

移動通信における端末間協調による階層的な位置管理方式

井上 武[†] 高橋 紀之[†] 宮崎 敏明[†]

現行の移動体通信では、各移動端末の移動特性にかかわらずそれぞれの位置を一様に管理している。しかし、実際には多くの端末がまとまって移動している状況が見られ、位置管理システムに大きな負荷を与えている。満員電車や自動車が連なって走っている道路はその一例である。本論文では、位置登録と呼び出しを「負荷」と考え、この負荷が小さくなるように同様の移動特性を持つ端末をグループ化する手法を提案する。移動端末をグループごとに階層的に管理することによって、位置登録発生数を削減することができる。また、グループ数を調整することで、グループ形成にともなう通信オーバーヘッドを抑制する手法についてもあわせて提案を行う。いくつかの状況を想定したシミュレーションを行い、大きな負荷軽減効果が得られることを検証した。

Hierarchical Location Management in Mobile Networks Based on Mobiles' Collaboration

TAKERU INOUE,[†] NORIYUKI TAKAHASHI[†] and TOSHIAKI MIYAZAKI[†]

Present mobile networks handle the location of mobile terminals uniformly. However, many mobiles often move together; i.e., passengers on the same train or a group of cars running on a road. They pass many location areas and issue many location update requests, which incur the heavier location management overheads. In this paper, we present an efficient location management algorithm based on the collaboration of mobiles; accompanying mobiles form groups, and mobile networks handle group locations hierarchically, which reduces the location management overheads. We also describe a unique algorithm which suppresses the communication overhead caused by the collaboration. These algorithms can be implemented in a distributed manner, and so they are highly scalable. Simulation results show that our algorithms greatly reduce the location management overheads.

1. はじめに

携帯電話をはじめとする移動通信は急速に普及し、一部の国では生活を支える基盤システムとなっている。近年では、携帯電話からでも、電子メールやウェブ閲覧、通信販売、金融取引、オンラインゲームなど、多種多様なサービスを受けることができるようになった。今後、移動通信は社会インフラとしてより重要な位置を占めるようになると予想され、増加するトラフィックを処理するために、移動網には現在以上の効率化が求められる。

現行の移動通信システムは、サービスエリアを複数のセルに分割したセルラーシステムに基づいて構築されている。セルラーシステムでは、移動端末を呼び出すために、サービスエリア全域を複数の位置登録エリアに分割し、移動端末が滞在しているエリアを位置管

理サーバのデータベースに記録しておく。端末が呼び出されると、位置管理サーバは呼び出された端末の滞在エリアを検索し、エリアを構成するすべてのセルに呼び出しメッセージを報知する。このように、移動通信では通信を開始するために位置管理サーバが必須であり、サーバ負荷が処理容量を超えると呼損が生じることとなる。近年、移動端末数が急激に増加したことによって、位置管理負荷の増大が深刻な問題となっている。また、音声通話以外のサービスが頻りに利用されるようになると、位置管理サーバへのアクセスもさらに増加すると予想される。

将来的には、移動網の IP 化によってサーバ負荷がさらに増大すると考えられる。3GPP²⁾ では、ネットワークの構築・維持コスト削減や、インターネットとの親和性向上のために、移動網の IP 化が議論されている。IP のようなパケット交換方式では、端末が通信中であるか否かにかかわらず定期的に呼び出しを行うため、呼び出しトラフィックが大幅に増加すること

[†] NTT 未来ねっと研究所
NTT Network Innovation Laboratories

となる。そのため、3GPPでは、呼び出しトラフィックを削減するために、位置登録エリアの縮小を提案している³⁾。しかし、エリア縮小の結果、端末のエリア移動頻度が上がるため、位置登録数が増大することとなる。

一方、近年ではセルラーシステム以外に無線 LAN や bluetooth などの広帯域無線通信システムが普及し始めている。今後は、セルラー端末にも広帯域無線インタフェースが備えられ、近傍の端末とは広帯域無線システムを用いて直接通信を行うようになると考えられる。本論文では、位置登録と呼び出しを「負荷」と考え、移動端末が相互に協調し、この負荷が小さくなるようなグループを形成する手法を提案する。端末をグループごとに階層的に管理することによって、位置管理負荷を軽減することができる。以下、2章では関連研究と階層化方式について述べ、3章で階層を構成するためのグループ形成手法を提案する。4章ではグループ形成にともない増加する通信量を抑制する手法を示す。5章では階層化方式における登録および呼び出しプロトコルを示し、6章でシミュレーションによる負荷軽減効果を示す。

2. 従来の位置管理方式

2.1 関連研究とその問題点

携帯電話網などの大規模な移動通信網においては、移動端末(以下、MT)は滞在している位置登録エリアを位置管理サーバが管理する位置情報データベースに登録しておく。MTが呼び出されると、位置管理サーバは呼び出されたMTが登録しているエリアを検索し、そのエリアを構成するすべてのセルに呼び出しメッセージを報知し、MTを呼び出す。本論文では、現行の移動網におけるHLR(Home Location Register)のように位置情報データベースを管理する位置管理サーバをロケーションレジスタ(以下、LR)と呼ぶ。また、各位置登録エリアには、基地局を介してエリア内のMTにエリア公告を報知する装置が設置されている。本論文では、このような装置をロケーションポイント(以下、LP)と呼ぶ。MTはエリア公告によって滞在しているエリアを識別し、受信している公告の変化から、エリアの移動を検知すると、LRに

位置登録要求を送信し、位置情報データベースを更新する。

現行の位置管理方式では、各MTを独立に管理している。しかし、実際には多くのMTがまとまって移動しているような状況が見られ、位置管理負荷を増大させる要因となっている。たとえば、多くの自動車が連なって走行している道路では、位置登録エリア境界を跨ぐたびに車内のMTが位置登録を行っている。

このような負荷を軽減するために、位置登録エリアを仮想的に移動させ、位置登録の発生を抑制する手法が提案されている⁴⁾。この手法では、道路沿いに設置された基地局が、エリア公告を時間とともに変化させ、位置登録エリアと自動車を仮想的に並走させる。すると、車中のMTは同じ位置登録エリアに滞在し続けることになり、位置登録を抑制することができる。この手法では、移動する位置登録エリアが固定位置登録エリアに重なって配置されるため、重複地帯のMTには、移動特性に応じて適切なエリアを選択し、登録する手法が求められる。しかし、これまでにそのような手法は提案されていない。また、移動位置登録エリア形成機能を付加した基地局を道路や線路などの設備ごとに設置するとともに、交通状況に応じてエリア移動速度を変化させることも必要となる。移動エリアに登録しているMTを呼び出すためには、LRが移動エリアを追跡するか、あるいは呼び出しメッセージを道路全域に報知しなければならないという問題点もかかえている。

異なるアプローチとして、MTの移動履歴を利用する手法が提案されている⁵⁾。MTとLRは、過去に移動した位置登録エリアと時刻を移動履歴として記録する。MTは過去と同様の移動を行っている限りは位置登録を行わず、異なるエリアに移動したときのみ位置登録要求を送信する。MTが呼び出されると、LRはそのMTが滞在している可能性の高いエリアを計算し、呼び出しメッセージを送信する。この手法により、MTが過去と同様の移動をしている間は位置登録を抑制することができるが、いくつかの問題点もある。LRは全MTの移動履歴を管理しなければならないため、大きな記憶容量を必要とする。また、呼び出しが発生するたびにMTの呼び出しエリアを計算するため、LRに大きな計算負荷がかかることになる。

提案手法でも、移動位置登録エリアと履歴を用いる。しかし、基地局ではなくMTが移動位置登録エリアを形成するため、エリア移動速度の調整や移動エリアの追跡は不要となる。また、登録するLPの選択のみに履歴を用いるため、LRは履歴の管理や呼び出しエ

回線交換方式によって構築された移動網では、通信中端末の滞在セルを追跡することによって、端末が移動した場合でも通信経路を維持している。また、非通信中端末については追跡を行わない。これに対し、パケット交換方式では、基本的に端末の通信状態を判別することができないため、通信中と思われるすべての端末に対して定期的に呼び出しを行い、端末への経路を確立する。その結果、呼び出しトラフィックが増大する。

リアの計算を行う必要がない。

2.2 階層的な位置管理方式

文献 6) の 4.5 節では、ともに移動している MT をまとめて、階層的に管理する階層的な位置管理方式(以下、階層化方式)が提案されている。階層化方式ではともに移動している MT をまとめるために、移動ロケーションポインタ(以下、MLP、これに対し従来の固定ロケーションポインタを SLP で表す)を用いる。文献 6) では、移動ロケーションポインタに相当するノードを mobile router と呼んでいる。MLP と mobile router は、アーキテクチャの観点からは同じノードである。しかし、本論文では LR 負荷の軽減を目的として MLP を導入しているのに対し、文献 6) は移動ネットワークのサポートを主目的としている点が異なる。

位置管理を階層的に行う技術として、HLR-VLR⁷⁾(Visitors' Location Register)方式や Regional/Hierarchical Mobile IP^{8),9)}が提案されている。これらの技術は、LR や Foreign Agent などの有線網に設置される位置情報データベースを階層化し、位置管理を局所的に行うことを目的としている。これに対し、本論文で議論する階層化方式は、無線アクセス網に階層構造を導入している点が異なる。有線側階層化技術を用いることによって、位置管理負荷を分散することができるが、負荷の総量は変化しない。これに対し、本論文で提案する無線アクセス側の階層化方式は、位置登録の総数を削減することができる。また、有線網の構造から独立であるため、HLR-VLR 方式などの有線側階層化技術と組み合わせることが可能である。

図 1 を用いて階層化方式の概要を説明する。MLP1 および MT1, MT2 を持つユーザは、それぞれ同方向に走行している自動車に乗って移動している。ここで、MT1 と MT2 は MLP1 からエリア公告を受信し、LR の位置情報データベースに MLP1 を登録する。図 1(a) のデータベースを見ると、MT1 と MT2 が MLP1 のもとに滞在し、MLP1 が SLP1 のもとに滞在しているというように、MN が階層的に管理されている様子が分かる。本論文では、このような階層的な登録関係を図 2 に示すような木構造で表す。木の上下関係を親子で呼ぶ。たとえば、図 2 の MLP1 から見ると、SLP1 が親、MT1 と MT2 が子となる。このように、MN の位置を階層的に管理することによって、MT1 と MT2 は MLP1 からエリア公告を受信し続けるため、位置登録を行わない。位置情報の更新は MLP1 が代表して行う。このように、MN を階層的に管理することに

LR : Location Register
SLP : Stationary Location Pointer
MLP : Mobile Location Pointer
MT : Mobile Terminal

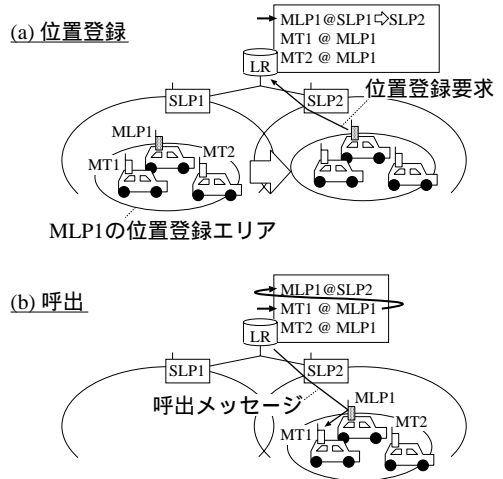


図 1 階層化位置管理方式
Fig. 1 Overview of hierarchical location management scheme.

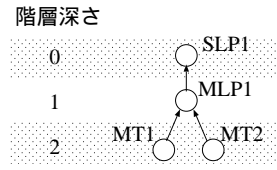


図 2 図 1(a) に示す階層構造を表す木
Fig. 2 Tree representing the registration relationship at the beginning of Fig. 1(a)

よって、位置登録数を大幅に削減することができる。ところが、文献 6) では階層化方式の枠組みのみが提案されており、階層構造の決定するためのグループ化手法は提案されていない。最も単純には、GPS や信号強度を利用して、位置の近い LP を登録する方法が考えられる。しかし、その LP が逆方向に移動していた場合、すぐに位置登録エリアから外れてしまうため、結果的に位置登録数を増加させることになる。位置登録を抑制し、LR 負荷を軽減するためには、図 3 に示すように移動方向や速度といった移動特性を考慮して登録する LP を選択する手法が必要となる。また、図 4(β) に示すように MLP 以下の部分木が大きくなるようにグループを形成することによって、位置登録の抑制効果をより高めることができる。次に、階層化方式における呼び出し方法を説明する。MN が呼び出されると、LR は位置情報データベースを検索し、その MN が登録している LP を取得する。

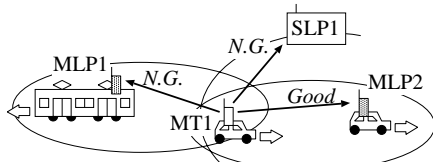


図 3 移動特性の識別: MT1 は移動特性の近い MLP2 を現在位置として登録

Fig. 3 MT1 chooses MLP2 as its new location area since it has similar movement.

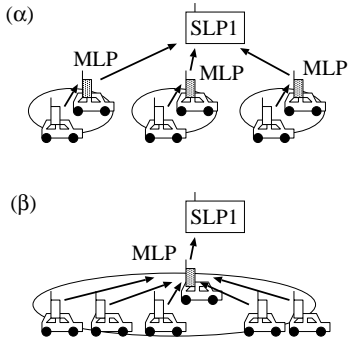


図 4 階層構造と位置登録抑制効果: (α) より (β) の方が位置登録抑制効果が高い

Fig. 4 Tree (α) eliminates few location updates while (β) eliminates many.

得られた LP が MLP であった場合には、SLP を得るまで繰り返し検索を行う。LR は、呼び出しメッセージを SLP から順に木を下るように送信し、MN に届ける。図 1 (b) に MT1 の呼び出し例を示す。LR はデータベースを続けて 2 回検索し、MLP1 と SLP1 を得る。呼び出しメッセージは SLP1 から MLP1 を経由し、MT1 へと届けられる。階層化方式において、LR が呼び出しを処理するときに行うデータベース検索回数は、木の根 (SLP) から呼び出しを受けた MN までのパス長 (SLP-MN 間の枝数) と等しくなる。階層化方式では位置登録が抑制される一方、呼び出し時のデータベース検索回数は増加することとなる。よって、LR の負荷を軽減するためには、位置登録頻度の高い高速移動ノードのみを階層的に管理すべきであり、位置登録を行わない静止ノードを階層化して呼び出し負荷を増大させることは避けるべきである。

3. 移動特性に基づくグループ形成手法

提案手法では、位置登録と呼び出しを「負荷」と考え、この負荷が小さくなるように移動特性の近い MN をグループ化する。本章では、MN が LR 負荷を推定する手法について説明する。提案手法の概要は次のとおりである。MN は登録している LP からエリア公告

を受信できなくなると、位置登録エリアから外れたと判断し、次に登録する LP の選択を行う。MN は周囲の各 LP を登録した場合の登録寿命を予測し、LR にかかる負荷を推定し、負荷が最小となる LP を登録する。このとき、位置登録エリアに滞在している時間を記録した「エリア滞在履歴」を用いて移動特性を推定し、登録寿命の予測を行う。移動特性の近い LP を登録した場合ほど登録寿命も長くなるため、推定される LR 負荷も小さくなる。各 MN が同様の手法によって LP を登録することにより、移動特性の近い MN からなるグループが、自律分散的に形成される。

以下、3.1、3.2 節では、LP 選択に用いる LR 負荷の推定方法について説明し、3.3 節では、エリア滞在履歴を用いて移動特性を推定するヒューリスティックについて述べる。3.4 節では、登録対象とする LP について考察を行う。

3.1 現行方式における負荷推定

まず、階層化を行わない現行方式における LR 負荷について考える。一般に、位置管理に関する処理は、位置登録と呼び出しからなる^{10)~12)}。本論文でも、位置登録および呼び出しの合計処理負荷によってシステム効率を評価する。以降、単に LR 負荷と述べるときには、この合計負荷を指すものとする。

時間 Δt に発生した位置登録と呼び出しを処理するために LR にかかる負荷は、次式で表される。

$$C(\Delta t) = \sum_{i=1}^N \left\{ C_u E[u_i(\Delta t)] + C_p E[p_i(\Delta t)] \right\}. \quad (1)$$

ここで、 N は移動網全体における MN 数、 C_u は位置登録 1 回あたりの処理負荷、 C_p は呼び出し 1 回あたりの処理負荷、 $E[u_n(\Delta t)]$ は時間 Δt に MT_n が行う位置登録数の期待値、 $E[p_n(\Delta t)]$ は時間 Δt に MT_n が受ける呼び出し数の期待値である。 $E[p_n(\Delta t)]$ は、各 MN が着信履歴から推定するとする。 $E[u_n(\Delta t)]$ の推定方法は 3.3 節で述べる。

式 (1) で表される負荷 $C(\Delta t)$ のうち、 MT_n が位置登録を行い、登録先を更新することによって変化するのは、 $i = n$ の項のみである。 MT_n が LP_p を登録した場合の負荷の変化分を $\Delta C_{n,p}(\Delta t)$ とし、次式で表す。

$$\Delta C_{n,p}(\Delta t) = C_u E[u_n(\Delta t)] + C_p E[p_n(\Delta t)]. \quad (2)$$

現行方式では、各 MT が式 (2) を用いて負荷を最小とする LP を登録することによって、全体の負荷を小さくすることができる。

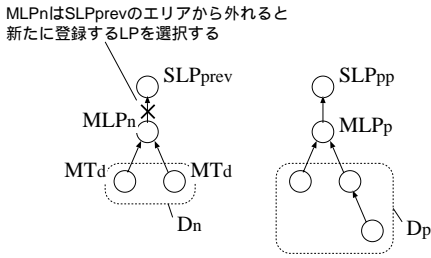


図5 3.2～3.3節で想定する状況
Fig. 5 Situation in Section 3.2 to Section 3.3.

3.2 階層化方式における負荷推定

次に、階層化方式における位置管理負荷について考察を行う。現行方式と異なり、階層化方式では、あるMNが登録先を変更することによって、他のMNを管理するための負荷が増減する。たとえば、MLPが階層を深くするように登録先を変更した場合、そのMLPを呼び出す際のLR負荷（データベース検索回数）が増大するだけでなく、その子孫を呼び出す際のLR負荷も増大する。本節では、これらの影響を考慮し、現行方式について得た負荷推定式(2)をもとに階層化方式における負荷推定式を求める。

本節から3.4節にかけて行う議論では、図5を用いる。図5は、 MLP_n が SLP_{prev} の位置登録エリアから外れ、次に登録するLPを選択しようとしている状況を示している。図中、 D_n 、 D_p はそれぞれ MLP_n 、 MLP_p の子孫集合であり、 SLP_{pp} は MLP_p の親である。 MLP_n はいくつかのLPからエリア公告を受信しており、それぞれを登録した場合のLR負荷を推定し、負荷が最小となるLPを登録する。ここでは、エリア公告を受信しているLPの1つである MLP_p を登録する場合の負荷を推定する方法を例にとって説明を行う。

まず、説明のためにいくつか用語の定義を行う。登録関係を表す木において、MNとSLPのパスに位置するLPの集合を、そのMNの「先祖」と定義し、パス長を l とする。たとえば、図5に示す MT_d の先祖は MLP_n および SLP_{prev} であり、 MT_d から SLP_{prev} までのパス長は $l=2$ となる。

2.2節で説明したように、階層化方式においてMNが呼び出されると、LRは位置情報データベースから呼び出しを受けたMNの先祖を検索し、得られた先祖を経由して呼び出しメッセージを送信する。つまり、階層化方式では、呼び出し処理にかかるLR負荷は呼び出しを受けたMNの先祖数（SLPまでのパス長）に依存する。階層が深いMNを呼び出すときほど、LRに大きな負荷がかかることになる。また、MLPが行

う位置登録によって、そのMLPからSLPまでのパス長が増加した場合、そのMLPを呼び出すためのLR負荷が増加するだけでなく、MLPの子孫の呼び出し負荷も増加することとなる。この呼び出し負荷増加分を追加し、式(2)を変形する。

$$\begin{aligned} \Delta C_{n,p}(\Delta t) &= CuE[u_n(\Delta t)] + Cp(l_n)E[p_n(\Delta t)] \\ &\quad + \sum_{d=1}^{|D_n|} \Delta CpE[p_d(\Delta t)], \quad (3) \\ \therefore \Delta Cp &= Cp(l_d^{new}) - Cp(l_d^{prev}). \end{aligned}$$

式(3)に示すように、呼び出し1回あたりの処理負荷 Cp をSLPまでのパス長 l の関数とする。具体的な関数形は6.1節で与える。第3項は MLP_n の登録先変更にもなう子孫 D_n への呼び出し負荷変分を表す。 $|D_n|$ は集合 D_n の要素数を表す。

次に、階層化方式における位置登録負荷に注目する。MLPが登録しているLPは、そのMLPの呼び出し時だけでなく、子孫の呼び出し時にも参照される。つまり、MLPが、登録しているLPを変更すると、その子孫の位置情報も変更されるということである。これを受けて、MLPの位置登録処理にかかるLR負荷を、そのMLPと子孫で分配する。

$$\begin{aligned} \Delta C_{n,p}(\Delta t) &= \frac{1}{1 + |D_n|} CuE[u_n(\Delta t)] \\ &\quad + \frac{1 + |D_n|}{1 + |D_p| + 1 + |D_n|} CuE[u_p(\Delta t)] \\ &\quad + Cp(l_n)E[p_n(\Delta t)] \\ &\quad + \sum_{d=1}^{|D_n|} \Delta CpE[p_d(\Delta t)]. \quad (4) \end{aligned}$$

第1項では、 MLP_n が位置登録を行ったときのLR負荷を MLP_n とその子孫で分配している。また、第2項では、 MLP_p が位置登録を行ったときのLR負荷を MLP_p とその子孫（ D_p および D_n 、 MLP_n ）で分配している。

式(4)から分かるように、子孫が多いMLPほど第1項が小さく、登録されやすくなる。よって、図4(β)に示すように、大きなグループを形成することができ、高い位置登録抑制効果を得ることができる。

3.3 エリア滞在履歴を用いた位置登録回数の推定

本節では人の移動特性について考察を行い、位置登録数の期待値 $E[u]$ の推定方法を説明する。

人の移動傾向を観察すると、人が社会性を持つ生き物であること、移動に用いることができる交通手段が限られていることなどの理由から、同じ目的地に向かって同じ経路で移動していることが多いことに気づく。通勤ラッシュや行楽地の混雑はその例である。つ

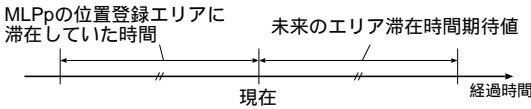


図 6 エリア滞在時間についての仮定

Fig. 6 Estimation of future stay period in location area.

まり、人の移動には強い相関が見られ、ある時点までともに移動していた人とはその先もしばらく同伴する可能性が高いということが出来る。MLP_n が MLP_p からエリア公告を継続的に受信している時間を $\tau_{n,p}$ とする。そして、MLP_n は、現在から $\tau_{n,p}$ の間にわたって、1/2 の確率で同一エリアに滞在し続けると仮定する (図 6)。

次に、MLP_n が $\tau_{n,p}$ 間に行う位置登録回数について考える。MLP_n は SLP_{prev} の位置登録エリアから外れると、次に登録する LP の選択を行う。ここで、たとえば、MLP_p を選択し、登録したとする。MLP_n は、その後 $\tau_{n,p}$ 間に 1/2 の確率で MLP_p の位置登録エリアから外れ、再度位置登録を行う。このように、現在から $\tau_{n,p}$ の間に行われる位置登録数の期待値 $E[u_n(\tau_{n,p})]$ は、つねに $1 + 1/2$ となる。MN は、エリア公告を受信している各 LP について τ を管理し、位置登録数期待値 $E[u_n(\tau)]$ の推定に用いる。この τ のリストを、エリア滞在履歴と呼ぶ。各登録候補についての負荷変分 ΔC を比較するために、式 (4) を正規化した式を次に示す。

$$\begin{aligned} \Delta C(1) = & \frac{1}{1 + |D_n|} Cu \left\{ 1 + \frac{1}{2} \right\} \frac{1}{\tau_{n,p}} \\ & + \frac{1 + |D_n|}{1 + |D_p| + 1 + |D_n|} Cu \frac{1}{2} \frac{1}{\tau_{p,pp}} \\ & + Cp(l_n) E[p_n(1)] \\ & + \sum_{d=1}^{|D_n|} \Delta Cp E[p_d(1)]. \end{aligned} \quad (5)$$

移動特性の近い LP ほど τ が大きく推定負荷変分 ΔC は小さくなるため、登録される可能性が高い。つまり、MN は式 (5) を用いて LR 負荷を推定することによって、移動特性の近い LP を登録することとなる。その結果、登録抑制効果や呼び出し負荷を考慮しながら、移動特性の近い MN をグループ化することができる。

ところで、MN が SLP の位置登録エリアに移動した直後は、その SLP に対する τ はゼロに近い小さい値となっている。このため、歩行者の持つ MN が、SLP ではなく、偶然近くを通りかかった自動車に乗っている MLP を登録してしまうようなことが起こりうる。しかし、この場合、自動車はすぐに走り去り、MN は

その MLP のエリアから外れてしまう。すると、再び位置登録が行われ、結局は LR 負荷が増大する。このような現象は、MN が SLP の移動特性を正しく推定できていないために起こる。そこで、すべての SLP は等しい移動特性を持っている (静止している) ことに注目し、前の SLP に対する τ の半値を、次の SLP に対する τ に加算する。

本節で提案した推定方法は、LRU (Least Recently Used) に代表されるキャッシュ置き換えアルゴリズムなど同様の考え方によるヒューリスティックに基づいている。提案ヒューリスティックの妥当性は、6 章のシミュレーションによって検証する。

3.4 登録候補選別手法

ここでは、登録対象とする LP について考察を行う。まず、ある MN がエリア公告を受信している LP の集合を、その MN にとっての登録候補と定義する。階層化方式において導入された MLP は、登録を受ける立場にも登録を行う立場にもなる。そのため、親が子孫を登録し、登録関係を表す木にループができてしまうことがある。この場合、LR は木の根となる SLP を検索することができず、ループ中の MLP とその子孫を呼び出すことができなくなる。このような状況を避けるため、MLP は自分の子孫を登録候補から外さなければならない。MLP_n がエリア公告を受信している LP の集合を A_n とし、MLP_n にとって有効な登録候補集合を $V_n = A_n - (A_n \cap D_n)$ とする。

また、MN は MLP を登録した場合の LR 負荷を推定する際に、相手が自分を登録した場合の LR 負荷についても推定を行う。図 5 の例では、MLP_n は負荷変分 $\Delta C_{n,p}$ を推定する際に、登録候補 MLP_p $\in V_n$ が MLP_n を登録した場合の負荷変分 $\Delta C_{p,n}$ についても推定を行う。ここで、 $\Delta C_{p,n} < \Delta C_{n,p}$ が成り立つ場合は、MLP_p が MLP_n を登録した方が LR 負荷は小さくなる。MLP_n は MLP_p が MLP_n を登録する機会を奪わないように、MLP_p を有効な登録候補集合 V_n から外す。最終的に、MLP_n の有効な登録候補集合 V_n は次式で表される。

$$V_n = A_n - (A_n \cap D_n) - B_n, \quad (6)$$

$$\text{ここで } B_n = \{p | \Delta C_{p,n} < \Delta C_{n,p}\}.$$

4. MLP への動的移行手法

MN が密集して存在しているときには、無線帯域を有効利用するために、全 MN に占める MLP の割合を減らし、エリア公告報知量を削減することが望ましい。移動特性の近い MN の集団に、過不足なく 1 つの MLP が存在するような状況をつくることができれば、

LR 負荷を軽減しながらエリア公告報知量を低く保つことができる。本章では、MT が周囲のロケーションポイントを観測し、必要に応じて MLP に移行することで、MLP の割合を適切に保つ手法について考える。

まず、 MT_m と MT_n が一緒に高速移動している状況を考える。両者は MT であるため、エリア公告を報知しておらず、また子も持っていない。ここで、 MT_m が SLP を登録した場合の負荷変分 $\Delta C_{m,SLP}$ は、式 (5) より次のように推定される。

$$\begin{aligned} \Delta C_{m,SLP}(1) &= Cu \left\{ 1 + \frac{1}{2} \right\} \frac{1}{\tau_{m,SLP}} \\ &\quad + \frac{1}{1 + |D_{SLP}| + 1} Cu E[u_{SLP}(1)] \\ &\quad + Cp(l_m) E[p_m(1)] \\ &= Cu \left\{ 1 + \frac{1}{2} \right\} \frac{1}{\tau_{m,SLP}} \\ &\quad + Cp(1) E[p_m(1)]. \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、SLP は位置登録を行わないため、 $E[u_{SLP}(1)] = 0$ とした。

次に、 MT_n が MLP となり、 MT_m からの登録を受け付ける場合を考える。 MT_m が MLP_n を登録した場合の負荷変分 $\Delta C_{m,n}$ は、式 (5) より次のように推定される。

$$\begin{aligned} \Delta C_{m,n}(1) &= Cu E[u_m(1)] \\ &\quad + \frac{1}{1+1} Cu \frac{1}{2} \frac{1}{\tau_{n,SLP}} \\ &\quad + Cp(l_m) E[p_m(1)] \\ &\simeq \frac{1}{1+1} Cu \frac{1}{2} \frac{1}{\tau_{n,SLP}} \\ &\quad + Cp(2) E[p_m(1)]. \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 MLP_n と MT_m は一緒に高速移動しているとの仮定より、 $\tau_{m,n} \gg \tau_{n,SLP}$ とした。

式 (7) より式 (8) の方が小さくなる際には、 MT_n が MLP になることによって、位置管理負荷を軽減することができる。この不等式を次のように簡略化する。

$$\begin{aligned} \Delta C_{m,n}(1) &< \Delta C_{m,SLP}(1) \\ \tau_{n,SLP} &> \frac{5}{4} \frac{Cu}{Cp(2) - Cp(1)} \frac{1}{E[p_m(1)]}. \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 MT_n と MT_m は一緒に移動しているとの仮定より、 $\tau_{n,SLP} \simeq \tau_{m,SLP}$ とした。 MT_n が $E[p_m(1)]$ を得ることができないときには、一般的な呼び出し確率あるいは $E[p_n(1)]$ で代用する。不等式 (9) が満たされるのは、直観的には、SLP を登録し続けた場合の登録頻度が呼び出し頻度より高くなる時、つまり高速移動しているときである。 MT_n は、不等式 (9) が満たされると MLP になり、エリア公告の報知を開始する。また、不等式 (9) が満たされなくなり、かつ、子が

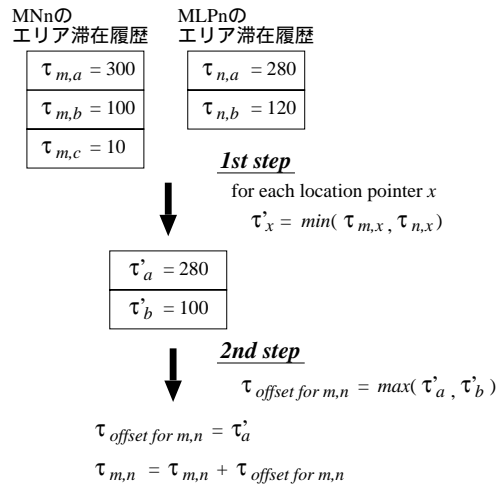


図 7 エリア滞在履歴を用いた τ の補正例

Fig. 7 An example of the correction of τ when a mobile becomes a mobile location pointer.

いない場合には、エリア公告の報知を終了し、MT に戻る。しかし、子を持っている場合は MT に戻らないため、MLP と MT の間で状態が振動し、周囲の MN が頻繁に登録先を変更するようなことにはならない。

不等式 (9) を満たし、 MT_n が公告の報知を開始した直後は、 MLP_n と MT_m が過去に移動をともにした時間にかかわらず、 $\tau_{m,n} = 0$ である。そこで、両者のエリア滞在履歴を比較し、履歴中の共通する LP から過去に移動をともにした時間を推定して、 $\tau_{m,n}$ を補正する。図 7 を用いて、本補正アルゴリズムを説明する。 MLP_n は、MLP になって最初に報知する公告にエリア滞在履歴を添付する。 MT_m は MLP_n からエリア滞在履歴が添付された公告を受信すると、両者の履歴を比較し、各 LP に対し小さい方の τ を τ' として残す (図 7, 1st step)。次に、 MT_m は τ' の中で最大の値を補正值 (過去に移動をともにした時間) として元の $\tau_{m,n}$ に加算し、補正された $\tau_{m,n}$ として用いる (図 7, 2nd step)。

5. 提案手法の方式化

本章では、3 章で示したグループ形成手法に基づく位置登録および呼び出し方式を説明する。また、MN に要求される機能を減らし、階層化方式の導入を容易にする方法についても述べる。

5.1 エリア公告

LP は負荷変分 ΔC の計算に必要な情報をエリア公告に記載し、位置登録エリアに滞在している MN に報知する。 MLP_n が報知するエリア公告には以下の情報が記載される。

- エリア識別子 (MLP_n の識別子を用いてもよい),
- エリア公告有効期限,
- 登録関係を表す木における, 根 (SLP) から MLP_n までのパス長 l_n ,
- MLP_n の先祖一覧,
- MLP_n の子孫数,
- MLP_n の子孫の合計呼び出し頻度 $\sum_d^{D_n} E[p_d]$ (d は MLP_n の子孫),
- MLP_n のエリア滞在時間期待値 $\tau_{n,p}$ (p は MLP_n の親).

子孫の合計呼び出し頻度 $\sum_d^{D_n} E[p_d]$ は式 (5) 第 4 項の計算に用いる. 6.1 節で述べるように, 負荷変分 ΔC を実際に計算するときには $C_p(l) = l$ とするため, $\sum_d^{D_n} \Delta C_p E[p_d] = \Delta C_p \sum_d^{D_n} E[p_d]$ となる.

SLP_n のエリア公告には以下の情報が記載される.

- エリア識別子 (SLP_n の識別子を用いてもよい),
- エリア公告有効期限,
- 登録関係を表す木におけるパス長 ($l_{SLP} = 0$).

SLP は位置登録を行わないため, SLP のエリア滞在時間 $\tau_{SLP,x}$ は無限大として負荷変分 ΔC を計算する.

MLP は定期的にエリア公告を報知するほかに, 登録を行った直後および受け付けた直後 (つまり, 公告記載情報が変化したとき) にも報知を行う. また, エリア公告が連続して衝突することを避けるため, 報知間隔を毎回少しだけ変化させる. MLP は電池を節約するために, SLP に比べ公告の有効期限を長くし, 報知間隔を長くしてもかまわない.

5.2 位置登録

MN は, 登録している LP のエリア公告有効期限内に次のエリア公告を受信できなかった場合, その LP の位置登録エリアから外れたと判断し, 次に登録する LP の選択を行う. MN は, 式 (6) に示す有効な登録候補を登録した場合について LR 負荷を推定し, 推定負荷が最小となる LP を選択する. エリア滞在時間期待値 $\tau_{i,j}$ が得られないときは, $\tau_{j,i}$ で代用する. MN は登録する LP を決定すると, その LP に位置登録要求を送信する. 位置登録要求には, 登録を行う MN の識別子と子孫の合計呼び出し頻度 $\sum_d^D E[p_d]$ (MT の場合は自分の呼び出し頻度 $E[p(1)]$) を記載する. 位置登録要求を受信した LP は, 登録要求に記載されている合計呼び出し頻度を, 自分の子孫合計呼び出し頻度に加え, 上位階層 LP あるいは LR に登録要求を転送する.

5.3 呼び出し

MN が呼び出されると, LR は位置情報データベースを検索し, 呼び出された MN が登録している LP を取得する. 得られた LP が MLP であった場合には, SLP を得るまで繰り返し検索を行う. LR は, この検索過程で得られた SLP および MLP を, 検索した順に呼び出しメッセージに記載し, SLP に送信する. 呼び出しメッセージは検索とは逆順に LP を転送され, MN に届けられる.

MLP がエリア公告の報知間隔を長めにとっている場合には, エリア公告有効期限も長くなるため, 呼び出された MN がその MLP のエリアから外れている可能性がある. そのため, 報知間隔を延ばしている MLP は, エリア公告報知範囲 (位置登録エリア) よりもやや広い範囲に呼び出しメッセージを報知する.

5.4 階層化方式の段階的導入について

提案方式は MN が相互に直接通信できることを仮定している. このことは, 提案方式の普及を遅らせる原因となる可能性がある. 本節では, MN に必要な機能を減らし, 階層化方式を段階的に導入する方法をいくつか述べる.

MN が無線リンクを用いて相互に通信することが難しい場合, 位置登録要求や呼び出しメッセージを SLP 経由で送受信する方法が考えられる. しかし, この方法では, MLP が形成する位置登録エリアの一部が SLP の位置登録エリアから外れているときに, 呼損が生じることがある. そこで, MLP を登録している MN を呼び出す場合, SLP は位置登録エリアより広い範囲に呼び出しメッセージを報知し, 呼損を防ぐことができる.

また, 電車やバスのように多くの乗客を乗せて移動する公共交通手段においては, 乗物に MLP 専用ノードを設置し, 車内の MT をまとめてグループ化することができる. 車内の MT は, 電車に設置された MLP のみと通信すればよい. また, 多くの MT をまとめてグループ化できるため, 非常に大きな負荷軽減効果が期待できる.

自動車に乗って移動している MN については, ITS で用いられる狭域無線通信 (Dedicated Short Range Communication) を利用して相互に通信する方法が考えられる. 提案手法を用いることによって, まとまって移動している MN 数を取得することができ, ITS に対し渋滞情報などを提供することができる.

MN はパス長が 0 である LP を SLP と見なす.

6. シミュレーションによる負荷軽減効果の検証

6.1 シミュレーションシナリオ

シミュレーションによって提案方式と現行方式を比較し、提案方式の負荷軽減効果を検証した。

まず、シミュレーションで測定するパラメータについて説明する。本論文では、LR が行う位置情報データベース検索回数を LR 負荷の評価尺度として用いる。データベース検索回数は、LR の計算負荷を表すのみでなく、位置登録要求数および呼び出しメッセージ数とも関連があるため、パケット処理負荷も反映している。このため、LR 負荷を評価するためのパラメータとして適していると考え、位置登録処理時には、LR は登録要求を送信した MN のエントリのみを検索するため、位置登録 1 回あたりの処理負荷は $C_u = 1$ となる。呼び出し時には、呼び出された MN までのパス長に等しい回数データベースを検索するため、呼び出し 1 回あたりの処理負荷は $C_p(l) = l$ となる。

グループ形成にともなう通信オーバーヘッドについても測定を行う。階層化方式では、SLP だけでなく MLP もエリア公告を報知する。この通信オーバーヘッドを評価するために、SLP および MLP が報知したエリア公告トラフィックの平均値を算出し、比較を行った。

続いて、シミュレーション条件について述べる。SLP の位置登録エリアは直径 4.1 km の円とする。実際の移動網では位置登録のバタツキを抑えるために、位置登録エリアは重複するように配置される。本評価でも、図 8 に示すように SLP の位置登録エリアがやや重複するように配置した。MLP の位置登録エリアは半径 300 m の円とした。SLP のエリア公告報知間隔は 1 秒、MLP は 10 秒とする。エリア公告パケットの大きさは、Mobile IP⁶⁾ の agent advertisement に提案手法によって必要となったフィールドを追加した値を用いた。SLP のエリア公告は 50 バイト、MLP は $56 + 4 \times l$ バイトとなる（どちらも IP ヘッダを含む）。MLP が報知する最初のエリア公告には、エリア滞在履歴が添付される。各 MN は一様乱数によって 30 分に 1 回の割合で呼び出されると仮定した。

上記の条件のもとで、以下の 3 種類のシナリオについてシミュレーションを行った。シミュレーション時間はそれぞれ 5,000 秒とした。

● シナリオ A：高速道路 1

図 9 のような全長 25 km の環状高速道路を 1,000 台の自動車が行く状況を想定する。自動車は MN を 1 台ずつ乗せている。実際に階層化方式

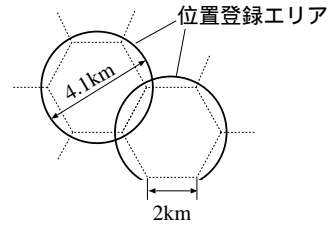


図 8 SLP の位置登録エリア

Fig. 8 Location areas of stationary location pointers.

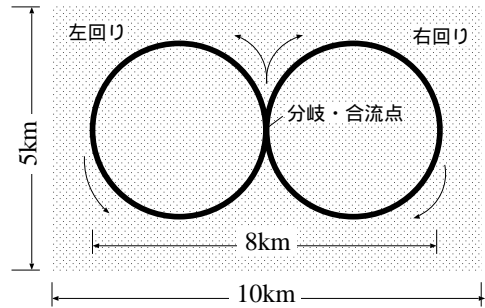


図 9 シナリオ A, B で想定する環状道路

Fig. 9 Road in situations A and B.

を導入することを考えると、MN をまとめ続けることが難しい状況がある。たとえば、道路が分岐している状況や、自動車によって速度が異なる状況などである。シミュレーションでは、道路に分岐・合流点を設け、さらに車速をランダムに変化させることで、そのような状況を再現し、現実に近い条件を設定した。自動車は、分岐・合流点にくと 1/2 の確率で左右どちらかの道路に進む。また、 $N(90, 5^2)$ の正規分布（平均 90 km/h、標準偏差 5 km/h）に従って、車速をランダムに変化させる。このシナリオでは、95.4% の車が 80 ~ 100 km/h の速度で走行する。

● シナリオ B：高速道路 2

図 9 の環状高速道路を 500 台の自動車が行く状況を想定する。シナリオ A に比べて空いている道路を想定している。車速分布は、 $N(100, 10^2)$ の正規分布に従う。95.4% が 80 ~ 120 km/h の速度で走行する。他の条件はシナリオ A に同じとする。

● シナリオ C：繁華街

一辺 5 km の正方形の領域を 1,000 台の MN がランダムに移動する、繁華街のような状況を想定する。MN は速度と目的地をランダムに決定し、目的地に到着するとランダムに定めた時間だけ静止する。その後、再び速度と目的地を決定し、移動を再開する。移動速度は 2 ~ 4 km/h の範囲で発生

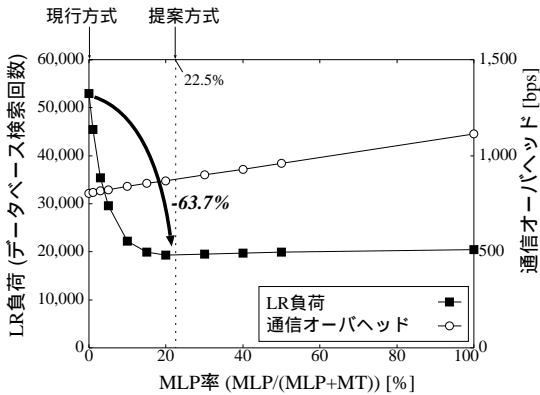


図 10 LR 負荷と通信オーバーヘッド (シナリオ A)

Fig. 10 LR load and communication overhead in scenario A.

させた一様乱数により決定し、停止時間は 0~30 分の範囲で発生させた一様乱数により決定する。

6.2 位置管理負荷軽減効果

まず、4 章で提案した MLP への動的移行手法を用いず、全 MN に対する MLP の割合を固定してシミュレーションを行った。次に、MT と MLP の役割を動的に移行させて MLP の割合を測定した。図 10、図 11 および図 12 に、MLP の割合に対する LR 負荷および通信オーバーヘッドを示す。MLP の割合が 0% である状況は、現行方式にあたる。移行手法を用いた場合の MLP 割合平均値をグラフ上部に示す。

図 10、図 11 に示すように、高速道路を想定したシナリオ A、B では、提案方式によって LR 負荷をそれぞれ 63.7%、58.7% 軽減することができた。これは、MN を移動特性に応じてグループ化することによって、位置登録の発生を抑制できていることを表している。一方、シナリオ C のように MN がゆっくり移動している状況では、位置登録の処理負荷より呼び出し処理負荷の方が大きくなるため、MN を階層的に管理するとかえって負荷が増大する。このような状況では、MN は現行方式と同様に SLP を登録し、階層を浅く保って、呼び出し負荷の増大を避ける。図 12 において、MLP の有無にかかわらず LR 負荷が一定となっているのはこのためである。各シナリオの結果より、提案方式は状況に応じて適切な振舞いを示すことが分かる。

次に、4 章で提案した移行手法によって MLP の割合

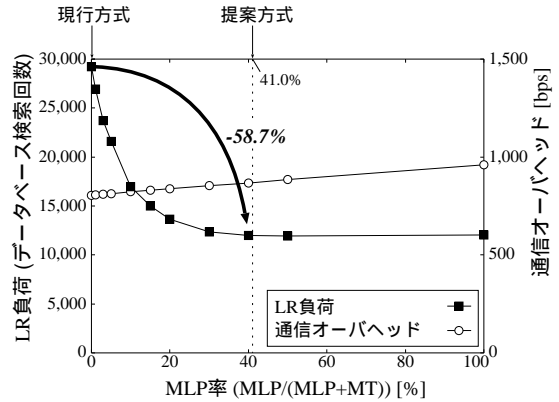


図 11 LR 負荷と通信オーバーヘッド (シナリオ B)

Fig. 11 LR load and communication overhead in scenario B.

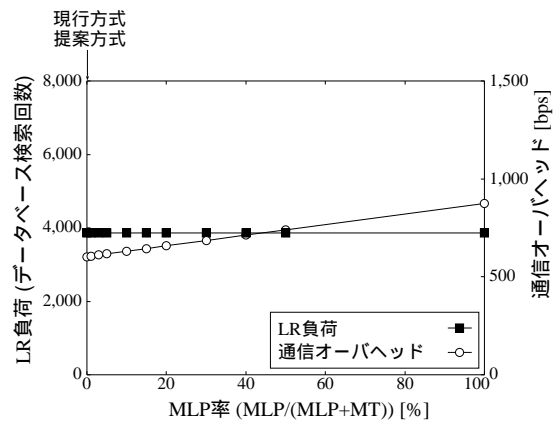


図 12 LR 負荷と通信オーバーヘッド (シナリオ C)

Fig. 12 LR load and communication overhead in scenario C.

が適切に制御されていることを確認する。各グラフより、MLP の割合は、LR 負荷が十分軽減されている範囲で通信オーバーヘッドを最小とする値に保たれていることが分かる。また、現行方式に比した通信オーバーヘッドの増加は、各シナリオでそれぞれ 67 bps、64 bps、0 bps と非常に小さい。実際には、また、シナリオ A や B のように移動している MN に比べて家やオフィスで静止している MN が圧倒的に多いことを考慮すると、MLP のエリア公告報知による無線帯域への影響は、実際にはさらに小さいと考えられる。

7. おわりに

本論文では、移動端末が移動特性に近いロケーションポイントを登録することで移動特性に応じたグループを形成し、位置管理を階層的に行うアルゴリズムを提案した。また、移動端末が周囲のロケーションポイ

MLP 割合が同じであっても、移行手法の有無によってシミュレーション結果は多少異なる。しかし、その差は LR 負荷、通信オーバーヘッドともに 0.5% 未満であったため、グラフには移行手法を用いなかった場合の結果のみを示す。

ンタを観測し、必要に応じて移動ロケーションポイントに移行して他の移動端末をまとめることで、エリア公告報知量の増加を抑えるアルゴリズムについても提案を行った。いくつかの状況を想定したシミュレーションを行い、大きな位置管理負荷軽減効果が得られることを検証するとともに、階層化にともなう通信オーバーヘッドが小さいことを示した。今後は、現実の道路や市街地など、より現実的な状況に対応できるようにアルゴリズムを拡張する予定である。

参 考 文 献

- 1) FOMA. <http://foma.nttdocomo.co.jp/>
- 2) Third Generation Partnership Project. <http://www.3gpp.org/>
- 3) Radio Interface Protocol Architecture (Release 4), *3GPP TS 25.301 V4.2.0* (Dec. 2001).
- 4) Bejerano, Y. and Cidon, I.: Efficient Location Management Based on Moving Location Areas, *Proc. IEEE Infocom 2001*, Vol.1, pp.3-12 (2001).
- 5) Wu, H.-K., Jin, M.-H. and Horng, J.-T.: Personal Paging Area Design Based on Mobile's Moving Behaviors, *Proc. IEEE Infocom 2001*, Vol.1, pp.21-30 (2001).
- 6) Perkins, C.: IP Mobility Support for IPv4, *IETF RFC3344* (Aug. 2002).
- 7) TIA/EIA IS/41 (Revision C), Cellular Radiotelecommunications Intersystem Operations (1995).
- 8) Gustafsson, E., Jonsson, A. and Perkins, C.E.: Mobile IPv4 Regional Registration, *Internet Draft, work in progress* (Mar. 2002).
- 9) Soliman, H., Castelluccia, C., El-Malki, K. and Bellier, L.: Hierarchical MIPv6 mobility management (HMIPv6), *Internet Draft, work in progress* (Jul. 2002).
- 10) Jain, R., Lin, Y.-B., Lo, C. and Mohan, S.: A Forwarding Strategy to Reduce Network Impacts of PCS, *Proc. IEEE Infocom 1995*, Vol.1, pp.481-489 (1995).
- 11) Wan, G. and Lin, E.: A Dynamic Paging Scheme for Wireless Communication System, *Proc. ACM/IEEE Mobicom 1997*, pp.195-203 (1997).
- 12) Sue, K.-L. and Tseng, C.-C.: One-Step Pointer Forwarding Strategy for Location Tracking in Distributed HLR Environment, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.15, No.8 (Oct. 1997).

(平成 14 年 3 月 20 日受付)

(平成 14 年 10 月 7 日採録)



井上 武

NTT 未来ねっと研究所社員，平成 12 年入社．主に移動通信における位置管理の研究に従事．平成 10 年京都大学工学部物理工学科卒業．平成 12 年同大学院工学研究科修士課程修了．電子情報通信学会会員．



高橋 紀之(正会員)

NTT 未来ねっと研究所主任研究員，平成 4 年入社．主に，LSI 試験容易化手法，インターネットにおける経路制御技術，アクティブネットワーク技術の研究開発に従事．平成 2 年京都大学工学部情報工学科卒業．平成 4 年同大学院工学研究科修士課程修了．電子情報通信学会会員．



宮崎 敏明(正会員)

NTT 未来ねっと研究所主幹研究員，昭和 58 年入社．主に LSI 設計用 CAD，通信用 FPGA およびその応用技術の研究に従事．現在，適応型ネットワーク制御技術の研究に従事．昭和 56 年電気通信大学電気通信学部応用電子工学科卒業．昭和 58 年同大学院電気通信学研究科応用電子工学専攻修士課程修了．平成 6 年工学博士(東京工業大学)．電子情報通信学会，IEEE 会員．