

Mobile IP における位置情報を用いた 低レイテンシなハンド オフ方式

萬代 雅希[†] 笹瀬 巖[†]

有線および無線チャネルのオーバーヘッドをほとんど増大させることなく低ハンドオフレイテンシを実現する移動端末の位置情報を用いたハンドオフ方式を提案する。提案方式では、有線チャネルの負荷を低減するために、移動元フォーリンエージェント (FA) がハンドオフを検出した場合、移動端末 (MN) および周辺 FA の位置情報を用いて移動先 FA を推定し、移動先 FA を限定してパケットを複製して転送する。また、ハンドオフレイテンシ特性を改善するために、移動先 FA が Agent Advertisement (ADV) 間隔を短縮することで、MN が自セル内に入ったことを認識するまでにかかる時間を短縮する。さらに、無線チャネルのオーバーヘッドの増大を抑えるために、実際の移動先ではなかったすべての推定移動先 FA での ADV 送信間隔の短縮を解除する機能を付加する。理論解析および計算機シミュレーションを用いて提案方式のハンドオフレイテンシおよびオーバーヘッド特性について評価し、提案方式は有線および無線チャネルにおけるオーバーヘッドをほとんど増大させることなく低ハンドオフレイテンシを実現できることを示す。

A Low Latency Handoff Scheme Using Positional Information for Mobile IP

MASAKI BANDAI[†] and IWAO SASASE[†]

In order to realize low handoff latency without increasing overhead, we propose a handoff scheme using positional information for Mobile IP based networks. In the proposed scheme, to reduce overhead in wired channel, when a foreign agent (FA) detect a handoff, old FA estimates the next FA by using the positional information of mobile node (MN) and neighbor FAs. The old FA copies and forwards packets to the estimated next FA. In addition, to shorten handoff latency, old FA informs a handoff to the estimated next FA, and the estimated next FAs shorten its Agent Advertisement (ADV) message interval. Moreover, to alleviate overhead in wireless channel, old FA informs to all neighbor FAs except the actual next FA that the estimation is failed. The informed FAs cancel to shorten ADV message transmission interval. By performance evaluation using theoretical analysis and computer simulations, we show that the proposed scheme can realize low handoff latency without increasing overhead in both wired and wireless channel.

1. はじめに

Mobile Internet Protocol (Mobile IP) は、移動端末が接続されるネットワークアドレスが変わっても IP による通信が継続可能な仕組みを目指して、IETF (Internet Engineering Task Force) で標準化が進められている^{1)~2)}。Mobile IP において、移動端末 (MN) の移動によりフォーリンエージェント (FA) が切り替わるハンドオフ期間中のパケット損失が問題になり、ハンドオフレイテンシを短縮することでパケット損失の低減を目指した研究がさかに行われている^{3)~6)}。FMIP (Fast handovers for Mobile IP) は、レイヤ 2

(L2) でハンドオフを検出し、ハンドオフ期間中に移動元 FA から移動先 FA へとパケットをトンネリングすることで、ハンドオフレイテンシを低減する方式である³⁾。しかし FMIP は、ハンドオフ前に移動先 FA からの Agent Advertisement (ADV) を MN が受信する必要があるため、セルがオーバーラップしない環境や電波強度・干渉等がある場合においては、ハンドオフレイテンシの改善効果が得られない。一方、Neighbor-Casting は、各 FA が周辺 FA のアドレス情報を持ち、L2 ハンドオフ検出時にすべての周辺 FA にパケットを複製して転送する方式である⁴⁾。NeighborCasting は、移動元 FA から移動先 FA にハンドオフ検出を通知する新たなメッセージを送信し、移動先 FA において L2 でのアドレス解決完了後に MN へのパケット転送を開始することで、セルのオーバーラップしない環境

[†] 慶應義塾大学理工学部情報工学科
Department of Information and Computer Science,
Keio University

においてもハンドオフレイテンシが改善される。しかし、NeighborCasting では周辺 FA のすべてにパケット転送することによる有線ネットワークの負荷が増大してしまうという問題がある。

一方、デバイス技術の急速な進展により、GPS (Global Positioning System)^{7)~8)}等のデバイスが携帯電話に搭載されるほど小型化、低価格化されている。DGPS (Differential GPS) は、GPS 信号をあらかじめ位置が正確に分かっている場所で受信し、GPS で得られた位置と真の位置からその誤差を計算することで 1m 以内という高い精度の位置情報をリアルタイムで取得できる⁹⁾。Fast Mobile IP (FASTMIP)^{5)~6)}は、各 FA に GPS を設置し、あらかじめ周辺 FA どうしで位置およびアドレス情報を交換し、MN が接続している FA のすべての周辺 FA にパケットを複製し転送する方式である。FASTMIP において、FA だけでなく MN にも GPS を搭載することでパケットの転送先を限定し、有線チャンネルの負荷を軽減できることを示唆している⁶⁾。しかし、FASTMIP においては、ハンドオフに関係なくつねに周辺 FA へのパケット複製および転送を行うため、MN の位置情報を用いてパケット転送先を限定しても有線チャンネルにおける負荷は大きい。また、ハンドオフに関しては Mobile IP と同様の特性しか得られず、ハンドオフレイテンシを短縮するためには、FA における ADV 送信間隔を短縮する必要があり、無線チャンネルのオーバーヘッドが大幅に増大してしまう問題がある。したがって、セルのオーバーラップしない環境においても適用可能で、有線および無線チャンネルにおけるオーバーヘッドを増大させることなく低レイテンシを実現するハンドオフ方式が求められる。

本論文では、有線および無線チャンネルのオーバーヘッドをほとんど増大させることなく低ハンドオフレイテンシを実現する移動端末の位置情報を用いたハンドオフ方式を提案する。提案方式では、有線チャンネルの負荷を低減するために、移動元 FA がハンドオフを検出した場合、MN および周辺 FA の位置情報を用いて移動先 FA を推定し、移動先 FA を限定してパケットを複製して転送する。また、ハンドオフレイテンシ特性を改善するために、移動元 FA が移動先 FA に対してハンドオフを通知し、移動先 FA が ADV 間隔を短縮することで、MN が自セル内に入ったことを認識するまでにかかる時間を短縮する。さらに、ADV 間隔を短縮することによる無線チャンネルのオーバーヘッドの増大を抑えるために、実際の移動先ではなかったすべての推定移動先 FA における ADV 送信間隔の短縮を解

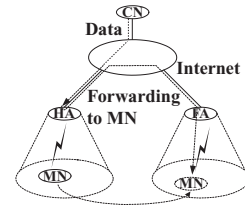


図1 Mobile IP のネットワーク構成図
Fig. 1 The network structure of Mobile IP.

除する機能を付加する。

まず 2 章において従来方式について示す。次に 3 章において提案方式の動作について述べ、4 章で 2 つの FA 間でハンドオフが生じる環境における提案方式の特性を解析し、5 章で計算機シミュレーションの結果より提案方式の特性を評価し、提案方式の有効性を示す。最後に 6 章で結論を述べる。

2. 従来方式

本章ではまず Mobile IP²⁾のネットワーク構成および動作を示す。次に本研究における従来方式である NeighborCasting⁴⁾および FASTMIP⁵⁾について説明する。

2.1 ネットワーク構成

Mobile IP ネットワークは以下の端末により図 1 のように構成される。

- 移動端末 MN (Mobile Node)
- ホームエージェント HA (Home Agent)
- フォーリンエージェント FA (Foreign Agent)
- 固定端末 CN (Correspondent Node)

MN が FA のセル内に移動した場合、MN は FA のアドレス CoA (Care-of-Address) を HA に登録し、HA が MN 宛てのパケットを外出先の FA に転送することで、送信端末 CN から見て MN が存在する場所に関係なく、同じ IP アドレスで通信することが可能になる。

2.2 移動端末の登録

Mobile IP では、MN が外出先の FA のセル内に入った場合、FA のアドレス CoA を HA に登録する。具体的な手順は以下のとおりである。

- (1) FA は T_{adv} [msec] おきに Agent Advertisement (ADV) をブロードキャスト。
- (2) ADV を受信した MN は、FA 宛てに Registration Request (REQ) を送信。
- (3) REQ を受信した FA は、その REQ を HA に転送。
- (4) HA は MN の CoA を記録。

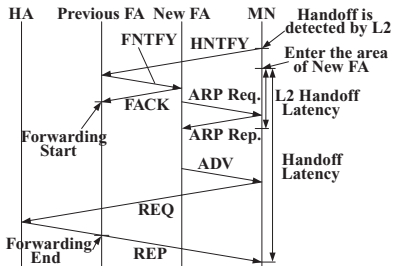


図2 NeighborCasting におけるハンドオフの手順
Fig. 2 Handoff procedure of the NeighborCasting.

- (5) HA は FA 宛てに Registration Reply (REP) を返信 .
- (6) REP を受信した FA は , その REP を MN に転送 .
- (7) REP を受信した MN は , HA への登録の完了を確認 .

MN が新たな FA のセル内に入った場合 , 新たな FA からの ADV を受信後に HA への登録を行う . したがって , FA における ADV 送信間隔 T_{adv} を小さく設定することで , ハンドオフレイテンシを短縮することができる . しかし , T_{adv} を小さく設定すると無線チャンネルにおけるオーバーヘッドが大きくなってしまふ .

2.3 NeighborCasting

Mobile IP においてハンドオフレイテンシ特性を短縮する方式として NeighborCasting⁴⁾が提案されている . 図 2 に NeighborCasting におけるハンドオフ手順を示す . 各 FA は周辺 FA のアドレスを事前に交換し , 以下の手順でハンドオフを行う .

- (1) MN は L2 でハンドオフを検出し , 移動元 FA にハンドオフ通知 (HNTFY) を送信 .
- (2) HNTFY を受信した移動元 FA は , すべての周辺 FA にパケット転送通知 (FNTFY) を送信 .
- (3) FNTFY を受信した FA は , パケット転送確認 (FACK) を返信 .
- (4) FACK を受信した移動元 FA は , すべての周辺 FA にパケット転送を開始 .
- (5) 転送パケットを受信した周辺 FA は , ARP (Address Resolution Protocol) により MN が自セル内に入ったことを確認し MN にパケットを送信 .
- (6) 移動先 FA は定期的に ADV を送信し , MN は Mobile IP と同様の手順で移動先でのアドレスを HA に登録 .

NeighborCasting は , ハンドオフ検出時にすべての周辺 FA にハンドオフを通知し , さらにパケット転送を開始するため , セルのオーバーラップしない環境にお

いてもハンドオフレイテンシ特性を改善できる . しかし , NeighborCasting では , ハンドオフ期間中において周辺 FA のすべてにパケット転送することにより有線ネットワークの負荷が増大する .

2.4 FASTMIP

FASTMIP^{5)~6)}では , 各 FA は GPS を備え , 周辺 FA のアドレスおよび位置情報を交換する . FASTMIP では , 1 つのドメイン内の複数の FA を管理するドメイン管理ルータが設置される . そのドメインに到着したすべてのパケットはまずドメイン管理ルータが受信する . ドメイン管理ルータは到着したパケットを MN が接続している FA およびそのすべての周辺 FA に複製し転送する . 周辺 FA は転送されたパケットをバッファに格納し , MN の登録が完了後に送信する . さらに , FA だけでなく MN にも GPS を搭載することでパケットの転送先を限定し , 有線チャンネルの負荷を軽減できることが示唆されている . しかし , FASTMIP においては , ハンドオフに関係なくつねにパケット転送を行うため , 有線チャンネルにおける負荷の低減効果は小さい . また , ハンドオフに関しては Mobile IP と同様の特性しか得られない .

3. 提案方式

提案方式において , FASTMIP と同様に MN および FA は GPS 等の位置情報を取得可能なデバイスを備える . 装備するデバイスは DGPS のように精度 1 m 程度の位置情報を 1 秒程度おきに得られるものを仮定する⁹⁾ . 提案方式は Mobile IPv4 および Mobile IPv6¹⁰⁾ の両方に適用可能な方式である . 本論文では , 提案方式を Mobile IPv4 に適用した場合の動作について述べる . 提案方式は Mobile IP²⁾に以下の 4 つの機能を追加したものである .

- (1) MN の位置情報の FA への通知
- (2) 周辺 FA のアドレスおよび位置情報の記録
- (3) 移動先 FA へのパケットの複製および転送
- (4) 移動先 FA の ADV 送信間隔の短縮

(1) の機能は , Mobile IP における REQ に MN の位置情報を付加したものである . (2) の機能に関しては , NeighborCasting における周辺 FA のアドレス情報の交換手順に位置情報を付加したものである . (3) の機能は , 位置情報を用いて移動先 FA を限定する点が NeighborCasting との相違点であり , また , ハンドオフ時にのみパケット転送を行う点が FASTMIP との相違点である . (4) の機能は , ハンドオフレイテンシ特性を改善するために提案方式で新たに付加した機能である .

3.1 MN の位置情報の FA への通知

提案方式において、FA は自セル内の MN の位置情報を記録する MN 位置情報テーブルを備える。MN 位置情報テーブルには、MN の最新の位置情報が記録される。提案方式において、各 FA は Mobile IP と同様に一定時間 T_{adv} おきに ADV をブロードキャストする。ADV を受信した MN は HA へ REQ を送信することで登録の更新をする。提案方式では、MN が送信する REQ に自分の位置情報を付加して送信する。FA は、MN からの REQ を参照することで、MN の位置を定期的に MN 位置情報テーブルに記載する。MN の位置情報を付加するため、REQ のパケットサイズは大きくなるが、無線チャネルにおいて新たなパケットは送受信されないため、無線チャネルにおけるオーバーヘッドに与える影響は小さいと考えられる。

3.2 周辺 FA のアドレスおよび位置情報の記録

提案方式において、FA は周辺 FA のアドレスおよび位置情報を記録する周辺 FA テーブルを備える。周辺 FA テーブルの更新は、移動先 FA が移動元 FA に送信する移動先 FA 登録 (NFA) を用いて行う。NFA には移動先 FA のアドレスおよび位置情報が含まれる。また、提案方式では MN が新たな FA からの ADV を受信した場合、REQ に移動元 FA のアドレスを付加する。移動先 FA は下記の手順で移動先 FA のアドレスおよび位置情報を移動元 FA に通知する。

- (1) 新しい FA からの ADV を受信した MN は REQ に移動元 FA のアドレスを付加して HA に送信。
- (2) 移動先 FA は新たな MN からの REQ を受信した場合、REQ に記載された移動元 FA のアドレスに NFA を送信。
- (3) NFA を受信した移動元 FA は、移動先 FA のアドレスと位置情報を周辺 FA テーブルに追加。

このように各 FA は自セルからハンドオフした先の移動先 FA のアドレスおよび位置情報を把握する。提案方式では新たに NFA を導入するが、ハンドオフが生じたときのみにやりとりが発生するため、有線チャネルにおける制御情報量の増加の影響は小さい。

3.3 移動先 FA へのパケット転送

提案方式では、上記の 2 つの機能を付加することで、FA は自セル内の MN および周辺 FA のアドレスおよび位置情報を把握できる。FA は位置情報を用いてパケット転送先を限定することで有線チャネルの負荷の増大を防ぐ。移動元 FA が L2 によりハンドオフ検出したとき、MN 位置情報テーブルおよび周辺 FA テーブルを参照し、ハンドオフする MN との距離が最も近い FA を移動先 FA であると推定し、パケット

複製および転送を開始する。転送パケットを受信した FA は、ハンドオフが完了するまで転送パケットをバッファに格納し、ハンドオフ完了後に MN に転送する。ハンドオフ期間中、転送パケットはバッファに格納されるため、無線チャネルに無駄な複製パケットが送信されることはない。提案方式において、MN は FA からブロードキャストされた ADV を受信し、かつ以前の REQ 送信から 1 秒以上経過している場合、REQ に自分の位置情報を付加して送信する。したがって、FA は $T_{adv} = 1,000[\text{msec}]$ おきに MN の新たな位置情報を得ることになり、MN が比較的高速で移動した場合、移動先 FA の誤推定が発生することが予想される。そこで、MN との距離が最も近い FA だけでなく n 番目に近い FA に対してもパケット転送を行う機能を付加することで、ハンドオフ先の推定誤差の影響を軽減できる。提案方式では、パケットの転送を複数の推定移動先 FA へと限定的に行うことで、有線チャネルの負荷の増大を防ぐ。

3.4 移動先 FA の ADV 送信間隔の短縮

提案方式では、下記の手順で移動先 FA の ADV 送信間隔を短縮することでハンドオフレイテンシを短縮する。移動先 FA の ADV 送信間隔の短縮は、移動元 FA からの ADV 送信間隔短縮 (SADV) を用いて行われる。また、ADV 送信間隔を短縮することによる無線チャネルのオーバーヘッドを最低限に抑えるために、新たに ADV 間隔解除 (CSADV) を用いる。

- (1) L2 ハンドオフを検出した移動元 FA は、すべての推定移動先 FA に SADV を送信。
- (2) SADV を受信した FA は ADV の送信間隔を $T_{shortadv} (\leq T_{adv})$ に短縮。
- (3) 実際の移動先 FA は MN からの REQ を受信すると、ADV 送信間隔を T_{adv} に戻し、移動元 FA に NFA を送信。
- (4) 移動元 FA は NFA を受信したら、実際の移動先 FA を除くすべての推定移動先 FA に対して CSADV を送信。
- (5) CSADV を受信した FA は、自分が移動先ではなかったことを認識し、ADV 送信間隔を T_{adv} に戻し、バッファに格納したパケットを棄却。

提案方式は、SADV を用いてすべての推定送信先 FA の ADV 送信間隔を短縮することで、ハンドオフ時に MN が新たな FA からの ADV を受信するまでの時間を短縮する。さらに、CSADV を用いることで、実際の移動先 FA を除くすべての推定移動先 FA における ADV 送信間隔の短縮を最低限に抑えることで、無線チャネルにおけるオーバーヘッドの増大を防ぐ。また、

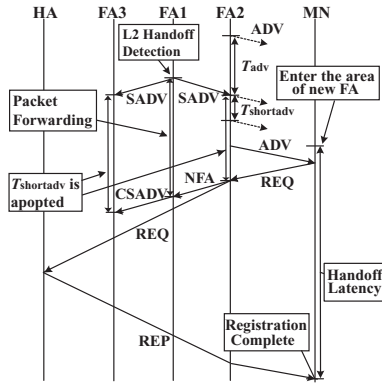


図3 提案方式 ($n = 2$) におけるハンドオフの手順
 Fig. 3 Handoff procedure of the proposed scheme ($n = 2$).

提案方式では、Mobile IP と同様に移動端末の REQ 送信間隔は 1 秒以上と制限されるため、ADV 送信間隔の短縮により送信される REQ 数は増大しないため、以前から存在する端末への影響は、無線チャンネルに送信される ADV の増大によるもののみであると考えられる。

図 3 に提案方式 ($n = 2$) におけるハンドオフ手順を示す。図 3 では、送信元 FA を FA1、実際の送信先 FA を FA2、送信先と推定されたが実際には送信先ではなかった FA を FA3 と示している。FA1 にて L2 ハンドオフを検出した FA1 は MN 位置情報テーブルおよび周辺 FA テーブルを参照し、FA2 および FA3 にパケットを複製および転送を開始する。FA1 は同時に、SADV を FA2 および FA3 に送信することで、ハンドオフを通知する。転送されたパケットを受信した FA2 および FA3 はバッファに格納する。SADV を受信した FA2 および FA3 は、ADV 送信間隔を $T_{shortadv}$ に短縮する。MN はハンドオフ先である FA2 からの ADV を受信したとき、新たな FA のアドレス CoA を HA に知らせるために REQ を送信する。提案方式においては、新たな FA からの ADV 受信に対する REQ には移動元である FA1 のアドレスを含める。MN からの REQ を受信した FA2 は REQ を参照して移動元 FA が FA1 であることを知る。FA2 は FA1 に自分のアドレスおよび位置情報を含む NFA を FA1 に送信する。NFA を受信した FA1 は、移動先 FA ではなかった FA2 に対して CSADV を送信する。CSADV を受信した FA2 は自分が移動先ではなかったことを認識し、バッファリングを中止し、ADV 送信間隔を T_{adv} に戻す。

提案方式は、MN および周辺 FA の位置情報を用いて移動先 FA を推定し、移動先 FA を限定してパケッ

トを複製して転送することで有線チャンネルの負荷を低減可能である。また、提案方式では、MN がハンドオフ前に移動先 FA からの ADV を受信する必要がないため、セルがオーバーラップしない環境においてもハンドオフレイテンシの改善が可能である。さらに、実際の移動先ではなかったすべての推定移動先 FA における ADV 送信間隔の短縮を解除する機能を付加することで無線チャンネルのオーバーヘッドの増大を抑える方式である。

Mobile IPv4 では、HA に登録する CoA として FA の IP アドレスを用いる。それに対し、Mobile IPv6 には FA の概念はなく、FA に相当するノードとしてアクセスルータ (AR) が対応している。AR は定期的に Router Advertisement (RA) を無線チャンネル上に送信し、移動端末は受信した RA から IP アドレスを生成し、その IP アドレスを CoA として HA に通知する。このとき、移動端末は Mobile IPv4 における REQ に相当する Binding Update (BU) を直接 HA に送信する。提案方式を Mobile IPv6 へ適用するには、移動端末が送信した HA 宛での BU を AR が受信し、SADV およびパケット複製、転送を開始することで対応でき、容易に実現可能である。

3.5 移動端末の位置情報が取得できない場合の動作

提案方式は移動端末による位置情報の検出を仮定している。しかし、現時点では、移動端末の位置情報をつねに正確に検出する技術が実用レベルに達するには、もう少しばかり時間が必要であると考えられる。提案方式において、移動端末の位置情報が検出できない場合、以下の 3 通りの動作が考えられる。

- (1) パケットの複製、転送を行わない。
- (2) すべての周辺 FA にパケットを複製、転送。
- (3) 高頻度で移動先になる周辺 FA のみにパケットの複製、転送。

(1) を適用した場合、有線および無線チャンネルのオーバーヘッドは発生しないが、Mobile IP と比較してハンドオフレイテンシの改善は得られない。(2) を適用した場合、ハンドオフレイテンシは位置情報を検出できる場合と同様の改善が得られる。しかし、すべての周辺 FA に対してパケットを複製および転送するため、有線ネットワークのオーバーヘッドは増大する。さらに、すべての周辺 FA において ADV 送信間隔が短縮されるため、無線チャンネルのオーバーヘッドも増大する。(3) を適用した場合、高頻度の移動先 FA へハンドオフした場合、位置情報を検出できる場合と同様のハンドオフレイテンシの改善が得られる。しかし、低頻度の移動先 FA へハンドオフした場合はハンドオフ

表 1 従来の諸方式との比較

Table 1 Comparative chart of the proposed and conventional schemes.

Protocol	Handoff scheme	Overlapping cells	L2 trigger	Packet forwarding	Registration to HA	Positional Information
HMIP		-	No	No	Inter-domain	No
Cellular IP	Hard	No	No	No	Inter-domain	No
	Semi-soft	Yes	Yes	Old and next ARs		
HAWAII	Non-forwarding	Yes	Yes	No	Inter-domain	No
	Forwarding	No	No	Next AR		
FMIP		Yes	Yes	Next AR	Always	No
NeighborCasting		No	Yes	All neighbor ARs	Always	No
FASTMIP		-	No	Expected next ARs	Always	Yes
Proposed		No	Yes	Expected next ARs	Always	Yes

レイテンシの改善が得られない。この場合、有線および無線チャネルのオーバーヘッドは、パケットを複製、転送する周辺 FA 数に依存し、移動先の推定精度と有線および無線チャネルのオーバーヘッドはトレードオフの関係になると考えられる。以上より、有線および無線チャネルのオーバーヘッドに対する要求が厳しい場合には、(1)を適用することで有線および無線チャネルのオーバーヘッドを低減し、要求が厳しくない場合には、(2)を適用することでハンドオフレイテンシの改善を得ることができる。さらに、移動端末の移動先 FA に偏りがあるような場合は、(3)を適用することで有線および無線チャネルにおけるオーバーヘッドを大幅に増大することなくハンドオフレイテンシの改善を得ることができると思われる。

3.6 従来の諸方式との比較

Mobile IP におけるハンドオフレイテンシの短縮を目指した研究の代表的な方式は、2章従来方式で示した FMIP および NeighborCasting, FASTMIP のほかに、HMIP (Hierarchical Mobile IP)¹¹⁾ および Cellular IP¹²⁾, HAWAII (Handoff-Aware Wireless Access Internet Infrastructure)³⁾等があげられる。これらの研究は、ネットワーク層におけるハンドオフレイテンシ特性の改善を目指した研究である。また、IETF seamoby WG では、AAA (Authentication, Authorization, Accounting) 情報、セキュリティ情報、ユーザごとの QoS (Quality of Service) 情報および ROHC (ROBust Header Compression) 情報等の、より上位層を考慮したシームレスなハンドオフ方式を実現するために、CTP (Context Transfer Protocol)⁴⁾ および CARD (Candidate Access Router Discovery)⁵⁾等の標準化が進められている。本研究は、ネットワーク層でのハンドオフレイテンシ特性の改善を目的としており、CTP や CARD といった上位層を考慮したハンドオフ方式は比較の対象外とする。

表 1 にネットワーク層における従来のハンドオフ方式と提案方式との比較を示す。これらのハンドオフ

方式は、まずセルのオーバーラップした環境において適用可能かで分けることができる。セルがオーバーラップする環境とは、隣接セルのセルがオーバーラップする場合だけでなく、CDMA (Code Division Multiple Access) のソフトハンドオフ等のように移動端末が複数基地局からの電波を受信する環境を想定しており、そのような環境下では良好なハンドオフレイテンシ特性を得ることが可能である。それに対し、セルがオーバーラップしない環境とは、電波強度・干渉等により、同時に複数の基地局との通信ができない環境を含んでいる。そのような環境においても適用可能な方式は、Cellular IP の Hard Handoff, HAWAII の Forwarding, NeighborCasting および提案方式である。さらにこれらの方式を、ハンドオフを検出する層で分類すると、L2 からの情報を使ってハンドオフを検出する NeighborCasting および提案方式と、L2 情報を用いない方式に分類される。ハンドオフの検出に L2 情報を利用できる場合、移動端末が移動先の基地局からの ADV を受信する前にハンドオフの検出が可能であり、より良好なハンドオフレイテンシ特性を得ることができる。最後に提案方式と NeighborCasting との比較は、NeighborCasting がパケット転送をすべての周辺 AR に対して行うのに対し、提案方式では、移動端末の位置情報を用いて移動先 AR を予測し、パケットの転送先を予想移動先に限定することにより、有線ネットワークにおけるオーバーヘッドを低減することが可能であるという優位性を有する。また、提案方式は、HMIP や Cellular IP, HAWAII といった MN のドメイン内の移動を HA から隠蔽する技術の適用が可能であり、これらの方式と組み合わせることにより、ハンドオフレイテンシ特性のさらなる改善を得られる。

4. 特性解析

本章では、2つの FA 間を MN が等速直線運動する場合におけるハンドオフレイテンシおよび無線チャネルにおけるオーバーヘッド特性について理論解析する。

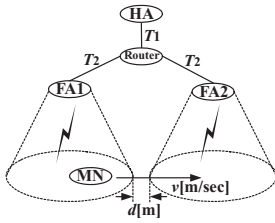


図 4 単純な 2FA モデル
Fig. 4 A simple model with two FAs.

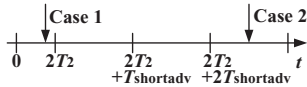


図 5 ハンドオフ時の FA2 の ADV 送信間隔
Fig. 5 ADV transmission interval of FA2 in a handoff.

ハンドオフレイテンシは、MN が移動元 FA のセルから出た時点から移動先 FA のセル内において REP メッセージを受信し HA への登録が完了するまでの時間と定義する。また、無線チャンネルにおけるオーバーヘッドは移動先 FA においてハンドオフが完了するまでに送信した ADV メッセージ数と定義する。

図 4 に理論解析に用いるシステムモデルを示す。HA とルータ、そして 2 つの FA が伝播遅延 T_1 および T_2 [msec] で接続されている。2 つの FA 間は電波が届かない部分の距離 d [m] だけ離れており、1 つの MN が FA1 と FA2 を結んだ直線上を速度 v [m/sec] で FA1 から FA2 のセル内へと等速直線運動するものとする。本解析においては移動先の推定に成功した場合について考える。

図 5 にハンドオフ時における FA2 の ADV 送信間隔を示す。MN が等速直線運動し、FA1 のセルを出た瞬間を時間 $t = 0$ とする。FA1 は $t = 0$ で MN がセルから出た瞬間にハンドオフ開始を検出し、推定移動先である FA2 に SADV を送信する。したがって、FA2 に SADV が到着する時間は $t = 2T_2$ である。FA2 は SADV を受信すると、即座に ADV を送信し、以降 ADV 送信間隔を $T_{shortadv}$ に短縮する。したがって、FA2 は $t = 2T_2, 2T_2 + T_{shortadv}, 2T_2 + 2T_{shortadv}, \dots$ において ADV を送信する。一方、MN が FA1 のセルを出て FA2 のセル内に到着する時間は $t = \frac{d}{v}$ [sec] となる。ここで、 $\frac{d}{v}$ と $2T_2$ の大小関係により、2 つの場合分けをする。

まず、図 5 の Case 1 に示すように MN が時間 $t \leq 2T_2$ に FA2 のセル内に入る場合を考える。ここで、無線チャンネルの伝播遅延を無視できると仮定すると、MN は FA2 が $t = 2T_2$ にて送信した ADV を受信する。したがって、この場合の無線チャンネルのオー

バヘッド O は 1 となる。また、この場合のハンドオフレイテンシ L は、MN が $t = 2T_2$ に ADV を受信後、HA に REQ を送信し、その返信としての REP を受信するまでにかかる時間である。したがって、MN と HA 間の往復伝播遅延を $T_{rtt} = 2T_1 + 2T_2$ とすると、 $L = 2T_2$ となる。

次に、図 5 の Case 2 に示すように MN が時間 $t > 2T_2$ に FA2 のセル内に入る場合を考える。この場合、FA2 における ADV 送信間隔は $T_{shortadv}$ である状態で MN は ADV を受信する。したがって、FA2 において $T_{shortadv}$ [msec] が適用されて O 個目の ADV を MN が受信したとすると、無線チャンネルのオーバーヘッド $O = m + 2$ となる。ここで、 $\frac{1000d}{v} - 2T_2$ の商を m とする。たとえば、図 5 の Case 2 に示した例では、MN は 4 個目の $t = 2T_2 + 3T_{shortadv}$ の ADV を受信する。この場合、 $m = 2$ であるため、無線チャンネルのオーバーヘッド $O = 2 + 2 = 4$ となる。また、ハンドオフレイテンシ $L = 2T_2 + T_{shortadv}(m + 1)$ となる。

5. 特性評価

本章では計算機シミュレーションを用いてハンドオフレイテンシ、有線ネットワークおよび無線チャンネルにおけるオーバーヘッド特性について評価する。ハンドオフレイテンシは、MN が移動元 FA のセルから出た時点から移動先 FA のセル内において MN がパケットを受信できるようになるまでの時間と定義する。したがって、提案方式では移動先 FA が MN からの REQ を受信した時点、また NeighborCasting では移動先 FA が MN の L2 アドレス解決を完了した時点、Mobile IP では移動先 FA のセル内において MN が REP を受信する時点となる。NeighborCasting は L2 アドレス解決を用いているため、ハンドオフレイテンシ特性は、無線インタフェースの仕様に依存する。本特性評価では、FNTRY に MN の L2 アドレスを含み、ARP を使わない場合の特性を示す。つまり、実現可能な最良のハンドオフレイテンシ特性ということになる。また、無線チャンネルにおけるオーバーヘッドは、FA が送信する ADV の個数と定義する。また、FASTMIP の特性は Mobile IP²⁾ と同等のため、比較モデルとして Mobile IP および NeighborCasting を用いる。

本研究ではまず、図 6 に示したネットワークプロジ環境において MN がランダム性を持って移動するシミュレーションを行う。本シミュレーションでは、 800×692.82 [m] の領域に 23 個の FA が 200 [m] 間隔で位置する場合を考える。各 FA は無線インタフェー

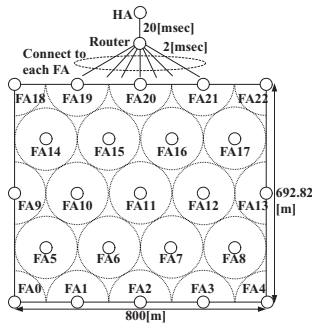


図6 シミュレーションにおけるネットワークトポロジ
Fig. 6 Network topology under simulation.

表2 MNのシミュレーションパラメータ

Table 2 Simulation parameters of MNs.

v_{max}	13.9 [m/s]
v_{pref}	0, 13.9 [m/s]
a	-4, ..., 2.5 [m/s ²]
μ_v	25 [s]
p_{vpref}	$p(v=0) = 0.3$ $p(v=v_{max}) = 0.3$
μ_{openew}	50 [s]
Δf_c	1, ..., 10 [s]

スを有し、無線チャンネルは理想的なチャンネルを仮定し、パケットどうしの衝突およびフェージングの影響によるパケット損失はないものとする。それぞれのセル半径は100[m]で、セルは接しており、オーバーラップはないものとする。これら23個のFAは1つのルータに接続されており、さらにルータの先にHAが接続されているものとする。FAとルータ間の伝播遅延は2[msec]とし、またルータとHA間の伝播遅延は20[msec]と仮定する。領域内には32個のMNが存在し、それぞれがSmooth Random Mobility Model¹⁶⁾に従って移動する。表2にMNの移動モデルのシミュレーション諸元を示す。MNは最大速度13.9[m/sec]とし、低速な自動車程度の移動性があるものとする。MNは1[sec]おきに位置情報を得られると仮定する。測定誤差はDGPSが実現可能な精度である1m(2drms)とし、真値を中心にした半径1mの円内の誤差をランダムに与える。本研究では、900[sec]のシミュレーションを10回試行した平均値を評価する。

さらに本研究では、4章において理論解析を行った2つのFAが存在するモデルにおいてハンドオフレイテンシおよび無線チャンネルにおけるオーバーヘッド特性に関する特性解析および計算機シミュレーションの結果を評価する。

5.1 無線チャンネルにおけるオーバーヘッド特性

図7に無線チャンネルにおけるオーバーヘッド特性を示す。Mobile IPおよびNeighborCastingにおいて

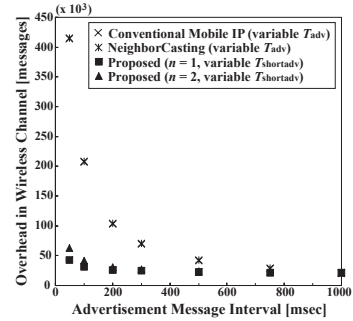


図7 無線チャンネルにおけるオーバーヘッド特性

Fig. 7 Performance of overhead in wireless channel.

は T_{adv} を横軸にとり、提案方式においてはつねに $T_{adv} = 1,000$ [msec] で固定し $T_{shortadv}$ を横軸にとった場合の特性を示す。図7より、Mobile IP および NeighborCasting と比較して、提案方式の無線チャンネルのオーバーヘッド特性が大幅に改善できることが分かる。これは、Mobile IP および NeighborCasting においては T_{adv} を小さく設定すると、つねに短い時間間隔で ADV をブロードキャストするため、無線チャンネルのオーバーヘッドが大きくなるのに対し、提案方式においてはハンドオフ期間中にのみ短い時間間隔 $T_{shortadv}$ で ADV を送信し、ハンドオフ時以外では長い時間間隔 $T_{adv} = 1,000$ [msec] が適用されるためである。また、2つの提案方式を比較すると、 $n=2$ の方が無線チャンネルのオーバーヘッドが大きくなることが分かる。これは、 $n=2$ とすることで送信元FAがハンドオフ検出時に、 $T_{shortadv}$ が適用されるFAを2つにすることで、送信ADV数が増加するためである。また、2つの提案方式の無線チャンネルのオーバーヘッドの差は $T_{shortadv}$ が小さくなると大きくなる。これは、 $T_{shortadv}$ を大きく設定したときは、ハンドオフ期間中に $T_{shortadv}$ が適用されても T_{adv} との差が小さいため、オーバーヘッド全体に対するハンドオフ期間中のオーバーヘッドの割合が小さいのに対し、 $T_{shortadv}$ を小さく設定することで、ハンドオフ期間中のオーバーヘッドが全体に占める割合が大きくなるためである。

5.2 有線ネットワークにおけるオーバーヘッド特性

図8に有線ネットワークのオーバーヘッド特性を示す。ここでも図7と同様に、Mobile IP および NeighborCasting においては T_{adv} を横軸にとり、提案方式においてはつねに $T_{adv} = 1,000$ [msec] で固定し $T_{shortadv}$ を横軸にとった場合の特性を示す。有線ネットワークのオーバーヘッドは、パケットの複製および転送を行わ

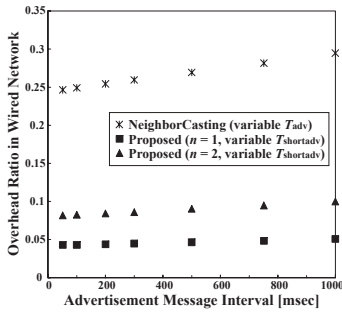


図8 有線ネットワークにおけるオーバーヘッド特性

Fig. 8 Performance of overhead ratio in wired network.

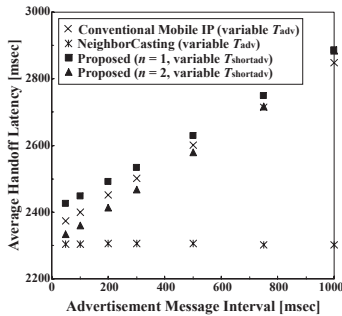


図9 平均ハンドオフレイテンシ特性

Fig. 9 Average handoff latency performance.

ない Mobile IP を用いた場合の有線ネットワークに流れるデータトラフィック量を 1 としたときに、移動元 FA により複製および転送され増加したデータトラフィック量の割合と定義する。図 8 より、提案方式の $n = 1$ および $n = 2$ のいずれの場合も有線ネットワークのオーバーヘッドが 5~10% 程度と低く抑えられるのに対し、NeighborCasting では、有線ネットワークのトラフィック量が Mobile IP と比較して、約 30% 増加していることが分かる。これは、NeighborCasting ではすべての周辺 FA にパケット転送をするためだと考えられる。それに対し、提案方式は n 個の FA に対してのみパケット転送することで、有線ネットワークのオーバーヘッドの増加を抑えることが可能である。さらに、NeighborCasting では、HA への登録方法は Mobile IP と同じであるため、HA が CoA を移動先 FA へと変更するまでにかかる時間は短縮されない。それに対し、提案方式は、次の推定移動先 FA の ADV 送信間隔を短縮することで、HA が CoA を移動先 FA へと変更するまでにかかる時間が短縮され、その結果、パケット転送する期間が短縮され、有線ネットワークのオーバーヘッドの増加がさらに抑えられる。

5.3 平均ハンドオフレイテンシ特性

図 9 に平均ハンドオフレイテンシ特性を示す。こ

こでも図 7, 8 と同様に、Mobile IP および NeighborCasting においては T_{adv} を横軸にとり、提案方式においてはつねに $T_{adv} = 1,000[\text{msec}]$ で固定し $T_{shortadv}$ を横軸にとった場合の特性を示す。図 9 より、Mobile IP および提案方式の特性が T_{adv} および $T_{shortadv}$ の値に比例するのに対し、NeighborCasting の特性は T_{adv} の値に依存せず、良好なハンドオフレイテンシ特性を実現できることが分かる。これは、NeighborCasting は、移動先 FA からの ADV 受信を待つことなく、L2 アドレス解決の完了後に MN は移動先 FA からのパケットを受信できるためである。本研究における NeighborCasting の特性評価では、実現可能な最良のハンドオフレイテンシ特性が得られる移動元 FA から周辺 FA に送信する FNTFY に MN の L2 アドレスを含めた場合を示している。したがって、NeighborCasting を実システムに適用する場合、その特性は ARP 等の L2 アドレス解決のパラメータ設定等に依存する。また、Mobile IP では T_{adv} を小さくするとハンドオフレイテンシ特性が改善することが分かる。しかし、Mobile IP は図 7 に示したように、 T_{adv} を小さく設定することで無線チャネルにおけるオーバーヘッドが急激に大きくなってしまふ。一般に、無線チャネルは有線と比較してビットレートが低く、オーバーヘッドのデータに与える影響が大きいため、無線チャネルのオーバーヘッドは小さいことが望まれる。したがって、同じ無線チャネルのオーバーヘッドで実現できるハンドオフレイテンシ特性を評価する。図 7 において、 $T_{adv} = 1,000[\text{msec}]$ の Mobile IP と $T_{shortadv} = 200[\text{msec}]$ のオーバーヘッドはほぼ同程度である。図 9 において、それらに対応するハンドオフレイテンシ特性を比較すると、Mobile IP は約 2,900[msec] に対し、提案方式では $n = 1$ の場合約 2,400[msec]、 $n = 2$ の場合約 2,500[msec] であり、提案方式のハンドオフレイテンシ特性が大幅に改善されていることが分かる。これは、提案方式ではハンドオフ時において $T_{shortadv}$ を適用することで、MN が新しい FA のセルに移動後、移動先 FA からの最初の ADV を受信するまでにかかる時間を短縮できるためであると考えられる。また、2 つの提案方式を比較すると $n = 2$ の場合の方の改善が大きいことが分かる。MN が推定移動先 FA に移動した場合、移動先 FA では $T_{shortadv}$ が適用されているため、小さなハンドオフレイテンシが得られる。しかし、MN が推定移動先 FA とは異なる FA へと移動した場合、 $T_{adv} = 1,000[\text{msec}]$ が適用され、ハンドオフレイテンシは改善されない。 $n = 2$ の提案方式では 2 つの推定移動先 FA で $T_{shortadv}$ が

表 3 提案方式における移動先 FA の推定成功率

Table 3 Successful estimation rate of the proposed schemes.

	$n = 1$	$n = 2$
P_{suc1}	0.7754	0.7752
P_{suc2}	-	0.2163
P_{fail}	0.2246	0.0085

適用されるため、 $n = 1$ の場合と比較して MN が推定移動先 FA に移動する確率が高くなるため、より良好なハンドオフレイテンシ特性を得られると考えられる。表 3 に提案方式における移動先 FA の推定成功率を示す。表中では、図 7 ~ 図 9 のシミュレーションにおいて、総ハンドオフに対してハンドオフ時において最も近い FA に移動した割合を P_{suc1} 、2 番目に近い FA に移動した割合を P_{suc2} 、推定移動先 FA 以外の FA に移動した割合を P_{fail} と示す。本シミュレーション環境では、FA からの電波が届かない領域が存在するため移動先 FA の推定は比較的困難であり、約 77% と推定精度は高い結果が得られる。しかし、 $n = 2$ として推定移動先 FA を 2 つにすることで、約 99% の確率で移動先 FA を正しく推定可能になる。そこで、本シミュレーション環境のようなセルのオーバーラップがまったく生じない環境においては $n = 2$ を適用し、セル間距離が短くところどころで電波が届かない箇所があるような環境においては $n = 1$ を適用することで、オーバーヘッドを最低限に抑えつつ良好なハンドオフレイテンシ特性が得られる。以上より、提案方式はセルがオーバーラップしない環境においても無線および有線チャンネルのオーバーヘッドを大きくすることなく良好なハンドオフレイテンシ特性を得られることから、その有効性が示される。

5.4 2FA モデルにおける特性

図 10 および図 11 に $d = 1[m]$ の場合における 2FA モデルにおけるハンドオフレイテンシ、無線チャンネルにおけるオーバーヘッド特性をそれぞれ示す。図 10、図 11 とともに、理論解析とシミュレーションの結果は一致しており、理論解析の妥当性が示される。また、Mobile IP および NeighborCasting では MN の移動速度に対して曲線的な特性を示すのに対し、提案方式では階段状の特性を示す。これは、Mobile IP ではつねに一定の ADV 送信間隔 T_{adv} が適用されるため、MN が新たなセルに入った後に初めての ADV を受信するまでにかかる時間の期待値は MN の移動速度 v に依存せずにつねに一定であり、ハンドオフレイテンシ特性は FA からの電波が届かない領域を MN が通過するのにかかる時間に依存するため、MN の移動速

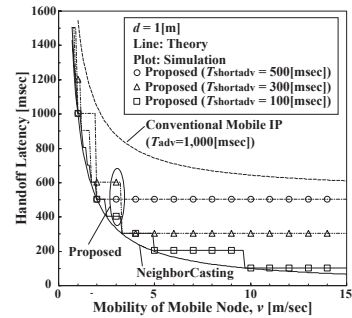


図 10 2FA モデルでのハンドオフレイテンシ特性

Fig. 10 Handoff latency performance in 2FA model.

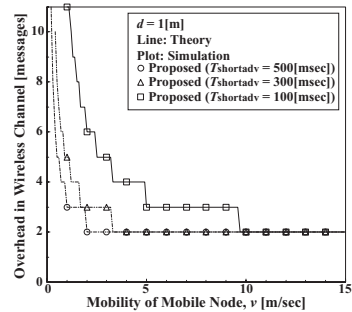


図 11 2FA モデルでのオーバーヘッド特性

Fig. 11 Overhead performance in 2FA model.

度が速くなるとハンドオフレイテンシは小さくなる。それに対し、提案方式では MN の移動速度が速くなくても、 $T_{shortadv}$ の整数倍でしか ADV を受信できないためである。

さらに図 10 より、どんな $T_{shortadv}$ および v においても Mobile IP よりも提案方式の方がハンドオフレイテンシ特性が改善していることが分かる。これは、Mobile IP における MN が新たなセルに入った後に初めての ADV を受信するまでにかかる時間の最悪値は T_{adv} であるのに対し、提案方式の場合は、最悪でも $T_{shortadv}$ 以内に初めての ADV を受信することができるからである。

また図 11 より、MN の移動速度が $v \geq 5[m/sec]$ において、 $T_{shortadv}$ の値にかかわらず無線チャンネルにおけるオーバーヘッド小さな一定値になることが分かる。これより、MN の移動速度が比較的速いことが想定される環境においては、あらかじめ小さな $T_{shortadv}$ に設定することで、無線チャンネルにおけるオーバーヘッド特性を大幅に大きくすることなく良好なハンドオフレイテンシ特性を実現できることが分かる。反対に、MN の移動速度が遅いことが想定される環境においては、あらかじめ比較的大きな $T_{shortadv}$ に設定するべきであると考えられる。

5.5 FA の状態変化を考慮した場合における特性

提案方式は、周辺 FA テーブルの初期設定が不要となる等のメリットがある一方で、周辺 FA から NFA を受信するまで周辺 FA テーブルが更新されない。また別の方式として、あらかじめ各 FA の周辺 FA テーブルの初期状態を設定し、定期的に周辺 FA と情報交換することにより、周辺 FA テーブルの状態を最新に保持する方式が考えられる。以降、テーブル定期更新方式と呼ぶ。提案方式では、ハンドオフが正常に完了した場合にのみ、移動先 FA からの NFA により周辺 FA テーブルの更新が行われる。周辺 FA が故障等により状態変化した場合、ハンドオフは正常に完了せず、移動先 FA は NFA を送信することができないため、移動元 FA はそれを検知することはできない。したがって、各 FA はつねに周辺 FA が正常に動作しているという前提で、SADV 送信およびパケット複製、転送を行う。それに対し、テーブル定期更新方式では、周辺 FA が状態変化した場合、それを検知することが可能である。周辺 FA の状態変化を検知した場合、正常に動作している FA の中から移動先を推定する。本研究では、両方式の計算機シミュレーションによる特性評価を行う。シミュレーション条件は図 7 ~ 図 9 と同様に設定する。実システムにおいては、23 個の FA のうち複数の FA が同時に故障する確率は低いと考えられるため、一番故障の影響が大きいと考えられるエリアの中心に位置する FA11 が、シミュレーション開始時点から 180 秒後に故障し、シミュレーション終了時まで復旧しない場合の特性を評価する。また、テーブル定期更新方式におけるテーブル更新間隔は 60 秒と設定し、両方式ともに推定移動先 FA 数 $n = 2$ とする。図 12 に FA の状態変化を考慮した場合の無線チャネルのオーバーヘッド特性を示す。図 12 より、無線チャネルのオーバーヘッドは、テーブル定期更新方式の方が大きくなるのが分かる。これは、テーブル定期更新方式では、周辺 FA の状態変化を検知できるため、推定移動先 FA に故障した FA が含まれることはなく、つねに n 個すべての推定移動先 FA で SADV が正しく受信され、ADV 送信間隔が短縮されるのに対し、提案方式では、周辺 FA の状態変化を検知できないため、推定移動先 FA に故障した FA が含まれる可能性があり、ADV 送信間隔を短縮する FA 数が n 個よりも少なくなるためだと考えられる。

図 13 に FA の状態変化を考慮した場合の平均ハンドオフレイテンシ特性、表 4 に移動先 FA の推定成功率をそれぞれ示す。図 13 より、 $T_{shortadv}$ が小さい場合において、テーブル定期更新方式の特性がわずかに

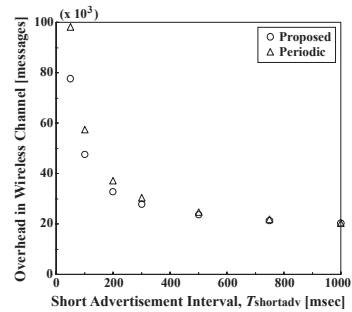


図 12 FA の状態変化を考慮した場合の無線チャネルのオーバーヘッド特性

Fig. 12 Overhead in wireless channel considering conditional change of FA.

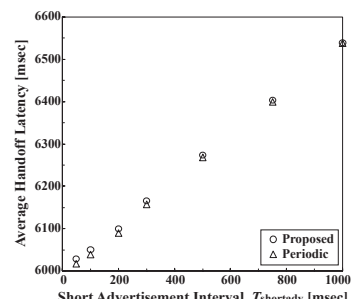


図 13 FA の状態変化を考慮した場合の平均ハンドオフレイテンシ特性

Fig. 13 Handoff latency considering conditional change of FA.

表 4 FA の状態変化を考慮した場合の周辺 FA の推定成功率
Table 4 Successful estimation rate considering conditional change of FA.

	Proposed	Periodic
P_{suc1}	0.6775	0.7137
P_{suc2}	0.1985	0.1717
P_{fail}	0.1240	0.1146

に良いことが分かる。これは、テーブル定期更新方式は、周辺 FA の状態変化を検知できるため、つねに n 個すべての推定移動先 FA で ADV 送信間隔が短縮されるのに対し、提案方式では、周辺 FA の状態変化を検知できないため、ADV 送信間隔を短縮する FA 数が n 個よりも少なくなるためだと考えられる。また、図 13 および表 4 を図 9 および表 3 とそれぞれ比較すると、両方式ともに特性が劣化していることが分かる。今、MN が図 6 の FA6 のセルからハンドオフしたとき、周辺 FA テーブルから FA11, FA7, FA10 の順に近い FA を発見した場合を考える。このとき、テーブル定期更新方式の場合、故障している FA11 を除外し、推定移動先 FA として FA7 と FA10 にパケット転送を行う。それに対し、提案方式の場合、FA11 の故障を

検知できず、推定移動先 FA として FA11 と FA7 にパケット転送を行う。FA11 が故障している場合、FA6 からは FA12, FA15, FA16 へハンドオフすることも予想される。したがって、 $n = 2$ とした場合、テーブル定期更新方式でも移動先 FA の推定成功率が低くなるため、ハンドオフレイテンシ特性の劣化が大きくなると考えられる。よって、テーブル定期更新方式では、周辺 FA の故障を検知した場合、移動先 FA の推定成功率を高めるために大きな n を設定するか、有線および無線チャネルのオーバーヘッド特性の劣化を防ぐためにパケット転送を行わないかの動作をすべきであると考えられる。また、提案方式では、SADV に対する周辺 FA からの受信確認メッセージ等を付加し、周辺 FA の状態変化の検知を可能にする機構を付加することで故障した FA を推定移動先 FA から除外し、周辺 FA の故障を検知した場合、テーブル定期更新方式と同様に、大きな n を設定するか、パケット転送を行わないかの動作をすることで、テーブル定期更新方式と同等の特性を得ることができると考えられる。

5.6 スケーラビリティに関する考察

提案方式のスケラビリティに関しては、無線チャネルに送信される ADV 数、すなわち、無線チャネルのオーバーヘッドで評価すべきである。提案方式では、ハンドオフが生じるたびに推定移動先 FA で ADV 送信間隔が短縮される。つまり、ネットワーク全体に存在する移動端末数 N が大きいほど、ハンドオフが頻発し、その結果、無線チャネルのオーバーヘッドが増大する。図 14 に移動端末数を変化させたときの無線チャネルにおけるオーバーヘッド特性を示す。図 14 より、 $T_{shortadv}$ を小さく設定した場合、 N が大きくなると、無線チャネルのオーバーヘッドが大きくなるのが分かる。ただし、 N を 32 から 64 へと 2 倍にした場合、無線チャネルのオーバーヘッドはほぼ 2 倍に増大しているが、 N を 256 から 512 へと 2 倍にした場合、無線チャネルのオーバーヘッドの増大はほぼ 1.3 倍となり、 N が大きくなるにつれ、無線チャネルのオーバーヘッドの増大は小さくなるのが分かる。これは、提案方式では、 N が小さい場合、ハンドオフの生じる頻度が低いので、推定移動先 FA が SADV を受信したときに、ADV 送信間隔が短縮されていない可能性が高いのに対し、 N が大きい場合、ハンドオフの生じる頻度が高いため、推定移動先 FA が SADV を受信したときに、他の端末からの SADV により ADV 送信間隔が短縮されている可能性が高いからだと考えられる。理論的には N を無限大にし、つねにすべての FA で ADV 送信間隔が $T_{shortadv}$ になる場合、 $T_{adv} = T_{shortadv}$

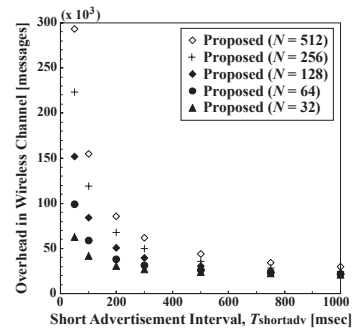


図 14 移動端末数を変化させた場合の無線チャネルにおけるオーバーヘッド特性

Fig. 14 Overhead in wireless channel for various number of MNs.

と設定した Mobile IP および NeighborCasting と同等の無線チャネルのオーバーヘッドが発生すると考えられる。図 7 と図 14 を比較すると、 N が 512 のときの $T_{shortadv} = 50$ [msec] の提案方式の無線チャネルのオーバーヘッドは、 $T_{adv} = 50$ [msec] の Mobile IP および NeighborCasting の場合の 71% 程度であることが分かる。これより、提案方式は、移動端末数 N が大きい場合、 $T_{shortadv}$ を小さく設定すると、無線チャネルのオーバーヘッドが増大し、Mobile IP および NeighborCasting の特性に近づくが、オーバーヘッドの増加は線形的ではないため、ある程度の N までは対応可能であると考えられる。対応できないほど N が大きくなり、スケラビリティに問題が生じる場合の対処としては、各 FA における $T_{shortadv}$ と T_{adv} が適用される時間の割合を測定および算出し、ある割合以上に $T_{shortadv}$ が適用される場合、 $T_{shortadv}$ の値を大きくする等の制御を付加することにより、無線チャネルのオーバーヘッドの増大は軽減され、スケラビリティは確保されることが考えられる。

6. おわりに

有線および無線チャネルのオーバーヘッドをほとんど増大させることなく低ハンドオフレイテンシを実現する移動端末の位置情報を用いたハンドオフ方式を提案した。提案方式では、有線チャネルの負荷を低減するために、移動元 FA が MN および周辺 FA の位置情報を用いて移動先 FA を推定し、移動先 FA を限定してパケットを複製して転送する。また、移動元 FA が移動先 FA に対してハンドオフを通知し、移動先 FA が ADV 間隔を短縮することで、MN が自セル内に入ったことを認識するまでにかかる時間を短縮する。さらに、実際の移動先ではなかったすべての推定移動先 FA に通知し ADV 送信間隔の短縮を解除する機能を付加

する．理論解析および計算機シミュレーションを用いて提案方式のハンドオフレイテンシおよびオーバーヘッド特性について評価した結果，提案方式は有線および無線チャネルにおけるオーバーヘッドをほとんど増大させることなく低ハンドオフレイテンシを実現できることを示した．特に，セルのオーバーラップがまったく生じない環境においては $n = 2$ を適用し，セル間距離が短くところどころで電波が届かない箇所があるような環境においては $n = 1$ を適用することで，オーバーヘッドを最低限に抑えつつ良好なハンドオフレイテンシ特性が得られることを示した．

本研究では， $T_{shortadv}$ を固定しているが，適切な $T_{shortadv}$ の値の検討や，MN から取得する位置情報を基に MN の移動速度を推定し，推定した移動速度に基づいて $T_{shortadv}$ を動的に変化させる方式の検討，さらに，周辺 FA の状態変化を考慮した環境や位置情報を検出できない場合に特性劣化を軽減する方式の検討等が今後の検討課題である．

謝辞 本研究は日本学術振興会および慶應義塾大学大学院情報・電気・電子分野 21 世紀 CoE プログラム“アクセス網高度化光・電子デバイス技術”の援助によって行われた．関係者各位に深謝する．

参 考 文 献

- 1) Perkins, C.E.: Mobile IP, *IEEE Commun. Mag.*, pp.66–82 (2002).
- 2) Perkins, C.E.: IP Mobility Support for IPv4, *IETF RFC 3220*, work in progress (2002).
- 3) Koodli, R.: Fast Handovers for Mobile IPv6, *IETF Internet Draft*, work in progress (2002).
- 4) Shim, E., et al.: Low Latency Handoff for Wireless IP QOS with Neighborcasting, *ICC '02*, pp.3245–3249 (2002).
- 5) Ergen, M., et al.: Position Leverage Smooth Handover Algorithm for Mobile IP, *Proc. ICN '02* (2002).
- 6) Ergen, M., et al.: Application of GPS to Mobile IP and Routing in Wireless Networks, *VTC2002Fall* (2002).
- 7) 安田明生：GPS 技術の展望，電子情報通信学会論文誌，Vol.J84-B, No.12, pp.2082–2091 (2001).
- 8) 羽田久一，川喜多佑介：インターネット GPS，情報処理学会誌，Vol.43, No.8, pp.836–844 (2002).
- 9) 館田良文，安田明生：異なるコード追尾方式の GPS 受信期間で生じる差動誤差の解析，電子情報通信学会論文誌，Vol.J84-B, No.12, pp.2108–2114 (2001).
- 10) Johnson D., et al.: IP Mobility Support for IPv6, *IETF Internet Draft* (2003).
- 11) Soliman, H., et al.: Hierarchical Mobile IPv6 mobility management, *IETF Internet Draft*, work in progress (2003).
- 12) Campbell, A., et al.: Design, Implementation, and evaluation of Cellular IP, *IEEE Personal Commun.*, pp.42–49 (2000).
- 13) Ramjee, R., et al.: HAWAII: A domain-based approach for supporting mobility in wide-area wireless networks, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.10, No.3, pp.396–410 (2002).
- 14) Liebsch, M., et al.: Candidate access router discovery, *IETF Internet Draft* (2003).
- 15) Loughney, J., et al.: Context transfer protocol, *IETF Internet Draft*, work in progress (2003).
- 16) Bettstetter, C.: Smooth is Better Than Sharp: A Random Mobility Model for Simulation of Wireless Networks, *MSWiM'01*, pp.19–27 (2001).

(平成 15 年 7 月 10 日受付)

(平成 16 年 2 月 2 日採録)



萬代 雅希 (学生会員)

1996 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業．1998 年同大学大学院修士課程修了．同年ソニー (株) 入社．現在慶應義塾大学大学院博士課程在学中．主として，通信ネットワークに関する研究に従事．IEEE，電子情報通信学会各会員．



笹瀬 巖 (正会員)

1979 年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業．1984 年同大学大学院博士課程修了．同年オタワ大学理工学部電気工学科ポストドクトラルフェロー，1986 年慶應義塾大学理工学部電気工学科助手，1988 年同大学専任講師，1992 年同助教授，1999 年同大学理工学部情報工学科教授，現在に至る．主として，デジタル通信，通信ネットワーク，光通信理論，マイクロ波通信，非線形通信システム，通信理論，符号理論に関する研究に従事．工学博士．1984 年度 IEEE COM . SOC . 学生論文賞，1987 年第 3 回井上研究奨励賞，1988 年第 1 回安藤博記学術奨励賞，1988 年篠原記念学術奨励賞，1996 年度電子情報通信学会交換システム研究会優秀論文賞受賞．IEEE Senior Member，情報理論とその応用学会，電子情報通信学会各会員．