

組み込み機器向け Mobile IPv6 プロファイルの設計

松谷 宏紀[†] 湧川 隆次[‡] 植原 啓介[‡] 村井 純[†]

慶應義塾大学 環境情報学部[†] 慶應義塾大学 政策・メディア研究科[‡]

Design of Mobile IPv6 Profile for Embedded System

Hiroki Matsutani[†] Ryuji Wakikawa[‡] Keisuke Uehara[‡] Jun Murai[†]

Faculty of Environmental Information, Keio University[†]

Graduate School of Media and Governance, Keio University[‡]

1 はじめに

IPv6 が持つ広大なアドレス空間とアドレス自動設定機能により、センサや情報家電など身の回りの様々な機器がネットワークに接続可能となった。これらの機器へ Mobile IPv6[1] を適用すると、常に機器を一意的に識別可能になり、管理が容易となる。

本来、Mobile IPv6 は移動体通信機器を対象とする。そのため、Mobile IPv6 をセンサや情報家電などへ適用すると、利用されない機能や、適用する利点が小さい機能が発生し得る。これらの機器では計算機資源の制限が厳しい場合が多く、機能を取捨選択する必要が生じる。本研究では、機能の取捨選択の基準として組み込み機器向け Mobile IPv6 プロファイルを提案する。

1.1 組み込み機器への Mobile IPv6 適用

本研究では用途が限定されている機器を組み込み機器と定義する。組み込み機器の設計では、以下の2点が要求される。1点目は計算機資源の制限である。組み込み機器では、機能を限定し、必要な計算機資源を抑えることが出来る。計算機資源の小規模化は、製造コストの低減や物理的な大きさの小型化へつながるため、重要である。2点目は設定やファームウェア更新などの管理コストの低減である。組み込み機器では、用途ごとに1つの機器が用いられる。そのため、日常生活においてユーザが管理しなければならない機器の数は多くなるので、機器の管理は容易でなければならない。

組み込み機器をネットワーク上で運用する場合、機器のネットワーク間の移動に注意する必要がある。機器がネットワーク間を移動すると、通信の切断やIPアドレスの変化が発生し問題となる。組み込み機器は容易に利用可能でなければならないので、機器が現在接続しているネットワークに関する情報を、ユーザに意識させるべきではない。そのため、機器がネットワーク間を移動しても通信が継続可能でなければならない。また、常に一意のIPアドレスを用いて機器を特定出来なければならない。以上の問題を解決するために、組み込み機器に Mobile IPv6 を適用する。Mobile IPv6 の適用により、移動透過性と着信可能性を保証することが出来る。なお、Mobile IPv6 の仕様は参考文献 [1] に、Home Agent と Mobile Node 間の IPsec の仕様は参考文献 [2] に明記されている。

1.2 プロファイルの必要性

本来、Mobile IPv6 は移動体通信機器を対象とする。そのため、Mobile IPv6 をセンサや情報家電など移動体通信機器以外へ適用すると、利用されない機能や、適用する利点が小さい機能が発生する可能性がある。また、Mobile IPv6 の仕様は様々な利用形態に対応するため、特定の状況下で効果を持つ付加機能を含む。用途が限られた組み込み機器では、これらの付加機能は必ずしも必要なく、これらの機能を持たなくても Mobile IPv6 を用いた通信は可能な場合がある。例えば、経路の最適化機能を利用しなくても、Mobile IPv6 によって移動透過性と着信可能性は保証される。もちろん、その場合は通信の遅延が大きくなるなど影響が生じるが、機器の利用目的やネットワーク構成によっては、その影響が問題とならない場合がある。

組み込み機器に対し Mobile IPv6 を適用する場合、汎用システムには無い以下の2点について注目する必要がある。1点目は計算機資源の制限である。組み込み機器では、限られたCPU内蔵メモリにプログラムを格納しなければならない場合がある。場合によっては、システムで利用しない Mobile IPv6 の機能を省略してコードサイズを縮小する必要が生じる。2点目は適用される環境が、ある程度予想出来る点である。組み込み機器では、あらかじめ通信インターフェイスの数や種類が判明している場合がある。場合によっては、移動検知の高速化のために、通信インターフェイスに強く依存した処理が有効となる。また、あらかじめ一度に通信を行う通信相手の最大数が予想可能な場合がある。その場合は、通信相手を持つ不変のIPアドレスと実際のIPアドレスとの対応を管理する Binding Cache の大きさを調節したり、最適な Binding Cache 交換ポリシーを選択出来る。

以上のように、汎用的なシステムと違い、組み込み機器に Mobile IPv6 を適用する場合、制限事項や利用環境に応じた必要機能の選定が行われる可能性がある。必要機能の選定によって、他の Mobile IPv6 スタックとの相互接続性が失われてはいけいない。本研究では、必要機能の選定のための基準を、組み込み機器向け Mobile IPv6 プロファイルとしてまとめる。

本論文では、2章にて、本プロファイルを実験および評価するための実験環境の構築について説明する。3章にて、本プロファイルの設計について説明する。4章にて、本プロファイルの作成について説明する。5章にて、本プロファイルに対して行った評価実験を説明し、本プロファイルの有用性を検証する。

2 実験環境の構築

以下の4段階の手順を用いて実験環境の構築を行った。1段階目では、実験用ハードウェア。2段階目では、リアルタイムOS。3段階目では、IPv6スタック。4段階目では、Mobile IPv6スタックをそれぞれ構築した。

1段階目では、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。選定したハードウェア構成を表1に示す。なお、開発や実験を円滑に進めるためにRAMを多く用意した。以降の開発では、開発ツールとしてGNU Development Tools for the Hitachi H8/300[HS] Seriesを使用した。

表 1: テストシステムのハードウェア構成 (2種類)

CPU	Hitachi H8/3048F 16MHz 128Kbyte ROM	Hitachi H8/3069F 20MHz 512Kbyte ROM
RAM	128Kbyte SRAM	2Mbyte DRAM
NIC	Realtek RTL8019AS	Realtek RTL8019AS

2段階目では、組み込み分野で多く用いられる μ ITRON4.0[3]準拠のリアルタイムOSを実装した。実装したリアルタイム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、本システムが μ ITRONへ強く依存することを避けるため、本システム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5860byteまで抑えた。

3段階目では、 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が持つIPスタックの特徴と構造を多く採り入れた。TCPなど本システムからは利用しない機能は削った。本システムの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12858byteとなった。

4段階目では、本システム上にMobile IPv6を構築した。本システムでは、mobility messageの処理やBinding Cacheの管理など大部分の処理にSFCMIP[4]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。本システムのIPv6スタックはBSD系OSのIPv6スタックに構造が近いので、本システムの一部を拡張するだけで、SFCMIPのコードの再利用が可能となった。

3 組み込み機器向け Mobile IPv6

プロファイルの設計

本プロファイルの目的は、用途が限定された組み込み機器において、他のMobile IPv6スタックとの相互接続性を保ちつつ、利用目的に最適化されたMobile IPv6スタックを構築可能にすることである。組み込み機器が対象なので、1.2章で議論した汎用システムと組み込み機器との相異点に注目して考察を行う。相互接続性を確保するために、本プロファイルはMobile IPv6の仕様[1]および、Home AgentとMobile Node間のIPsecの仕様[2]に準拠する。なお、本プロファイルは、ネットワーク間を移動することが前提の組み込み機器向けである。そのため、Mobile Node(MN)機能およびCorrespondent Node(CN)機能に注目し、Home Agent(HA)機能は対象外とした。

本プロファイルは、要求事項別プロファイルと機能変更リストから構成される。組み込み機器へMobile IPv6を適用する際、

対象とする機器の目的や適用される環境に応じて、Mobile IPv6に求められる要求事項が異なる。要求事項別プロファイルは、与えられた要求事項を満たすために有効な機能変更を提案する。提案される機能変更は、どのような機能が必要で、どのような機能が省略可能なのかを示す。機能変更リストでは、提案された機能変更を適用する際に、システムに対しどのような変更を加えれば良いか、また、どのような影響が発生するのかを示す。

図1を用いて本プロファイルの利用方法を示す。まず、機器の利用目的や適用される環境から、求められる要求事項を想定する。次に、要求事項別プロファイルを用いて、想定した要求事項を満たすために有効な機能変更を調べる。そして、候補として挙げた機能変更それぞれについて、機能変更リストを用いて、その機能変更を適用した場合の影響を調べ、その変更を実際に適用するか検討する。変更を適用する場合は、再び機能変更リストを用いて、具体的な変更内容と変更箇所を確認する。

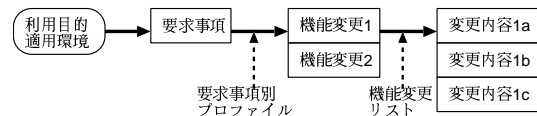


図 1: 本プロファイルの利用方法

4 プロファイルの作成

本プロファイルを作成するにあたり、まず、Mobile IPv6の全機能を分類した。そして、分類された各機能を最小単位として、要求事項別プロファイルおよび機能変更リストを作成した。

Mobile IPv6の全機能の分類では、客観的な視点で仕様を考察し分類する必要がある。この時点で偏った分類を行うと、完成するプロファイルにも偏りが生じ、プロファイルの対象が限定的となる。Mobile Node Operations、Correspondent Node Operations、IPsec between Mobile Nodes and Home Agentsの3つの分野ごとに、それぞれを構成する各機能を細分化した。最終的に、Mobile IPv6の全機能は70個以上に分類された。

機能変更リストを作成するために、分類されたそれぞれの機能ごとに、その機能が持つ役割について考察した。そして、同一の役割を持つ機能をグループ化した。グループ化によって、全ての機能は1つ以上のグループに含まれた。分類された機能別グループには、Return Routability関連、IPsec関連、Returning Home関連、Prefix Renumbering関連などがある。そして、それぞれの機能別グループの中から、省略または簡略化が可能な機能を探し、その機能が持つ他の機能との依存関係、および、その機能を持たない場合の影響を考察した。

以下、Return Routability(RR)機能の省略を例に、機能変更リストの作成について説明する。RRとは、MNの不変のIPアドレスと現在のIPアドレスの対応(binding)が正しいことを、通信相手であるCNに通知する機能であり、経路の最適化を行う際に必ず実行される。RR機能を持たない場合は、経路の最適化機能を利用出来ず、MNとCNの通信は、全てHAを介したBi-directional tunnelingとなる。そのため、RR機能を持たない場合は、影響として通信の遅延が増大する。

まず、Mobile IPv6の全機能からRRに関連する機能を列挙した。列挙された各機能に対し、RR機能を持たない場合にどのような機能変更が必要となるか考察した。なお、RR機能の省略は、MN機能およびCN機能に影響を及ぼすため、MN側とCN側の両面から考察を行った。

RR に関連するメッセージ交換が不要となるため、MN 機能および CN 機能から、以下の機能が省略可能となる。

- Home Test Init(HOTI) および Care-of Test Init の送受信
- Home Test(HOT) および Care-of Test の送受信
- SHA1 および HMAC SHA1 暗号処理

経路の最適化機能を利用しないため、binding の管理が不要となり、CN 機能から以下の機能が省略可能となる。

- Binding Cache(BC) の管理
- Binding Update(BU) の受信
- Binding Acknowledgement(BA) および Binding Refresh Request の送信
- Home Address option の受信、Type2 routing header の付加

BU を送信する相手が HA に限定されるため、MN 機能から、以下の機能が簡略化可能となる。

- BU の送信、BA の受信 (Authenticator の計算が不要)
- Binding Update List(BUL) の管理 (エントリが HA に限定)

MN と通信を行う場合に、通信相手から RR を要求される可能性がある。その場合は、通信相手に対し ICMP Error を返信することで、RR 機能が無いことを明示する必要が生じる。以上の機能変更を「No Return Routability」としてまとめた。同様の手法で、他のいくつかの機能別グループも作成した。作成した機能変更リストの概要を表 2 に示す。

要求事項別プロファイルを作成するために、分類されたそれぞれの機能ごとに、その機能が必要および不必要となる状況について考察した。次に、同一の状況において必要および不必要となる機能を集めグループ化した。そして、その各状況において求められている要求事項を導き出した。分類された要求事項別グループには、通信の遅延の低減や、移動検知の高速化、消費電力の低減、計算機資源の小規模化、通信の匿名化などがある。

以下、移動検知の高速化を例に、要求事項別プロファイルの作成について説明する。まず、以下の機能は、移動検知を行う際に必要な Router Advertisement の受信を補助する機能である。

- Router Solicitation の定期的な送信
- Advertisement Interval option の受信および利用

また、Duplicate Address Detection の待ち時間を短縮すれば、ネットワークの移動を高速化出来る。これらの機能は、移動検知の高速化が要求される場合に必要とされる。そのため、これらの機能を「Fast Movement Detection」としてまとめた。同様の手法で、他のいくつかの要求事項別グループも作成した。作成した要求事項別プロファイルの概要を表 3 に示す。

5 プロファイルの評価実験

組み込み機器向け Mobile IPv6 プロファイルの有用性を検証するために、本プロファイルを利用して実際の組み込み機器向け Mobile IPv6 システムの設計を行った。なお、設計したシステムは、2003/03/12 に慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスで行われた InternetCAR Workshop2003 にて、実証実験を行うためのシステムである。

5.1 実証実験概要と要求事項

本実験では、センサに Mobile IPv6 通信機能を持たせる。製造コストの低減と小型化への要求から、本実験では要求事項として、必要な計算機資源を小規模にすることが求められた。

表 2: 機能変更リスト (概要)

分類名	No Return Routability
変更点	Return Routability 関連の mobility header 処理の省略。 SHA1 および HMAC SHA1 暗号処理の省略。 Binding Update List の簡略化。Binding Cache の省略。 Home Address option および Type2 routing header の受信処理と付加処理の簡略化。
制限	HA を介した Bi-directional tunneling が発生。 プログラム容量など計算機資源が限られており、通信量が少なく、遅延が問題とならない場合に省略可能。 RR を要求してきた MN に対して、RR 機能が無いことを示すために ICMP Error を返信する必要がある。
分類名	No Binding Refresh Request
変更点	Binding Refresh Request の送受信の省略。 Binding Cache のタイムアウト処理の簡略化。
制限	一時的に Binding Cache の有効期限が切れ、HA を介した Bi-directional tunneling が発生。 Return Routability を行わない場合は常に省略可能。
分類名	No Returning Home
変更点	HA の linklocal アドレス取得、管理機能の省略。 HA への home de-registration 機能の省略。
制限	MN が home link に接続しない場合に省略可能。
分類名	No Dynamic Home Agent Address Discovery
変更点	Dynamic Home Agent Address Discovery 機能の省略。
制限	HA のアドレスが固定であらかじめ判明しており、複数 HA 間の負荷分散が必要なく、home prefix の renumbering が発生しない場合に省略可能。
分類名	No Prefix Renumbering
変更点	Mobile Prefix Solicitation 送信の省略。 home prefix 管理の簡略化。
制限	home prefix の renumbering が発生しない場合省略可能。

表 3: 要求事項別プロファイル (概要)

分類名	Fast Movement Detection
要求	移動検知の高速化。 移動の際のバケットロス削減。
適用	Router Solicitation(RS) の定期的な送信機能。 電波強度の変化など link-layer information の利用。 Advertisement Interval option の利用。 Duplicate Address Detection の待ち時間短縮。
分類名	Multiple Interfaces
要求	複数の I/F を利用する場合。複数の CoA を利用した smooth handover を実現したい場合。
適用	primary CoA と non-primary CoA の管理機能 previous primary CoA 宛てバケットの受信機能。
分類名	Low CPU Power and Small Code Size
要求	計算機資源 (処理能力やコードサイズ) の小規模化。
省略	Return Routability 機能。 HOTI および HOT メッセージ、ペイロードバケットへの IPsec tunnel mode の適用。 自動鍵交換のための IKE の利用。 Mobile Prefix Solicitation / Advertisement への IPsec transport mode の適用。
分類名	Save Battery Power
要求	消費電力の低減。 (常時電源を供給しない場合、通信量を減らす場合など)
適用	電源オフによる BUL 消失の前に、home de-registration 実行、または、HA のエントリを不揮発性メモリに記録。 Remote Home Address Configuration 機能。 Advertisement Interval option の利用 (RS 送信数低減)。

図 2 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 を配置した。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 に接続し、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 は常に一意のアドレスを用いて MN に接続し、センサの情報を取得出来る。

なお、CN および 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。

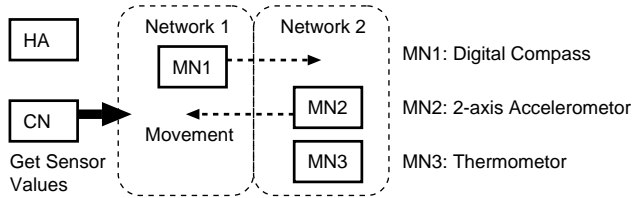


図 2: 実験の概要図

各 MN とデータ通信を行うのは 1 台の CN のみである。データ通信では、0.5 秒ごとに 2byte から 8byte のセンサ情報が交換される。データ通信の間隔は固定で、通信量は少ないと言える。

5.2 本プロファイルを利用した設計

本実験の要求事項は計算機資源の小規模化である。そのため、設計に際して要求事項別プロファイルの「Low CPU Power and Small Code Size」の項を参照し、本システムへ「Return Routability 機能」省略の適用を検討した。RR 機能の省略を検討するために機能変更リストの「No Return Routability」の項を参照した。そして、RR 機能を省略すると経路の最適化機能が利用出来なくなるので、通信量が少なく通信の遅延が問題にならない場合に省略が可能であると判明する。

本実験では通信量は少ないが、通信の遅延の問題に関しては、制御するセンサに依存すると言える。MN3 が制御する温度センサは比較的值の変化が少なく、通信の遅延は問題とならない。しかし、MN1 の方位センサおよび MN2 の加速度センサに関しては、値の変化が激しく、通信の遅延はデータ測定において致命的な問題となる。そこで、本実験では MN1 と MN2 には RR を適用し、MN3 には RR を適用しない判断をした。

MN3 において RR 機能の省略を行う際に、機能変更リストを参照して、具体的な変更点、影響とその対策について確認した。例えば、通信相手が MN の場合には相手から RR を要求されるが、MN3 は RR 機能を持たないので RR を開始出来ない。その場合、RR を要求してきた相手に対し ICMP Error を返信することで、RR 機能が無いことを明示する必要がある。

5.3 本プロファイルの評価

本プロファイルの評価のために、本プロファイルを適用し機能を削減したシステムのコードサイズを測定する。また、そのシステムが他の Mobile IPv6 スタックと相互接続可能が確認する。

表 4 は、本システムの主要機能のコードサイズと全体に占める割合を、MN として RR を行う場合 (MIP6 RR)、RR を行わない場合 (MIP6 No RR)、Mobile IPv6 の機能を全く持たない場合 (No MIP6) のそれぞれについて計算したものである。表より、MIP6 RR の場合においては、Mobile IPv6 関連のコードサイズがシステム全体の約 48% を占め、そのうち約 73% が RR

表 4: 主要機能のコードサイズ (括弧は全体に占める割合)

	MIP6 RR	MIP6 No RR	No MIP6
Kernel	5860 (12.7)	5860 (19.4)	5860 (24.2)
UDP application	1182 (2.6)	1182 (3.9)	1182 (4.9)
IPv6 packet I/O	4918 (10.6)	4288 (14.2)	2870 (11.9)
ICMPv6	3344 (7.2)	3344 (11.0)	3236 (13.4)
UDP	428 (0.9)	428 (1.4)	428 (1.8)
TCP (N/A)	168 (0.4)	168 (0.6)	168 (0.7)
Mobile IPv6	15052 (32.6)	3948 (13.0)	0 (0)
HMAC SHA1	3980 (8.6)	0 (0)	0 (0)
Ethernet frame I/O	4152 (9.0)	4152 (13.8)	3944 (16.3)
NE2000 driver	2212 (4.8)	2212 (7.3)	2212 (9.1)
LCD driver	1188 (2.6)	1188 (3.9)	1188 (4.9)
Other	3710 (8.0)	3410 (11.3)	3110 (12.9)
Total	46194 byte	30180 byte	24198 byte

関連の処理であることがわかる。

温度センサを制御する MN3 は、Bi-directional tunneling による遅延が問題とならないため、RR 機能を省略し大幅にコードサイズを削減出来た。また、RR 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保持出来た。方位センサおよび加速度センサを制御する MN1 と MN2 は、RR 機能を持つことによりデータ測定の精度を保つことが出来た。

6 まとめと今後の課題

本研究では、組み込み機器向け Mobile IPv6 プロファイルとして、要求事項別プロファイルと機能変更リストを作成した。そして、実際に本プロファイルを利用した設計を行い、与えられた要求事項から目的用途に最適化された Mobile IPv6 システムを構築出来ることを確認した。

今後は、本プロファイルの改良を行う。その際、幅広い用途に対応するために、Mobile IPv6 のハードウェア実装についても考察を行う。表 4 に示すように Mobile IPv6 の処理の規模は大きい。BC や BUL の検索、HMAC SHA1 の計算などハードウェア化が有効と思われる処理も多い。よって、ハードウェアによる処理とソフトウェアによる処理を組み合わせる手法についても検討する必要がある。

謝辞

本論文を執筆するにあたり面倒を見てくださった慶應義塾大学村井研究室 nacm のメンバの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] D. Johnson, C. Perkins, J. Arkko, “Mobility Support in IPv6”, Internet-Draft, February 26, 2003
- [2] J. Arkko, V. Devarapalli, F. Dupont, “Using IPsec to Protect Mobile IPv6 Signaling between Mobile Nodes and Home Agents”, Internet-Draft, February 18, 2003
- [3] ITRON Committee, TRON ASSOCIATION, “μ ITRON4.0 Specification”, 2002
- [4] 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