

推薦論文

組み込み機器向け Mobile IPv6 プロファイル

松谷 宏 紀[†], 湧川 隆 次^{††}
植原 啓 介^{††}, 村井 純[†]

センサや情報家電に Mobile IPv6 を適用すると、機器をつねに一意なアドレスで識別できるため、機器の利便性が向上する。しかし、これらの機器では計算機資源の制限が厳しく、Mobile IPv6 のすべての機能を適用することは望ましくない。そこで、本研究では組み込み機器向け Mobile IPv6 プロファイルを提案し、組み込み機器での Mobile IPv6 の利用を実現する。本プロファイルは必須部分とオプション部分に分かれている。必須部分は他のシステムとの互換性および相互接続性を維持するために必須であるが、オプション部分は対象機器の特性に応じて選択的に用いることができる。本プロファイルは Mobile IPv6 の機能から、機器が必要とする機能のみを選択して適用可能にする。本プロファイルに準拠した Mobile IPv6 スタックを様々な機器に実装し、他の Mobile IPv6 スタックと通信させてその相互接続性を確認した。また、詳細な動作実験を行うことで本プロファイルの正当性を確認した。さらに、本プロファイルを実際のシステム設計に応用する方法を提示した。

Mobile IPv6 Profile for Embedded Systems

HIROKI MATSUTANI,[†] RYUJI WAKIKAWA,^{††} KEISUKE UEHARA^{††}
and JUN MURAI[†]

In this paper, we propose Mobile IPv6 profile for embedded systems. The purpose of applying Mobile IPv6 to these appliances is to improve their convenience and possibility, because we can identify them using a same address at any time. But it is not desirable to apply all the Mobile IPv6 features to the appliances used in embedded systems, because of their limited resources. Therefore, we provide the profile to apply only essential parts of Mobile IPv6 to these appliances. The profile consists of the required part and the optional part. The required part must be supported to keep interoperability and compatibility with Mobile IPv6, but the optional part is selected by each devices' characteristic. We implemented Mobile IPv6 with our profile on many devices and tested them with other Mobile IPv6 implementations to justify interoperability. We also conducted conformance tests to verify correctness of the implementation. We also show how to utilize the profile for appliances in the process of system design.

1. はじめに

次世代インターネットプロトコルとして実験的に運用されていた IPv6 (Internet Protocol, Version 6)¹⁾ は、すでに商用サービスが開始され、様々な IPv6 対応機器が登場するなど社会に定着しつつある。IPv6 にはいくつかの特徴があるが、その中でも、広大なアドレ

ス空間とアドレス自動設定機能²⁾ は多数の機器を無設定でネットワークに接続可能にする。そのため、IPv6 はセンサや情報家電などの組み込み機器への応用が期待されている。このような状況を背景に、組み込み機器を対象とした IPv6 スタックが発表され³⁾、IPv6 を利用した機器制御の実用例も報告されている⁴⁾。一方、デジタル化によって進化をとげた情報家電の分野では、ネットワーク対応機器が発売されるなどネットワーク化が進んでおり、今後、IPv6 が組み込み分野における基盤技術となることが期待されている。

[†] 慶應義塾大学環境情報学部
Faculty of Environmental Information, Keio University

^{††} 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University

現在、慶應義塾大学大学院理工学研究所
Presently with Graduate School of Science and Technology, Keio University

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。

IPv6 アドレスは、ネットワークを識別するネットワークプレフィックスと、ホストのインタフェースを識別するインタフェース ID から構成される。ノードがネットワーク間を移動すると、ネットワークプレフィックスすなわちノードのアドレスが変化し、以下の問題が発生する。

- (1) 通信相手は移動したノードのアドレスを識別できなくなり、通信を開始できなくなる。
- (2) 通信中のセッションが切断される。

組み込み機器においては、意図せず他のネットワークに持ち運ばれたり、ネットワーク運用上の都合からネットワークプレフィックスが変更されたりと、機器のアドレスが変化する機会は多い。

しかし、組み込み機器は環境に深く埋め込まれたり、数多く設置されたりすることがある。必ずしも、ネットワーク設定のためのインタフェースを備えているとは限らない。このように、組み込み機器のアドレスの変化を把握し管理することは繁雑かつ困難である。

上記の (1) の問題を解決するにはダイナミック DNS⁵⁾ が利用できるが、(1) と (2) を同時に解決するには移動透過性¹⁾ と着信可能性²⁾ を保証する必要がある。そのための通信プロトコルとして Mobile IPv6⁶⁾ が提案されており、現在、IETF (Internet Engineering Task Force) においてその標準化作業が進行中である。

組み込み機器における Mobile IPv6 の利用形態として、本研究では以下の 2 種類を想定している。

- 機器のユーザが、その機器の移動に対して移動透過性と着信可能性を保証する場合：
機器が使用するアドレスは、必要に応じてユーザが割り当てる³⁾。
- 機器のメーカーが、ネットワークトポロジに依存しないアドレスをそれぞれの機器に付与する場合：
機器が使用するアドレスは、メーカーが機器の製造時などに割り当てることができる⁴⁾。

特に後者に関しては、機器のアドレスが変化しないので、メーカーは機器の常時モニタリングなど、ネットワークを利用したサービスを提供しやすくなる。この

ような Mobile IPv6 の応用は、IPv6 普及・高度化推進協議会⁸⁾ のアドレスポリシ WG でも検討されており、家電メーカーを対象としたヒアリングでは組み込み機器への Mobile IPv6 実装コストなどが指摘された。

IPv6 を用いた組み込み機器制御において、Mobile IPv6 が有用な場面は多いが、実装サイズやコストによっては Mobile IPv6 の適用が困難な場合が想定される。そこで、本研究では、移動体通信プロトコル Mobile IPv6 を組み込み機器に容易に適用可能にすることを目的とする。

本論文では、まず、2 章で組み込み機器向け Mobile IPv6 プロファイルの必要性を述べ、3 章で本プロファイルの内容を説明する。そして、4 章で本プロファイルの評価を行い、5 章で本論文をまとめる。

2. 組み込み機器における Mobile IPv6

本章では、まず、2.1 節で本研究の検討対象を明確にする。2.2 節で Mobile IPv6 の概要を説明する。そして、組み込み機器を対象に、2.3 節で Mobile IPv6 を利用する際の問題点をあげ、2.4 節で問題解決のアプローチを説明する。2.5 節でその関連研究をあげる。

2.1 本研究の検討対象

本研究の検討対象は、以下の条件を満たす組み込み機器とする。

- (1) PC のような汎用性を持たずに特定機能に特化している。
- (2) 限られた資源とコストの制約下でネットワーク機能を有する。
- (3) ルータではなく、ホストである。
- (4) 自身がネットワーク間を移動するための移動透過性および着信可能性を有する。

情報家電向け IPv6 最小要求仕様案⁹⁾ は、INTAP¹⁰⁾ 内に設置された情報家電安全性技術委員会によって検討され、上記の条件 (1) ~ (3) を満たす機器を検討対象としている。本研究ではこれらの機器に Mobile IPv6 を適用し移動透過性と着信可能性を保証する。よって、本研究では検討対象として上記のとおり条件 (4) を追加した。

2.2 Mobile IPv6 の概要

図 1 に示すとおり、Mobile IPv6 には、移動ノード (Mobile Node: MN)、通信相手 (Correspondent Node: CN)、ホームエージェント (HA) が存在する。

MN が論理的に存在し続けるネットワークをホームリンクと呼ぶ。図 1 のように MN が物理的にホームリンク外にいても、MN はホームリンク内で使用するアドレス (Home Address: HoA) を引き続き使用する。

¹⁾ ノードが移動しても確立されたコネクションを維持できること。

²⁾ ノードの識別子が移動によって変化しないこと。

³⁾ ユーザは、インターネットサービスプロバイダ (ISP) から、IPv6 アドレスブロックを割り当てられている必要がある。

⁴⁾ メーカーは、ISP に依存しないメーカー固有の IPv6 アドレスブロックを割り振られている必要がある。ただし、現状の IPv6 アドレス割り振りポリシー⁷⁾ では、ISP でないメーカーが、地域インターネットレジストリから IPv6 アドレスブロックの割振りを受けることは難しい。

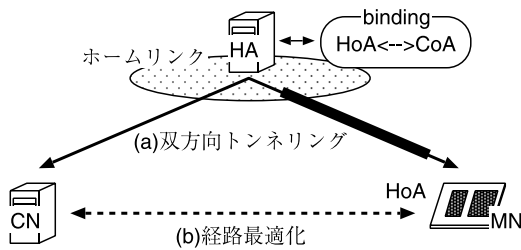


図 1 Mobile IPv6 プロトコルの概要

Fig. 1 Overview of Mobile IPv6 protocol.

つまり、MN がどのリンクを訪問していても HoA が変化することなく、CN はつねに HoA を用いて MN を識別できる。

HoA とは別に、MN が訪問先リンクで付与されるアドレスを気付けアドレス (Care-of Address: CoA) と呼ぶ。CoA は Mobile IPv6 の内部処理において、MN の現在位置すなわち HoA 宛パケットの実際の送信先アドレスとして利用される。

HoA と CoA の対応付けを binding と呼ぶ。HA はホームリンクに接するノードであり、この binding を管理する。MN はネットワークの移動を検出するたびに、HA に対し新たな binding を通知し、HA が持つ binding 情報を更新する。

MN と CN 間の通信には、図 1 (a) または (b) の経路が利用される。

(a) 双方向トンネリング:

MN と HA 間は双方向でトンネリングされ、すべての通信は HA を中継する。最も基本的な経路であるが、HA を中継するためのオーバーヘッドがある。

(b) 経路最適化:

HA を中継せず MN と CN が直接通信できるため、通信効率が低下しない。ただし、MN および CN が経路最適化機能に対応している必要がある。

経路最適化を利用する場合、MN は CN に対して binding の通知を行う。CN は binding を持つことで、HoA を用いて MN と直接通信できるようになる。MN が CN に binding を通知するには、MN と CN 間で認証を行う必要があり、そのための手続きを return routability と呼ぶ。経路最適化すなわち return routability は、MN が CN に対して要求する。

なお、不正な binding 情報の通知はセキュリティ上問題であるため、MN と HA 間の binding 情報のやり取りに、IPsec¹¹⁾ を使用する必要がある。

本研究では、経路最適化機能を除いた MN の機能

を Basic-MN 機能と定義する。また、MN 側の経路最適化機能を RO-MN 機能、CN 側の経路最適化機能を RO-CN 機能と定義する。

2.3 問題意識

組み込み機器は PC などの汎用的な機器と異なり、使用される環境や状況がある程度限定できるため、それらに沿った必要な機能の選択が可能となる。

また、一般的に、組み込み機器は PC などと比較すると、圧倒的に計算機資源が限られていることが多い。たとえば、文献 12) では 20 MHz で動作する 16 bit CPU 上で、23 KByte 程度の大きさの IPv6 スタックを動作させてセンサなどの制御を行っている。

Mobile IPv6 は移動透過性と着信可能性を保証するための機能以外に、いくつかの付加機能を持つ。機器の用途によってはこれらの付加機能は必ずしも必要ないが、不用意に機能を削ると、他の Mobile IPv6 スタックとの相互接続性が失われかねない。相互接続性がなければ、標準化が期待される Mobile IPv6 を利用するメリットは半減する。

2.4 解決のアプローチ

前節で述べた問題を解決するためには、機器の利用目的や環境に応じて、どのような Mobile IPv6 の機能を選択すればよいかを明確にする必要がある。

このとき、他の Mobile IPv6 スタックとの相互接続性が失われることは望ましくない。つまり、どのような機能の組合せで Mobile IPv6 スタックを構築しても、他の Mobile IPv6 スタックとの相互接続が可能でなければならない。

以上の要件を満たすには、以下に示す 2 種類のアプローチが想定される。どちらのアプローチを採用しても、設計対象の利用目的や環境からどのような Mobile IPv6 の機能が必要なのか導くことができる。

- (1) まず、Mobile IPv6 を用いた機器の制御にはどのような利用目的や環境があるか分類する。次に、分類された各ケースごとに Mobile IPv6 のどのような機能が必要か検討する。そして、各ケースごとに、必要でない機能を省いた Mobile IPv6 が性能や相互接続性に及ぼす影響を調べる。
- (2) まず、Mobile IPv6 によって実現できる機能を分類する。次に、分類した各機能が省略可能であるか、また省略した場合の性能や相互接続性に及ぼす影響について検討する。その結果をもとに、省略可能な機能を省いた Mobile IPv6 スタック全体の性能や相互接続性に及ぼす影響を調べる。

双方のアプローチとも、最初に行う分類作業が最終的な検討結果に大きな影響を与えるため、全体に対する網羅的な整理が必要となる。

前者の「組み込み機器が利用されるケースすべての網羅的な洗い出し」は非常に困難である。一方、後者の「Mobile IPv6 によってどのような機能が実現できるか」は仕様から明らかであり、より網羅性を持った正確な分類ができるので、本研究では後者のアプローチを採用した。

本研究では、後者のアプローチによる Mobile IPv6 の機能ごとの分類および相互接続性を確保したうえでの機能の再構成方法を、組み込み機器向け Mobile IPv6 プロファイル¹³⁾として定義した。

本プロファイルに基づくことで、相互接続性を確保したうえで不要な機能を省いた組み込み機器向け Mobile IPv6 スタックを容易に実装できるようになる。

2.5 関連研究

2.1 節で説明したとおり、INTAP 情報家電安全性技術委員会によって情報家電向け IPv6 最小要求仕様案が検討された。文献 14) では同仕様案に基づき、各機能を必要性に応じて階層化する枠組みについて提案している。また、文献 15) では情報家電の遠隔操作のために、TinyIPv6 と呼ばれる TCP/IPv6 のサブセットを提案している。一方、携帯電話の分野では、3GPP (3rd Generation Partnership Project) の規格に IPv6 サポートが盛り込まれている¹⁶⁾。

以上の関連研究では、情報家電自身が IPv6 ネットワークを移動する場合の移動透過性を必須としていない。3GPP では、次世代アーキテクチャに Mobile IPv6 を導入することを検討しているが、詳細仕様は現在検討中である¹⁷⁾。このような背景をうけて、本研究では情報家電に適した Mobile IPv6 とは何かを中心に議論する。

3. 組み込み機器向け Mobile IPv6 プロファイル

本プロファイルは Mobile IPv6 の仕様⁶⁾、HA と MN 間の IPsec の仕様¹⁸⁾ を満たすように設計する。本研究ではネットワーク間を移動する機器が対象なので、固定ノードである HA の機能は対象外とし MN と CN の機能に注目する。

本研究では上記の仕様で定められた機能を必須プロファイルと付加的プロファイルに分類した。必須プロファイルは使用が義務付けられた機能で構成され、付

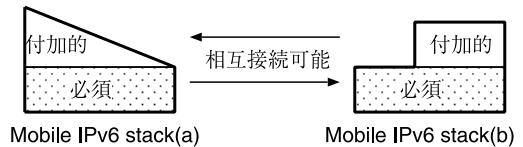


図 2 必須および付加的のプロファイルについて

Fig. 2 Required and optional profile.

加的プロファイルは実際に使用するか任意である機能で構成される。使用が任意であれば、実装が義務付けられた機能も付加的プロファイルに含める。図 2 は、本プロファイルに基づいた Mobile IPv6 スタックどうしが相互に通信している様子を表している。図に示すとおり、必須プロファイルの機能は、他との相互接続性を維持するために実装の省略や動作の変更はできない。一方、付加的プロファイルの機能は、機器の特性に応じて自由に選定することができる。

本章では、まず、3.1 節で必須プロファイルに含まれる機能を明確にする。次に、3.2 節で付加的プロファイルに含まれる機能を分類し、各機能の省略が相互接続性や性能に及ぼす影響について検討する。本章で検討したことの正当性は、4 章で実際の実装を用いた動作確認および性能測定を行い確認する。

3.1 必須プロファイル項目

必須プロファイルは、自身の移動透過性と着信可能性を保証するために最低限必要な機能で構成される。

● Basic-MN 機能

- 自身の移動透過性と着信可能性を保証するには、
- (1) binding 通知の送信側のメッセージ送受信。
 - (2) Mobile IPv6 に関連した IPv6 拡張ヘッダの挿入と解釈。
 - (3) HA を介した双方向トンネリングに使用する IPv6 カプセル化および脱カプセル化。
 - (4) 自身の binding を持つ通信相手を記録するデータベース (Binding Update List) の管理。
 - (5) ネットワークの移動を検知する機能。
- が必要になる。

Binding Update List の管理は、最低限、HA の情報を管理できればよい。また、RO-CN 機能を持たないため、経路最適化を要求してきた通信相手に対して ICMP error を返信する必要がある。さもないと、通信相手は無駄に経路最適化を要求し続ける。

経路最適化を利用する場合、RO-MN 機能や RO-CN 機能が必要となる。また、ホームリンクにおけるネットワークプレフィックスの変更や returning home などが発生する場合、それぞれ対応する機

能が必要となる。

- IPsec を用いた binding 通知の保護¹⁸⁾
 計算機資源の制限から、IPsec の利用が難しい場合が想定される。Mobile IPv6 のシグナリングに IPsec を適用しない場合、HA と MN の両方に変更が必要であり相互接続性が失われる。
 しかしながら、この機能に関しては、今現在、仕様が安定しておらず、本論文ではこれ以上扱わない。

3.2 付加的プロファイル項目

付加的プロファイルに含まれる機能は、必須プロファイルに加えて、必要に応じて用いることができる。

付加的プロファイルには経路最適化機能が含まれる。本プロファイルでは 2.2 節で説明したとおり、経路最適化機能は MN 側と CN 側の機能に分けて考える。

- RO-MN 機能
 経路最適化を開始するには、
 (1) return routability の開始側に必要なメッセージの送受信、
 (2) 認証に使用するハッシュ関数 HMAC_SHA1、
 (3) Binding Update List の管理機能、
 が必要になる。

return routability を要求した相手から ICMP error が返信された場合、通信相手は RO-CN 機能を持たないので、しばらく、その通信相手に経路最適化を要求すべきでない。

経路最適化は、MN が CN に対して任意のタイミングで開始できる。よって、MN がこの機能を持たなくても他との相互接続性に影響はない。

- RO-CN 機能
 通信相手の経路最適化を可能にするには、
 (1) return routability の応答側に必要なメッセージの送受信、
 (2) 認証に使用するハッシュ関数 HMAC_SHA1、
 (3) binding 通知の受信側のメッセージ送受信、
 (4) Mobile IPv6 に関連した IPv6 拡張ヘッダの挿入と解釈、
 (5) binding の管理機能、
 が必要になる。

通信相手の経路最適化を許可するかどうかは CN の任意であるため、この機能はつねに省略可能である。MN の通信相手がすべて固定ノードであれば、その MN は通信相手に対して CN として振る舞う(相手の経路最適化を可能にする)必要はなく、この機能は不要となる。ただし、省略する場合は return routability を要求してきた通信相手に対して ICMP error を返信しなければならない。

さもないと、通信相手は無駄に return routability を要求し続ける。

その他、付加的プロファイルに含まれる主な機能を以下にあげる。

- Mobile Prefix Discovery⁶⁾
 Mobile IPv6 の運用形態によっては、ホームリンクにおけるネットワークプレフィックス(ホームプレフィックス)を変更しない場合がある。その場合、機器が新たにホームプレフィックスを解決する必要はなく、省略可能となる。
- Returning Home⁶⁾
 Mobile IPv6 の運用形態によっては、機器がホームリンクに戻れない場合がある。その場合、returning home は発生せず、省略可能となる。
- Dynamic Home Agent Address Discovery⁶⁾
 機器があらかじめ有効な HA のアドレスを記憶している場合、動的に HA のアドレスを解決する必要はなく、省略可能となる。

- Remote Home Address Configuration⁶⁾
 ホームプレフィックスを変更しない場合や機器が常時稼働している場合、機器がホームプレフィックス情報を失うことはなく、省略可能となる。

さらに、本プロファイルに Mobile IPv6 の仕様外の機能を加えた例として、以下をあげる。

- Interface Switching¹⁹⁾
 複数の通信インタフェースを持つ場合、各インタフェースにそれぞれ CoA が付与される。通信状況やポリシーに応じて使用する CoA を変更することで、つねに最適な通信インタフェースを用いて通信できるようになる。そのためには、利用可能な CoA のリスト、インタフェース切替えポリシーを管理する必要がある。Interface Switching は Mobile IPv6 の仕様で明記されていないので、この機能を持たなくても相互接続性に影響はない。

4. 本プロファイルの評価

2.3 節であげた問題を解決するには、相互接続性を確保したうえでの Mobile IPv6 機能の選定が可能であり、Mobile IPv6 の実現に必要な計算機資源量を低減できなければならない。そこで、本研究では以下に示す 2 種類の実験およびその考察を行い、本プロファイルの評価とする。

- 本プロファイルの正当性について：
 本プロファイルを基に作成した Mobile IPv6 スタックが、他と相互に通信可能であるか、また、本プロファイルの期待どおりに動作しているか確

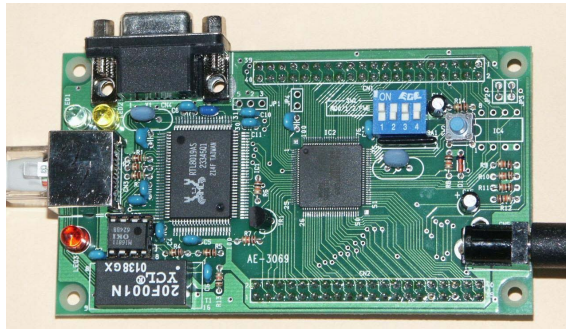


図 3 評価実装の外観

Fig. 3 Appearance of an implementation for evaluation.

表 1 2 種類のハードウェア構成
Table 1 Two kinds of hardware specs.

	type 1	type 2
CPU	H8/3048F 16 MHz	H8/3069F 20 MHz
ROM	128 KByte EEPROM	512 KByte EEPROM
RAM	128 KByte SRAM	2 MByte DRAM
I/F	Ethernet (10BaseT)	Ethernet (10BaseT)

認する。

- 本プロファイルの有効性について：
本プロファイルを用いて実際の機器設計を行い、いかにして不要な機能を見つけるか、また、どの程度コードサイズを縮小できたか確認する。

以上の評価を行うには、実際に Mobile IPv6 スタックを用いた動作確認および性能測定を行う必要がある。そのためのテストベットとして、4.1 節で評価実装の作成について説明し、4.2 節で評価実装自体の正当性を確認する。次に、この評価実装を用いて、4.3 節で本プロファイルの正当性を示し、4.4 節で本プロファイルの有用性の高さを示す。

4.1 評価実装の作成

本研究では、本プロファイルの評価のために評価実装を作成した。作成した評価実装の外観を図 3 に示す。本節では、評価実装についてハードウェア、リアルタイム OS、IPv6 スタック、Mobile IPv6 スタックの順に説明する。

まず、センサや情報家電への適用を想定して実験用ハードウェアを選定した。ほぼ同様の構成で性能の違う 2 種類のハードウェアを用意した (表 1)。ソフトウェアの開発には、GNU Development Tools for the Renesas H8/300[HS] Series²⁰⁾ を使用した。

上記のハードウェア上に、組み込み分野で多く用いられる μ ITRON4.0²¹⁾ 準拠のリアルタイム OS を実装した。このリアルタイム OS は μ ITRON4.0 の仕様に準拠したシステムコールを 79 種類備えるが、評価

実装が特定の OS に強く依存することを避けるため、評価実装からは基本的なシステムコールのみを利用した。利用しないシステムコールを削ることで、カーネルのコードサイズを 5,860 Byte まで抑えた。

μ ITRON 上で動作する IPv6 スタックを設計し実装した。IPv6 スタックの設計では、メモリバッファやデバイスドライバなど、BSD 系 OS におけるネットワークプロトコルスタックの特徴を多く採り入れた。TCP など本研究では使用しない機能を削ったので、評価実装の IPv6 スタックのコードサイズはデバイスドライバを含めて 12,858 Byte となった。

上記の IPv6 スタックを拡張して Mobile IPv6 スタックを構築した。その際、Mobile IPv6 関連のメッセージの処理や binding の管理など、大部分の処理に SFCMIP²²⁾ のコードを再利用した。SFCMIP は BSD 系 OS で動作する Mobile IPv6 スタックである。評価実装の IPv6 スタックは BSD 系 OS の IPv6 スタックに構造が近いので、評価実装の一部を拡張するだけで SFCMIP のコードを再利用できた。

この Mobile IPv6 スタックは本プロファイルに基づいたモジュール化がされている。コンパイル時にオプションを指定することで、付加的なプロファイルに含まれるそれぞれの機能を含めるかどうか選択できる。

大規模な組み込みソフトウェア開発では、実機でのデバッグ作業は効率的でない。そこで、PC UNIX 上で動作する μ ITRON シミュレータを作成し、IPv6 および Mobile IPv6 スタックのデバッグに利用した。

4.2 相互接続実験による評価実装の正当性確認

評価実装自体の正当性を確認しなければ、評価実装を本プロファイルの評価に用いることはできない。そこで、本研究で作成した評価実装を 2 つの国際的な相互接続実験に出展しその正当性を確かめた。

2003 年 1 月に開催された 4th TAHI IPv6 Interoperability test event²³⁾ では、本実装が SFCMIP を

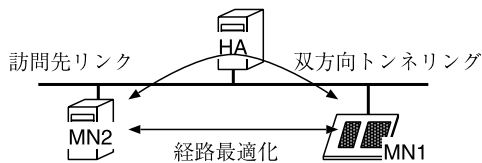


図 4 評価のためのネットワーク構成
Fig.4 Network topology for evaluation.

表 2 MN1 と MN2 間の Ping6 RTT (1,000 回平均)
Table 2 Ping6 RTT between MN1 and MN2
(1,000 averages).

	RTT (msec)
双方向トンネリング	4.381
経路最適化	3.311
直接通信 (No Mobile IPv6)	2.439

MN1: H8/3069F 20MHz, 評価実装
MN2: Pentium II 450MHz, SFCMIP
HA: MMX Pentium 166MHz, SFCMIP

含む 4 種類の Mobile IPv6 スタックと相互に通信可能であることを確認した。テストツールを用いたパフォーマンステストでは、未実装の箇所を指摘されたが、指摘された箇所を修正することで評価実装の完成度は高まった。

2003 年 3 月に開催された Connectathon 2003²⁴⁾ においては、本実装が 5 種類以上の Mobile IPv6 スタックと相互に通信可能であることを確認した。

4.3 本プロファイルの正当性に関する実験

本プロファイルの正当性を示すため、本プロファイルを基に作成した Mobile IPv6 スタックが、一般的によく知られた Mobile IPv6 スタックと相互に通信可能であるか、また、本プロファイルの期待どおりに動作しているか確認する。

実験に使用するネットワーク構成を図 4 に示す。図中の MN1 は、本プロファイルを基に作成した実験対象で、図中の MN2 と HA は Mobile IPv6 スタックとして SFCMIP が動作する PC である。通信の遅延などに影響する外的要因を最小にするため、HA, MN1, MN2 を同一リンクに設置した。

この環境において、MN1 と MN2 間の通信が、双方向で経路最適化された場合と HA を介してトンネリングされた場合の通信の遅延を比較するため、ping6 (56 Byte data) を用いて Round-Trip Time (RTT) を測定した。その結果は表 2 に示すとおりで、双方向トンネリングによって通信の遅延が増大した。

本来ならば、本プロファイルによって分類された各機能に対し、想定されるすべての組合せで動作確認を行う必要がある。しかし、組合せ数が膨大になるため、本研究では以下の方針で動作確認を行った。

表 3 評価実装 A~F がサポートする機能
Table 3 Sample A~F's functions supported.

	A	B	C	D	E	F
Basic-MN 機能	O	O	O	O	X	X
RO-MN 機能	O	O	X	X	X	X
RO-CN 機能	O	X	O	X	O	X

O : サポート X : 未サポート

表 4 評価実装 A~F のコードサイズ (Byte)
Table 4 Sample A-F's code size (Byte).

	A	B	C
kernel	5,860	5,860	5,860
applications	2,370	2,370	2,370
transport layer	596	596	596
network layer	27,466	20,138	23,024
datalink layer	2,212	2,212	2,212
hmac sha1	3,980	3,980	3,980
misc	3,710	3,686	3,706
total	46,194	38,842	41,748
	D	E	F
kernel	5,860	5,860	5,860
applications	2,370	2,370	2,370
transport layer	596	596	596
network layer	15,732	18,274	10,050
datalink layer	2,212	2,212	2,212
hmac sha1	0	3,980	0
misc	3,410	3,610	3,110
total	30,180	36,902	24,198

- (1) 必須機能だけで動作確認を行う。
- (2) 機能変更が複雑な経路最適化機能に関しては、想定されるすべての組合せで動作確認を行う。

(1) に関して、図 4 の環境において、必須機能のみを持つ評価実装を MN1 として動作確認を行った。その結果、付加機能を持たなくても移動透過性と着信可能性を実現し、MN1 と MN2 間の通信が HA を介した双方向トンネリングになるなど本プロファイルの期待どおりに動作した。よって、(1) に関して、本プロファイルの正当性を確認できた。

(2) に関して、想定される組合せは 6 種類あり、6 種類の評価実装 A~F を作成した。評価実装 A~F がそれぞれサポートする機能を表 3 にまとめる。

A~D は移動ノード用の実装である。A は完全な経路最適化機能を持つが、B~D は一部またはすべての経路最適化機能を持たない。一方、E~F は固定ノード用の実装である。E は CN 機能を持つが、F は Mobile IPv6 の機能をいっさい持たない。なお、E と F は、Basic-MN 機能を持たないので本プロファイルの対象外であるが、比較のために実装した。参考までに、表 4 に評価実装 A~F のコードサイズを示す。

図 4 の環境で、評価実装 A~D を MN1 としてそれ

表 5 MN1, MN2 間の経路
Table 5 Routing between MN1 and MN2.

		A	B	C	D
MN1(target)	MN2	O	O	X	X
MN1(target)	MN2	O	X	O	X

O : 経路最適化 X : HA を介したトンネリング

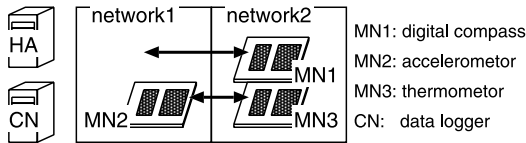


図 5 実験の概要

Fig. 5 Overview of the experiment.

ぞれ動作確認を行った。その結果、MN1 から MN2、および、MN2 から MN1 の通信経路は表 5 に示すとおりとなり、すべて期待どおりに動作した。また、RO-CN 機能を持たない B および D が、通信相手から return routability を要求された際に、ICMP error を返信し RO-CN 機能がないことを明示できることを確認した。よって、(2) に関して、本プロファイルの正当性を確認できた。

4.4 本プロファイルの有用性に関する実験

本プロファイルの有用性の高さを示すため、本プロファイルを用いて実際の機器設計を行い、いかにして不要な機能を見つめるか、また、どの程度コードサイズを縮小できたか確認する。なお、設計した機器は、2003 年 3 月 12 日に慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスで開催された InternetCAR Workshop2003 の実験²⁵⁾ で利用された。

本実験では、センサに Mobile IPv6 を適用し移動透過性及着信可能性を実現する。図 5 に示すように、方位センサを制御する MN1、加速度センサを制御する MN2、温度センサを制御する MN3 を用意する。これらの MN は 2 つのネットワーク間を移動する。図中の CN は 0.5 秒ごとに各 MN からセンサ情報を取得しグラフ化する。MN がネットワーク間を移動しても、CN はつねに同じアドレスを用いて MN からセンサ情報を取得できる。

センサを制御する MN1 ~ MN3 のハードウェアおよびソフトウェアは、前章で説明した評価実装と同じである。CN と HA は、OS として FreeBSD4.6.2、Mobile IPv6 スタックとして SFCMIP が動作する PC である。

各 MN とデータ通信を行うのは 1 台の CN のみである。MN と CN 間のデータ通信として、0.5 秒ごとに 8 Byte 程度のセンサ情報が交換される。データ通

表 6 MN1 ~ MN3 がサポートする機能
Table 6 MN1~MN3's functions supported.

	MN1	MN2	MN3
Basic-MN 機能	O	O	O
RO-MN 機能	O	O	X
RO-CN 機能	X	X	X
dynamic HA discovery	O	O	O

O : サポート X : 未サポート

信の間隔は固定で通信量は少ないといえる。

各 MN がサポートする Mobile IPv6 の機能を選定するに際し、各 MN の利用形態について検討する。

- (1) 本実験では、通信量は少ないが、通信の遅延の許容度は制御するセンサに依存するといえる。MN3 が制御する温度センサは、比較的値の変化が少なく通信の遅延は問題とならない。一方、MN1 の方位センサおよび MN2 の加速度センサに関しては、値の変化が厳しく、通信の遅延はデータ測定において致命的な問題となる。よって、自身が移動する場合の経路最適化を MN1 と MN2 は使用し、MN3 は使用しない。
- (2) 本実験では、各 MN の通信相手は固定ノードである CN に限定されている。よって、通信相手から経路最適化を要求されることはない。
- (3) 本実験では、ネットワーク管理を柔軟にするため、各 MN で dynamic home agent address discovery を使用する。

以上の検討結果を基に、MN1 ~ MN3 がそれぞれサポートする機能を選定した。その結果を表 6 に示す。上記の条件 (1) より、MN1 および MN2 は RO-MN 機能を持つが、MN3 は持たない。条件 (2) より、MN1 ~ MN3 は RO-CN 機能を持たない。条件 (3) より、MN1 ~ MN3 は dynamic home agent address discovery 機能を持つ。

MN1 および MN2 のコードサイズは表 4 の B とほぼ同じとなり、経路最適化機能のみに注目しても、全体のコードサイズが約 16% 削減された。また、MN3 のコードサイズは表 4 の D とほぼ同じとなり、同様に、全体のコードサイズが約 35% 削減された。

以上より、温度センサを制御する MN3 は、双方向トンネリングによる遅延が問題にならないため、経路最適化機能を省略して大幅にコードサイズを削減できた。また、経路最適化機能を省略しても SFCMIP など他の Mobile IPv6 スタックとの相互接続性を維持できた。方位センサおよび加速度センサを制御する MN1 と MN2 は、経路最適化機能を持つことによりデータ測定の精度を保つことができた。

5. ま と め

本研究では、組み込み機器向け Mobile IPv6 プロファイルを作成した。本プロファイルに準拠した評価実装を作成し、詳細な動作確認および他のシステムとの相互接続性を確認した。その結果、本プロファイルによって相互接続性を維持しつつ Mobile IPv6 機能を選択的に適用できることを確認した。さらに、本プロファイルは実際の機器設計でも応用され、不要な機能の発見およびコードサイズの大幅な削減を実現した。以上より、機能を限定することが余儀なくされる組み込み分野において、他の Mobile IPv6 スタックとの相互接続性を維持するためには、本プロファイルの利用が効果的であることが確認された。

今後は、情報家電の分野において、本プロファイルを有効に活用したアプリケーションを提案していきたい。

参 考 文 献

- 1) Deering, S. and Hinden, R.: *Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification*, RFC 2460 (1998).
- 2) Thomson, S. and Narten, T.: *IPv6 Stateless Address Autoconfiguration*, RFC 2462 (1998).
- 3) 株式会社エルミックシステム,
<http://www.elmic.co.jp/> (2004-08-19).
- 4) e-ケアタウンふじさわ,
<http://ecare.sfc.keio.ac.jp/> (2004-08-19).
- 5) Vixie, P., Thomson, S., Rekhter, Y. and Bound, J.: *Dynamic Updates in the Domain Name System (DNS UPDATE)*, RFC 2136 (1997).
- 6) Johnson, D., Perkins, C. and Arkko, J.: *Mobility Support in IPv6* (2003). Work in Progress, draft-ietf-mobileip-ipv6-24.txt
- 7) APNIC, ARIN and RIPE: *IPv6 Address Allocation and Assignment Policy* (2002).
- 8) IPv6 普及・高度化推進協議会,
<http://www.v6pc.jp/> (2004-08-19).
- 9) Okabe, N., Sakane, S., Inoue, A., Ishiyama, M. and Esaki, H.: *Host Requirements of IPv6 for Low Cost Network Appliances* (2002). Work in Progress, draft-okabe-ipv6-lcna-minreq-02.txt
- 10) INTAP, <http://www.intap.or.jp/> (2004-08-19).
- 11) Kent, S. and Atkinson, R.: *Security Architecture for the Internet Protocol*, RFC 2401 (1998).
- 12) 松谷宏紀, 湧川隆次, 村井 純: インターネット自動車のためのセンサーノードの設計と実装 (デモンストレーション), インターネットコンファレンス 2002 論文集, p.121 (2002).
- 13) 松谷宏紀, 湧川隆次, 植原啓介, 村井 純: 組み込み機器向け Mobile IPv6 プロファイルの設計, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2003) シンポジウム論文集, pp.101-104 (2003).
- 14) 森年源吾, 阿部公輝: IPv6 最小仕様案に関する提案および FPGA 実装と評価, 情報処理学会情報家電コンピューティング研究グループ第 4 回研究会 (2002-IAC-4), pp.37-44 (2002).
- 15) Izuohara, Y., Morita, K., Tateoka, T. and Abe, K.: Specification of TinyIPv6 Protocol Stack for Remote Control and Its Implementation on FPGA, *IPJS Journal*, Vol.43, No.11, pp.3540-3548 (2002).
- 16) 3rd Generation Partnership Project: *Technical Specification Group Services and System Aspects; Architectural requirements (Release 5)*, TS 23.221 V1.0.0 (2000).
- 17) Soliman, H.: *Mobile IPv6 — Mobility in a Wireless Internet*, Addison Wesley (2004).
- 18) Arkko, J., Devarapalli, V. and Dupont, F.: *Using IPsec to Protect Mobile IPv6 Signaling between Mobile Nodes and Home Agents* (2003). Work in Progress, draft-ietf-mobileip-mipv6-ha-ipsec-06.txt
- 19) 湧川隆次: Mobile IPv6 を用いた複数インタフェース通信機構の設計と実装, 修士論文, 慶應義塾大学政策・メディア研究科 (2001).
- 20) GNU Development Tools for the Renesas H8/300[HS] Series,
<http://h8300-hms.sourceforge.net/> (2004-08-19).
- 21) ITRON Committee, TRON ASSOCIATION: μ ITRON4.0 Specification Ver. 4.00.00 (2002).
- 22) 湧川隆次, 植原啓介, 村井 純: 移動体通信プロトコル Mobile IPv6 の実装および評価, インターネットコンファレンス 2000 論文集, pp.95-102 (2000).
- 23) TAHI Project, <http://www.tahi.org/> (2004-08-19).
- 24) Connectathon,
<http://www.connectathon.org/> (2004-08-19).
- 25) Wakikawa, R., Watari, M., Matsutani, H., Mitsuya, K., Ernst, T., Uehara, K. and Murai, J.: Demonstration System supporting Host and Network Mobility, *IPJS Symposium on Multimedia, Distributed, Cooperative and Mobile Systems (DICOMO2003)*, pp.617-620 (2003).

(平成 15 年 10 月 27 日受付)

(平成 16 年 9 月 3 日採録)

推薦文

本論文は、携帯型ポータブル機器への Mobile IPv6 プロトコルの適用を想定し、標準プロトコルのうち必須な機能、リソース、ユーザインタフェースなどの制約条件に応じ省略可能な機能をプロファイル化することで、実装者の機能選択を容易化することで、より広い適用を目指すもので、実機への実装試験なども並行して行っており、完成度も高い。特に組み込み系の幅広い産業界に大きなインパクトを与えうる研究で、インターネットカーなど実際の応用展開についても触れており、今後のさらなる発展が期待できる研究である。(DICOMO2003 プログラム委員会委員長 高橋 修)



松谷 宏紀

1982年生。2004年慶應義塾大学環境情報学部卒業。現在、慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程に在学中。IPv6を利用した情報家電やセンサ制御の基盤システム、オンチップネットワークの研究に携わる。



湧川 隆次

2003年慶應義塾大学より博士(政策・メディア)の学位を取得。現在、慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科特別研究助手。モバイルコンピューティング、Mobile IP、Mobile Ad-hoc Network、Mobile Networkに関する研究に従事。ACM、WIDEプロジェクト各会員。



植原 啓介(正会員)

2003年慶應義塾大学より博士(政策・メディア)の学位を取得。現在、慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科特別研究専任講師。インターネット移動体通信に関する研究に従事。NPO法人高度測位社会基盤研究フォーラム理事、インターネットITS協議会基礎研究部会長等を務める。



村井 純(正会員)

1955年生。慶應義塾大学環境情報学部教授。1984年慶應義塾大学工学部数理工学博士課程修了。1987年博士号取得。1984年東京工業大学総合情報処理センター助手。1987年東京大学大型計算機センター助手。1990年慶應義塾大学環境情報学部助教授を経て1997年より現職。1999年慶應義塾大学SFC研究所所長。1984年JUNETを設立。1988年WIDEプロジェクトを設立し、今日までその代表として指導にあたる。社団法人日本ネットワークインフォメーションセンター理事長。前ICANNボード。著書に『インターネット』、『インターネットII』(岩波新書)、『インターネットの不思議、探検隊!』(太郎次郎社エディタス)。監訳に『インターネットシステムハンドブック』(インプレス)、『IPv6:次世代インターネットプロトコル』(プレンティスホール)ほか。