.nacgeo.com> (accessed 2013-07-25).
- [14] Navas, J.C. and Imielinski, T.: GeoCast-geographic Addressing and Routing, *MobiCom '97*, pp.66–76, ACM (1997).
- [15] Hain, T.: An IPv6 Geographic Global Unicast Address Format (2010), available from <http://tools.ietf.org/html/draft-hain-ipv6-geo-addr-02>.
- [16] Cui, J.-H., Kim, J., Maggiorini, D., Boussetta, K. and Gerla, M.: Aggregated Multicast – A Comparative Study, *Cluster Computing*, Vol.8, No.1, pp.15–26 (2005).
- [17] 東京大学空間情報科学研究センター: 人の流れプロジェクト, 入手先 (<http://www.csis.u-tokyo.ac.jp/>) (参照 2013-07-25).



岡田 和也

2009 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報処理学専攻博士前期課程修了。同年同大学博士後期課程に進学。2012 年奈良先端科学技術大学院大学研究員。位置情報を用いた情報配信技術に関する研究に従事。電子情報通信学会, ACM 各会員。



奥田 剛

1998 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程了。同年同後期課程退学。同年同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。2013 年同研究科特任准教授。仮想計算機環境，仮想ネットワーク技術，インターネットセキュリティに関する研究に従事。IEEE 会員。博士（情報科学）。



門林 雄基（正会員）

1997 年大阪大学にて博士（工学）。1996 年大阪大学大型計算機センター助手，1999 年同講師を経て，2000 年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授。2008 年より国際電気通信連合（ITU-T）において，サイバーセキュリティ標準化に従事。電子情報通信学会，ACM，IEEE ComSoc 会員。



山口 英

奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授。工学博士。1990 年大阪大学情報処理教育センター助手。その後，奈良先端科学技術大学院大学情報科学センター助教授，同大学情報科学研究科助教授を経て，2000 年 4 月より同大学情報科学研究科教授。2004 年 4 月から 2010 年 3 月まで 6 年間，内閣官房情報セキュリティセンター（NISC）・初代情報セキュリティ補佐官を兼務。WIDE Project 運営委員，サイバー関西プロジェクト幹事長。JPCERT コーディネーションセンター，日本ネットワーク員フォーメーションセンター（JPNIC），FIRST 等の理事も務める。