

平成24年度 修士論文

邦文題目

**Android 端末における Wi-Fi/3G 間の
シームレスハンドオーバーの提案と実装**

英文題目

**Proposal of Seamless Handover between Wi-Fi
and 3G in Android Terminals and Its
Implementation**

情報工学専攻

(学籍番号: 113430029)

福山 陽祐

提出日: 平成 25 年 1 月 31 日

名城大学大学院理工学研究科

内容要旨

スマートフォンの普及や無線技術の発展により、移動中にネットワークを切り替えたり、外出先から自宅の情報端末へ通信を開始したいという要望が高まっている。しかし、これらの要望を満たすためには、移動透過性の実現や NAT 越え問題を解決しなければならない。これらの問題を同時に解決する NTMobile (Network Traversal with Mobility) を提案し、実装を行っている。NTMobile は Linux ベースの PC 向けに開発が進められており、Android 端末への移植と動作検証を終えている。しかし、ネットワークの切り替え時に通信断絶時間が発生し、通信が再開されるまでに時間がかかるという課題があった。そこで本論文では、Android 端末の 3G と Wi-Fi インターフェースを同時に動作させることによりその通信断絶時間をなくす方法について提案し、その実装方法を述べる。動作確認の結果、パケットロスのないシームレスハンドオーバーができることを確認した。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	既存技術	4
2.1	デュアルインターフェース方式によるシームレスハンドオーバ	4
2.2	IEEE802.21	5
第3章	要素技術	7
3.1	NTMobile	7
3.2	Android 端末固有の通信インターフェース切り替え動作と課題	10
第4章	提案方式	12
4.1	提案の方針	12
4.2	3G から Wi-Fi へのハンドオーバ動作	12
4.3	Wi-Fi から 3G へのハンドオーバ動作	13
4.4	同時接続時のパケットルーティング手法	14
第5章	実装方法	17
5.1	システム構成	17
5.2	HDM の処理内容	19
第6章	動作確認	22
6.1	実験環境	22
6.2	パケットロスの測定	22
6.3	スループットの測定	23
第7章	まとめ	24
	謝辞	25
	参考文献	26
	研究業績	28

第1章 はじめに

Android OS を搭載したスマートフォンをはじめとする高機能携帯端末の普及に伴い、移動しながら通信を行いたいという要望が高まっている。Android 端末などのスマートフォンの多くは、携帯電話網の通信インターフェース（以下 3G）による通信と、無線 LAN（以下 Wi-Fi）による通信の両方が利用可能である。3G はほぼ全国のエリアで使用することができるが、通信の帯域が狭く、データ通信の速度が遅い。一方、Wi-Fi は範囲は狭く限定されるが、高速なデータ通信が可能である。3G の通信中であっても、Wi-Fi が利用できる環境であれば、Wi-Fi に切り替える方が高速に通信ができるため利便性が高い。逆に、Wi-Fi の使用中に移動する場合にも、Wi-Fi の電波が届かなくなったら、即座に 3G に切り替えを行った方がよい。

しかし、データ通信に用いられる IP ネットワークでは、端末の通信インターフェースに割り当てられている IP アドレスを用いて通信を管理している。端末の移動に伴い、通信インターフェースを切り替えた場合に IP アドレスが変化する。そのため、アプリケーションは違う通信と認識し、それまで行っていた通信を継続することができない。このような課題を解決する技術を移動透過技術と呼び、現在までに様々な移動透過技術が提案されてきた [1, 9, 10, 13]。

また、現在普及している IPv4 ネットワークでは、IPv4 グローバルアドレスの枯渇対策として NAT (Network Address Translation) を導入してプライベートネットワークを構築することが一般的である。しかし、NAT の導入により、グローバルネットワーク側の端末からプライベートネットワーク側の端末に対して通信を開始できない NAT 越え問題と呼ぶ課題があり、IPv4 の汎用性を損なう要因になっている。これらの問題は、IPv6 環境への移行により解決が可能であるといわれているが、IPv6 は IPv4 と互換性がなく、IPv6 は今だ普及には至っていない。よって、今後も IPv4 環境が主に使用されていくことが考えられ、NAT 越え問題の解決は重要である。

そこで、移動透過と NAT 越えを同時に実現する NTMobile (Network Traversal with Mobility) [2, 3] を提案してきた。NTMobile では、NTM 端末 (NTMobile の機能を搭載した端末) に仮想 IP アドレスを与えることにより、端末の移動に伴う実 IP アドレス (実際に物理インターフェースに割り当てられているアドレス) の変化を隠蔽し、アプリケーション間の通信を継続することができる。また、NAT の有無や IPv4 ネットワーク間、IPv6 ネットワーク間 [4]、IPv4 ネットワークと IPv6 ネットワーク間の混在環境 [5] など、あらゆる通信環境に対応している。特定の状況を除いては、エンドツーエンドで通信を行えるため、経路が冗長になり

にくいという特徴がある．実際の用途を考えると，携帯端末としては Android 端末などのスマートフォンが一般であり，NTMobile でも Android 端末での利用を想定し，移植と動作検証を終えている [6]．Android 端末の場合，3G と Wi-Fi を切り替えることになる．

Android 端末の切り替え動作を調べたところ，Wi-Fi から 3G にハンドオーバーする際に大きな通信断絶時間が発生することが分かった．この間，パケットロスが発生してしまうため，NTMobile の実用化において大きな課題となる．通信断絶が発生する理由として，迅速な 3G の復帰ができていないからである．Android 端末は，Wi-Fi 接続時には 3G の接続を切断し，通信インターフェースをダウンさせている．そのため，Wi-Fi 切断後 3G の通信準備を行う必要があるため，準備が完了するまでの間通信断絶が発生する．

これまでに，シームレスハンドオーバーの技術として 2 枚の無線 LAN カードを用いたデュアルインターフェース方式 [7] や異種間ネットワークに依存しない IEEE802.21 [8] によるハンドオーバー手法が提案されている．しかしデュアルインターフェース方式では，無線 LAN 2 枚を使う手法であり，3G と Wi-Fi のように異種メディア間のハンドオーバーには使えない．だが，考え方は大変参考にできる．IEEE802.21 では，ネットワークメディアに依存しない抽象メディアとして統一的なインターフェースを定義し，リンク層とネットワーク層との間で情報をやり取りし連動を図っている．IEEE802.21 では，ハンドオーバーのトリガを提供するのみで，IP アドレスの変化に対応するには Mobile IP (MIPv4) [9] や Mobile IPv6 (MIPv6) [10] などの移動透過技術との連動が必要である．IEEE802.21 と Multiple Care-of Addresses (MCoA) [11] の連携によりパケットロスがないハンドオーバーが可能であることは証明されている [12] が，IPv4 での実績がない．さらに，リンク層に抽象インターフェースを実装する必要があるため，実装が困難である．

そこで，本論文では Android 端末の Wi-Fi 接続時に 3G を切断させる動作を見直し，両インターフェースを同時に接続状態にすることで，切り替え時の通信断絶時間の発生をなくす．3G ネットワークは，どこでも通信できるという特徴に着目し，Wi-Fi 接続時にも 3G は常に通信可能状態にしておき，通信インターフェースを切り替える前に NTMobile を実行し，トンネルを準備しておくことで，ハンドオーバー時のパケットロスを発生させない方式を提案する．その際，アプリケーションの通信と NTMobile の制御メッセージを同時に，同じ相手に異なる通信インターフェースから送信する必要がある．しかし通常，同じ相手に通信インターフェースを分けてパケットを送信することはできない．それは，ルーティングテーブル 1 つに対してデフォルトゲートウェイが 1 つしか設定できないためである．そこで，通信インターフェースごとにルーティングテーブルを用意し，どちらのルーティングテーブルを参照するかを制御することにより，これを可能にした．提案方式を Android 端末に導入して動作確認により，切り替え時にパケットロスのないシームレスなハンドオーバーが可能であることを確認した．

以下，2 章で従来技術としてデュアルインターフェース方式によるパケットロスレスシームレスハンドオーバー方式と IEEE802.21 を紹介する．3 章で本提案で使用する移動透過技術

である NTMobile とターゲットである Android 端末の通信インターフェース切り替え動作とその課題を述べる．4 章で提案方式を示し，5 章で実装方法について述べる．6 章で動作確認を示し，7 章でまとめる．

第2章 既存技術

2.1 デュアルインターフェース方式によるシームレスハンドオーバー

この方式は、2枚の無線LANインターフェースを保持し、インターフェース1の通信状態を電波強度により監視し、不安定状態になる前にインターフェース2において通信を可能な状態にする方式である。IPモビリティ技術にはMobilePPC(Mobile Peer to Peer Communication)[13]を使い、切り替え後の通信継続を可能にしている。図2.1に無線アクセスポイント(以下AP)が異なるネットワークである場合のデュアルインターフェース方式によるハンドオーバーの流れを示す。

Old APとNew APが異なるネットワークである場合(インターフェース1に接続しているAPをOld AP、インターフェース2で接続するAPをNew APとする)、インターフェース1による通信を継続しながら、インターフェース2にてNew APと接続処理を行い、DHCP

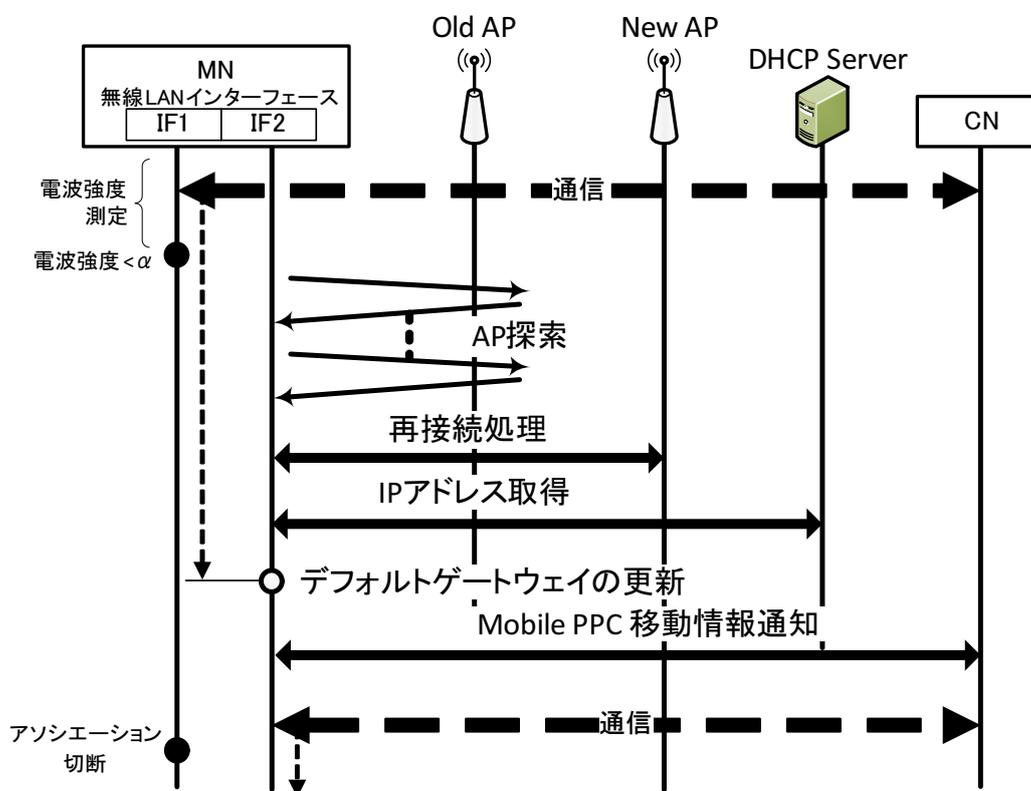


図 2.1 デュアルインターフェース方式によるシームレスハンドオーバー

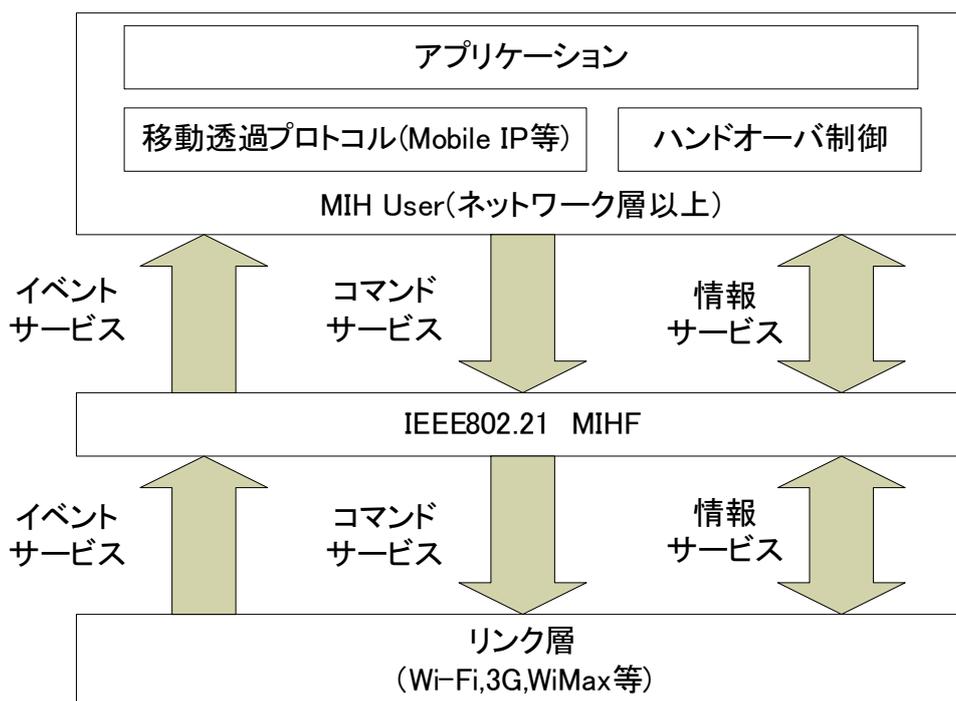


図 2.2 IEEE802.21 のレイヤー構造

サーバから IP アドレスを取得する必要がある。このように動作させるためには、ルーティングテーブルに Old AP 側ネットワークのデフォルトゲートウェイ情報を維持しつつ、New AP 側ネットワークでアドレス取得をする必要がある。そこで、この方式では Mobile PPC の移動情報通知処理の直前にルーティングテーブル内のデフォルトゲートウェイ情報を更新することにより実現している。Mobile PPC の移動情報通知処理は 5ms 程度で終了できるため、この処理によるパケットロスは発生しない。

この方式により、パケットロスが出ないハンドオーバが可能であると証明されている技術であるが、端末に 2 枚の無線 LAN インターフェースをする必要がある。本研究でターゲットにする Android 端末には標準で無線 LAN インターフェースが搭載されているがそれを増設することはできない。

2.2 IEEE802.21

IEEE802.21 は、MIHF(Media-Independent Handover Function)を定義している。MIHF は、リンク層とネットワーク層の間に複数インターフェースの差異を吸収する抽象メディアであり、リンク情報を MIH User (Media-Independent Handover User) に提供する。そのため、通信方式の違いに依存せずにハンドオーバできる。IEEE802.21 におけるサービスとレイヤ構造を図 2.2 に示す。IEEE802.21 では、イベントサービス、コマンドサービス、情報サービスの 3 種類を定義している。イベントサービスは、電波強度の劣化のようなリンク層以

下で生じたイベントを上位層の MIH User に通知するために利用される。コマンドサービスは、MIH User がハンドオーバの制御を行うしあに利用される。情報サービスは、遅延のようなハンドオーバに必要な近隣ネットワークの情報取得に利用される。また、情報サービスで得たすべてのネットワーク情報を、外部の Information Server と呼ばれる装置に蓄積する。この情報を使うことで、AP のスキャンが不要になるため、バッテリーの電力消費が抑えられる。

以上のように、電波強度の変動のようなリンク層以下の指標の変化を感知し、通信品質が劣化する前に取得した近隣ネットワーク情報をもとにハンドオーバが可能である。

ハンドオーバにおいて、ネットワークを切り替えても通信が継続できることが重要になるが、ネットワーク切り替えにより IP アドレスの変化は避けられないため、移動透過技術との連携が必須である。

第3章 要素技術

本章では、移動透過プロトコルとして本研究で利用する NTMobile について説明する。また、実装ターゲットである Android 端末固有のハンドオーバの課題についても整理する。

3.1 NTMobile

3.1.1 NTMobile の構成

NTMobile で想定するネットワークを図 3.1 に示す。NTMobile で想定するネットワークを図 3.1 に示す。NTMobile は DC (Direction Coordinator), NTM 端末, RS (Relay Server) によって構成される。

DC は仮想 IP アドレスの割り当て管理や、NTM 端末に対してトンネル構築などの指示を出す装置である。NTM 端末に割り当てられる仮想 IP アドレスは一意的なアドレスになるように DC はアドレスを管理している [14]。NTM 端末は移動先のネットワークから割り当てられる実 IP アドレスと、DC から割り当てられる仮想 IP アドレスの 2 つのアドレスを保持している。NTM 端末の使用するアプリケーションは仮想 IP アドレスに基づいた通信を行うことにより、NTM 端末の実 IP アドレスが変化しても通信を継続することができる。仮想 IP アドレスに基づくアプリケーションパケットは、NTM 端末間に構築される UDP トンネルによって転送される。図 3.1 における NTM 端末 A と移動前の NTM 端末 B のように、どちらか一方の端末がグローバルネットワークに接続している場合には、エンドツーエンドでトンネルが構築される。RS は、図 3.1 における NTM 端末 C と一般サーバ (General Node) のように通信相手が NTMobile を実装していない端末と通信する場合や、両 NTM 端末が NAT 配下に位置する場合に、通信の中継を行う装置である。

NTMobile では同様の仕組みを用いて IPv6 にも対応することができるが、本稿では IPv4 ネットワークに接続した NTM 端末同士が通信を行う際の動作のみを記述する。

3.1.2 動作シーケンス

NTMobile の動作シーケンスは主に以下の 3 つのフェーズを経て通信を行う。

- (1) 端末情報の登録
- (2) 名前解決処理

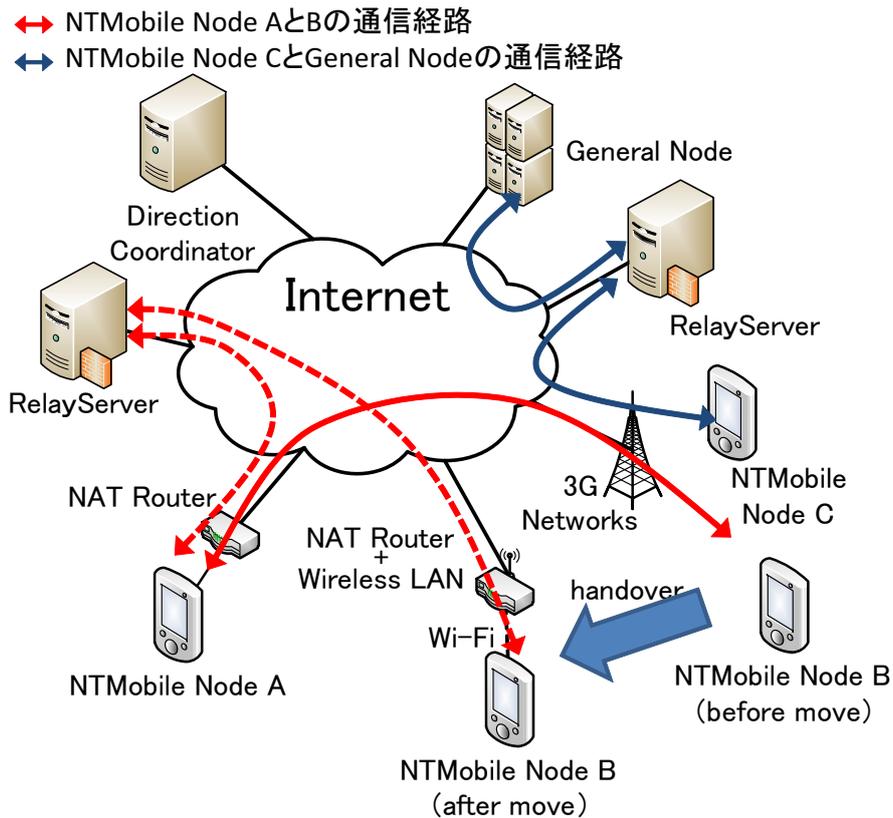


図 3.1 NTMobile の概要

(3) トンネル構築

(1) は、NTM 端末起動時および端末移動時に実 IP アドレスなどの端末情報を DC に登録するフェーズである。この際、NAT の有無の情報も登録される。次に (2) において、MN (Mobile Node) は通信相手 CN (Correspondent Node) の実 IP アドレスや仮想 IP アドレスを知るために DC に名前解決を依頼する。MN と CN は NTMobile を実装している NTM 端末である。NTMobile では、このフェーズをトリガーとして NTMobile 特有のネゴシエーションである (3) を DC から得られた情報をもとに実行する。(3) フェーズ完了後、通信を開始する。

(3) において、DC の指示に従い通信相手との間にトンネルを構築するためのメッセージ交換が行われる。図 3.2 にトンネル構築までのメッセージ交換の流れを示す。ここでは MN がプライベートネットワークに存在し、CN がグローバルネットワークに存在する場合のトンネル構築を説明する。

MN は DC へ Director Request を送信し、トンネル構築の指示を要求する。DC は MN と CN 間で直接トンネルを構築するために、MN へ Route Direction を送信し、CN 宛に Tunnel Request を送信するように指示する。また、DC は CN に対して MN から送信された Tunnel Request を受信するように指示する Route Direction を送信する。Route Direction を受け取っ

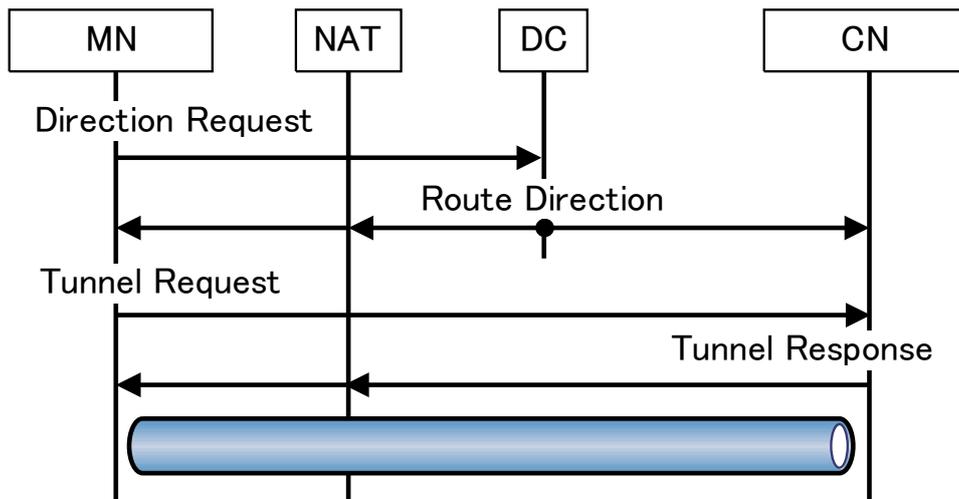


図 3.2 フェーズ (3) : トンネル構築手順

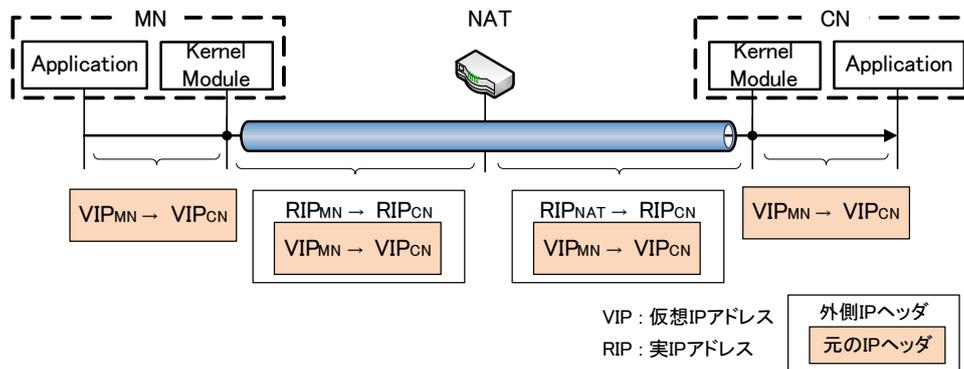


図 3.3 トンネル通信時のアドレス遷移

た MN, CN は DC の指示に従い, Tunnel Request/Response を交換し, トンネル構築が完了する. Tunnel Request をプライベートネットワーク側から送信することで, NAT に MN と CN が通信を行うためのマッピング情報が生成され, MN と CN の間に NAT をまたがったトンネルを構築することができる.

3.1.3 トンネル通信

MN が CN へトンネル通信を行う様子を図 3.3 に示す. アプリケーションレベルでは, 仮想 IP アドレスに基づいた通信が行われるため, アプリケーションが生成したパケットには仮想 IP アドレス VIP が記載される. MN は宛先アドレスである VIP_{CN} をカーネルモジュールにてフックし, 実 IP アドレス RIP_{CN} でカプセル化を行い, CN へ送信する. カプセル化の際には IP ヘッダと UDP ヘッダ, NTM Mobile 特有の NTM ヘッダが付加される. CN はカプセル化されたパケットを受信すると, カーネルモジュールにてデカプセル化を行い, 元の VIP_{CN} 宛のパケットを抽出する. その後, 抽出したアプリケーションパケットを上位アプリ

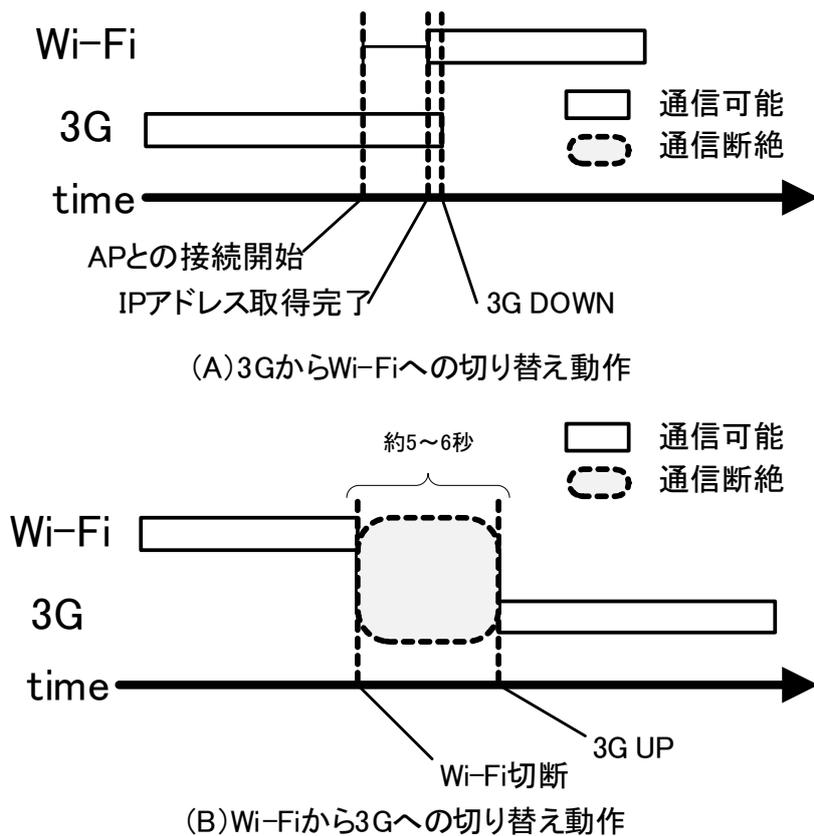


図 3.4 Android 端末の切り替え動作

ケーションへ渡す。

以上により，MN と CN のアプリケーションは，仮想 IP アドレスに基づいた通信を行うことができる。

3.1.4 ネットワーク切り替え時の動作

MN の移動や無線インターフェースの切り替えにより実 IP アドレスが変化した際には，CN との間にトンネルを再構築する。この時，MN は CN の実 IP アドレスなどの情報は取得済みであるため，名前解決処理を省略して，トンネル構築処理を実行する。MN のアプリケーションは，仮想 IP アドレス宛にパケットを生成するため，実 IP アドレスの変化の影響を受けない。

3.2 Android 端末固有の通信インターフェース切り替え動作と課題

NTMobile により，移動透過は実現できるが，Android 端末において通信インターフェースを切り替える際，現状の切り替え動作では，通信断絶時間が大きく，そのままでは実用的

ではないことが、実際に切り替えの挙動を調査し、判明した。図 3.4 にそれぞれの切り替え動作とそれに伴う通信断絶時間の関係を示す。

切り替え動作としては、3G から Wi-Fi に切り替え（図 3.4 の（A））を行う際には、Wi-Fi 側の IP アドレスの取得が完了すると 3G での接続が解除され、インターフェースがダウンするため、通信断絶時間はない。一方、Wi-Fi から 3G への切り替え時（図 3.4 の（B））には、Wi-Fi 接続が切断されたことを Android OS の通信管理システムが検出すると、3G インターフェース側が接続準備を開始する。この接続処理には多くの時間を要し、Wi-Fi の切断から 3G の接続が完了するまでの 5～6 秒程度の間、通信が全くできなくなる。

このように Android 端末では、特に Wi-Fi から 3G への切り替え時に長い通信断絶が発生する。仮に NTMobile を用いて移動透過を実現できたとしても、上記課題を解決しなければシームレスハンドオーバーは実現できない。

第4章 提案方式

4.1 提案の方針

本提案方式では、Wi-Fi 接続時にも 3G の接続を切断させないようにして、接続状態を維持することで、3.2 節の課題を解決する。ハンドオーバー手法として、一方の通信インターフェースで通信中に、もう一方のインターフェースで NTMobile のトンネルを準備する手法を採用する。この手法により、トンネルを切り替えるのみでインターフェースの切り替えが実現でき、理論的にはパケットロスは発生しない。

しかし通常、同じ通信相手に対して、同時に複数のインターフェースから経路を分けてパケットを送信することはできない。ルーティングテーブル 1 つに対して、デフォルトゲートウェイが 1 つしか設定できず、送信インターフェースが固定されてしまうためである。提案するハンドオーバー手法を行うためには、同じ相手にアプリケーションのトンネル通信と NTMobile のトンネル構築処理を別々のインターフェースを用いて同時に実行する必要がある。そこで、iproute2 [15] の仕組みを用いてパケットのルーティングを行うことで、上記の問題を解決し、トンネル通信とトンネル構築処理を同時に行うことを可能にする。iproute2 は、Linux のルーティングテーブルを操作するパッケージで、ルーティングテーブルを複数生成することができ、どのテーブルを参照させるかのポリシーを設定することが可能である。

よって、Wi-Fi インターフェースを送信インターフェースとする Wi-Fi 用のルーティングテーブルと、3G インターフェースを送信インターフェースとする 3G 用のルーティングテーブルを生成し、両インターフェースを送信口とするルートを確認する。パケットごとに、Wi-Fi と 3G のどちらのルーティングテーブルを使用するかをポリシーとして設定することにより、同時通信を可能にする。

4.2 3G から Wi-Fi へのハンドオーバー動作

図 4.1 に 3G から通信を開始して、Wi-Fi へハンドオーバーする時の動作を示す。MN は、3G 側ですでに NTMobile のトンネル通信を開始しているものとする。MN は、3G 側でのトンネル通信中に、Wi-Fi インターフェース側で無線アクセスポイント（以下 AP）を探索するために、定期的にチャンネルスキャンを行い、周囲の AP を検索する。そして、内部に持つ接続可能 AP リストとチャンネルスキャンにより得られた周辺 AP を比較し、接続する AP を決定し、コネクションを確立する。接続可能 AP リストとは、WEP (Wired Equivalent Privacy) [16]

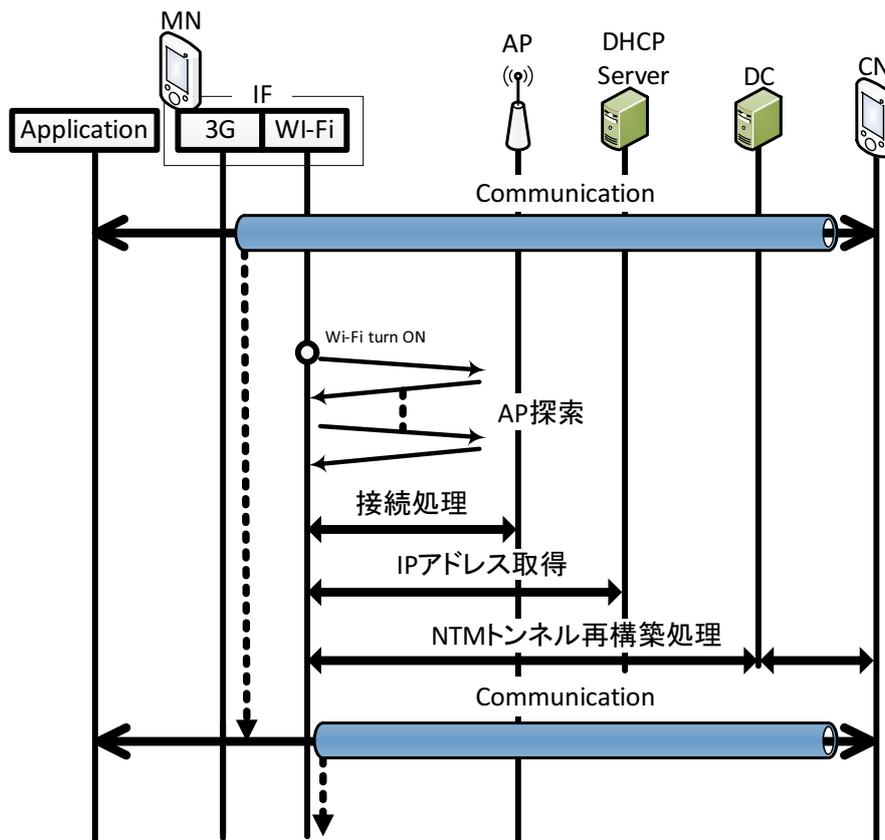


図 4.1 3G から Wi-Fi へのハンドオーバーシーケンス

や WPA (Wi-Fi Protected Access) [17] などで暗号化がされている AP に接続するために事前に AP の名前とパスワードを登録したリストである。もし、接続可能 AP が複数見つかった場合は、電波強度の強い AP を選択する。また、接続可能な AP が見つからない場合には Wi-Fi を OFF にし、一定時間後に再度 Wi-Fi を ON にして周辺の AP を探索しなおす。

MN は AP に接続後、DHCP のシーケンスにより IP アドレスを取得し、Wi-Fi に IP アドレスが割り当てられることにより、Wi-Fi の通信準備を完了する。その後、Wi-Fi 側からトンネル再構築処理を行い、3G 側のトンネルから Wi-Fi 側のトンネルにパケットの流れを切り替えることにより、ハンドオーバを完了する。

4.3 Wi-Fi から 3G へのハンドオーバ動作

次に図 4.2 に Wi-Fi から通信を開始して、3G へハンドオーバする時の動作を示す。

MN は、Wi-Fi 側で NTMobile のトンネル通信をすでに行っているものとする。Wi-Fi は、通信中に AP との電波強度を測定し、通信品質の監視を行う。AP の電波強度は、AP から送信されるビーコンや、データパケットを受信した際に取得することができる。3G は常時接続状態にしておき、AP の電波強度が閾値 より下回った場合、通信状態が不安定になった

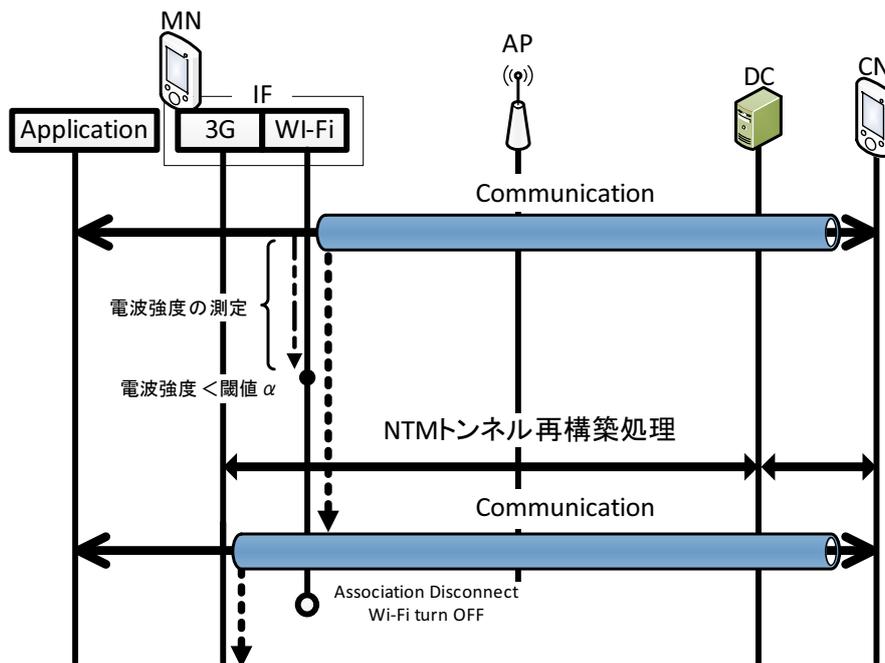


図 4.2 Wi-Fi から 3G へのハンドオーバーシーケンス

と判断し、3G 側へのハンドオーバを決定する。

3G 側へのハンドオーバを決定すると、3G 側からトンネル再構築を行い、3G 側にトンネルを生成する。Wi-Fi 側のトンネルから 3G 側のトンネルにパケットの流れを切り替えることで 3G 側へのハンドオーバを完了する。ハンドオーバ完了後、Wi-Fi の接続を切断し、Wi-Fi を OFF にする。

4.4 同時接続時のパケットルーティング手法

提案方式では、切り替え準備のために同じ通信相手に、NTMobile のトンネル通信とトンネル構築処理を別々のインターフェースで同時に行う必要がある。しかし通常、同じ通信相手に同時に複数のインターフェースから経路を分けてパケットを送信することはできない。ルーティングテーブルがデフォルトゲートウェイを 1 つしか設定できないためである。

そこで、iproute2 の仕組みを使う。iproute2 では以下のコマンドが用意されている。

- `ip route`
ルーティングテーブル操作用のコマンド
- `ip rule`
ルーティングテーブルの参照ルールを設定するコマンド

`ip route` コマンドにより、Wi-Fi インターフェースをデフォルトゲートウェイとする Wi-Fi 用のルーティングテーブルと、3G インターフェースをデフォルトゲートウェイとする

表 4.1 使用するポリシー

	対象パケット	参照先ルーティングテーブル
(A)	カプセル化パケット その他のパケット	Table 3G Table Wi-Fi
(B)	全てのパケット	Table Wi-Fi
(C)	カプセル化パケット その他のパケット	Table Wi-Fi Table 3G
(D)	全てのパケット	Table 3G

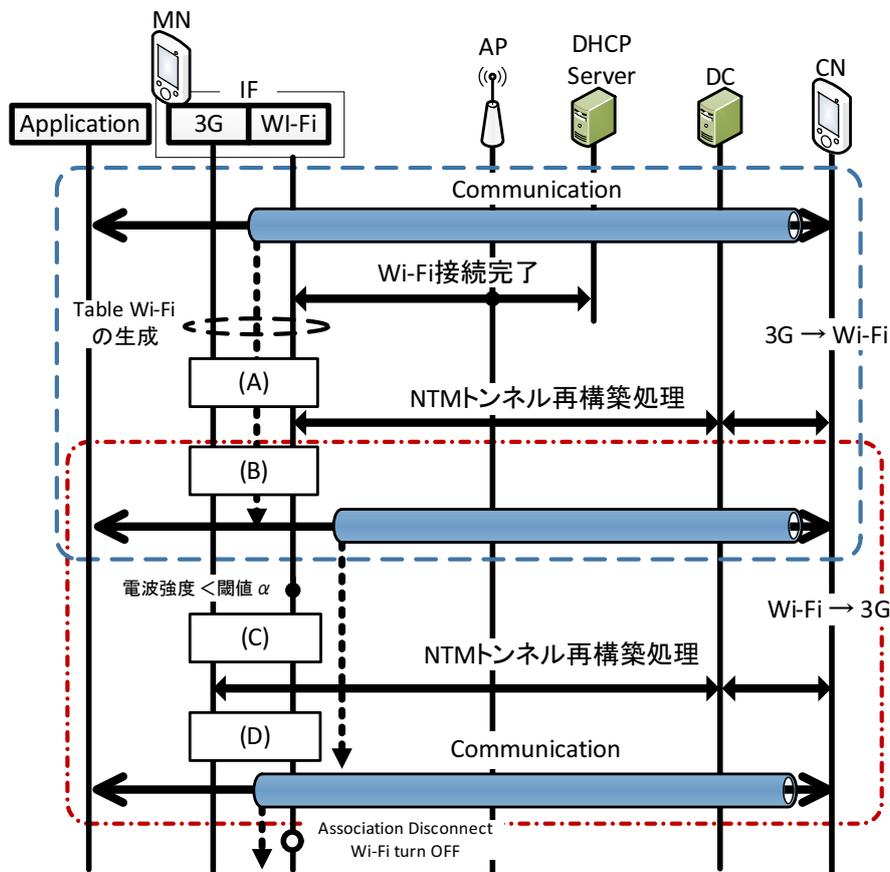


図 4.3 ポリシー設定タイミング

3G用のルーティングテーブルを生成することにより、2つのルートを確保する。ip rule コマンドにより、どちらのルーティングテーブルによりルーティングを行うかを選択することで、任意のインターフェースを用いた通信を行える。

表 4.1 に使用するポリシーを表記し、具体的なポリシーの設定タイミングを図 4.3 示す。3GからWi-Fiへのハンドオーバー時には、Wi-Fi接続が完了したときにWi-Fi用のルーティングテーブルを生成する。3G用のルーティングテーブルは、通信開始前に生成しておく。この時点で、3G用のルーティングテーブルとWi-Fi用のルーティングテーブルの2種類が存

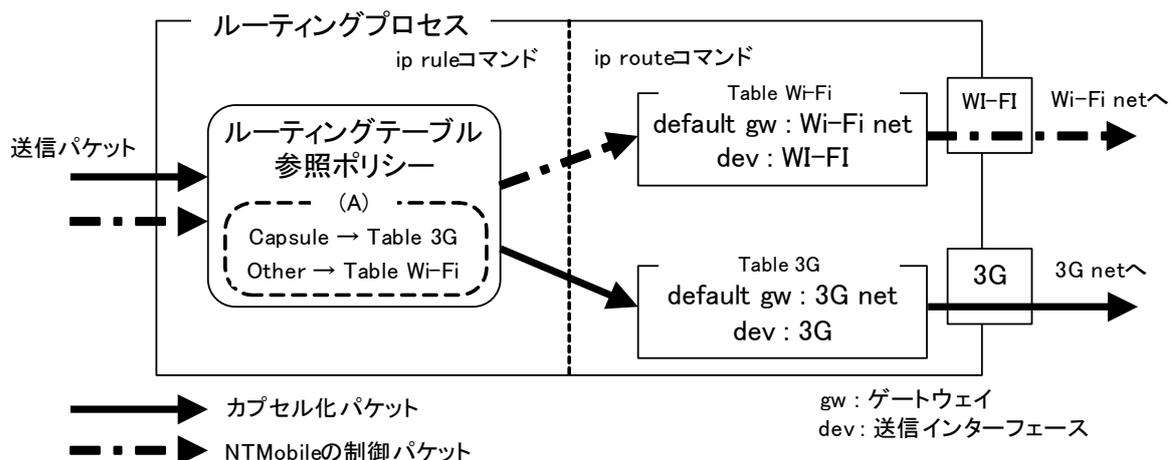


図 4.4 iproute2 を用いたパケット送信時のルーティングプロセス

在することになる．これらのテーブルを Table 3G と Table Wi-Fi と表記する．

Table Wi-Fi を生成の後，(A) のポリシーを設定する．(A) では，今までの通信を続けるために，カプセル化パケットを Table 3G を，NTMobile のトンネル再構築を Wi-Fi で行うため，カプセル化パケット以外を Table Wi-Fi を参照させる．そして，NTMobile のトンネル再構築処理完了後 (B) のポリシーを設定し，すべてのパケットを Wi-Fi から送信するようにする．(B) のポリシーにより，3G 側から Wi-Fi 側にトンネルの切り替えが行われる．

Wi-Fi から 3G へのハンドオーバー時には，通信開始時は (B) の設定によりすべて Wi-Fi から送信される．電波強度の低下により，3G へのハンドオーバーを決定した際は，(C) のポリシーを設定しカプセル化パケットは Table Wi-Fi，NTMobile のトンネル再構築を 3G で行うため，カプセル化パケット以外を Table 3G を参照するようにする．その設定後，NTMobile のトンネル再構築処理を行い，完了後 (D) のポリシーを設定し，全てのパケットを 3G から送信するようにする．

その後，Wi-Fi の接続を切断すると，Table Wi-Fi が消滅する．(D) のポリシーにより，Wi-Fi 側から 3G 側にトンネルの切り替えが行われる．

パケット送信フローを (A) のポリシーを設定したときを例にして説明する．図 4.4 に (A) のポリシーを設定したときのパケット送信時のルーティングプロセスを示す．(A) のポリシーは，カプセル化パケットは Table 3G を参照し，それ以外のパケットは Table Wi-Fi を参照するポリシーである．カプセル化パケットと，NTMobile の制御メッセージを同時に送信する場合，ポリシーによりカプセル化パケットは Table 3G を参照し，3G インターフェースから 3G ネットワークへ送信される．NTMobile の制御メッセージは，それ以外のパケットに当たるため，Table Wi-Fi を参照し，Wi-Fi インターフェースから Wi-Fi のネットワークへ送信される．よって，通信パケット (カプセル化パケット) と制御メッセージを同時に別々のインターフェースから送信することができる．

第5章 実装方法

5.1 システム構成

本研究は Android 端末上で動作させることを目的としている．よって，Android のシステムアーキテクチャが重要になってくる．まずは，Android のシステムアーキテクチャを紹介し，次に提案システムをアーキテクチャのどこに適応させるかを説明する．図 5.1 に Android のシステムアーキテクチャと提案システムの実装箇所の構造を示す．

Android のシステムアーキテクチャは以下のコンポーネントにより構成されている．

- カーネル層

Linux Kernel 2.6 以降をベースに実装されている．

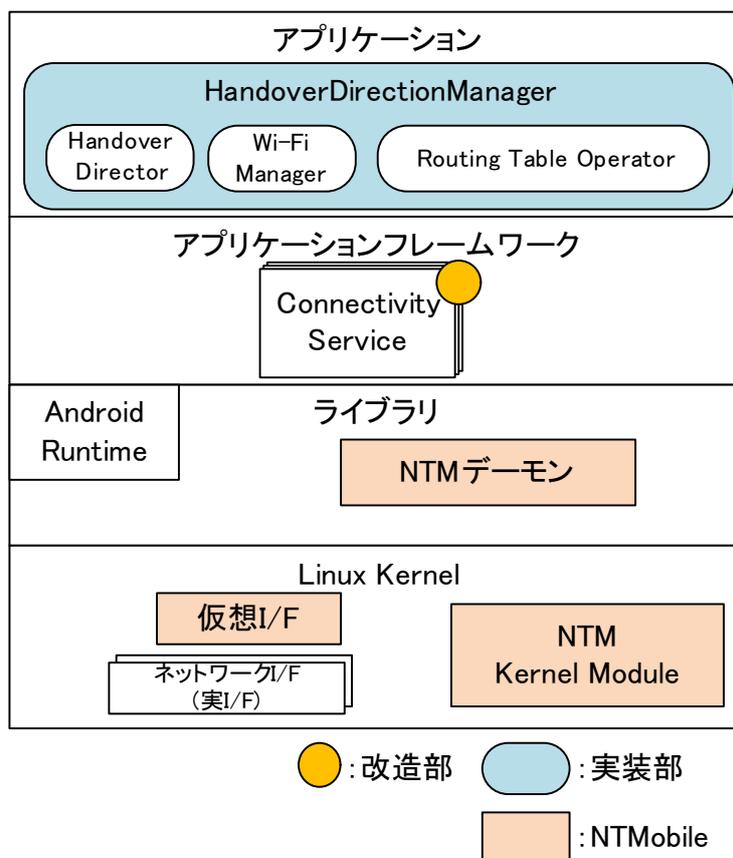


図 5.1 提案システムのソフトウェア構造

- ライブラリ層

暗号化から描画制御まで，さまざまな機能を提供するライブラリ群が組み込まれている．C/C++のライブラリも組み込まれており，ネイティブアプリケーションとして動作させることが可能である．

- Android Runtime

Android アプリはすべてこの Runtime 内の DalvikVM 上で実行される．

- アプリケーションフレームワーク層

アプリケーションフレームワーク層では主に、アプリケーションの起動から終了までの流れの管理を実施する．さらに、UI の表示やユーザによる操作など携帯端末で発生する状態変化を、各アプリケーションに伝える手段を提供している．アプリケーションで使われる様々な機能を提供する API である．

- アプリケーション層

Google Play [18] で提供されるアプリケーションや電話機能，HOME 画面機能などは全てこの層に位置する．

本提案の前提である，Wi-Fi と 3G の同時接続を実現するために，アプリケーションフレームワーク層内の ConnectivityService に変更を加えた．通常の Android は 3.2 節で示したように，Wi-Fi と 3G が同時に動作することはない．そのため，OS 内のネットワークの接続状況を監視している ConnectivityService を改造することにより，Wi-Fi と 3G を同時に接続状態にすることができる．そのために，Android のソースコード [19] のダウンロードを行い，ConnectivityService に変更を加え，Wi-Fi と 3G が同時に接続状態になるカスタム Android OS を作成した．

他の実装コンポーネントは NTMobile モジュールと HandoverDirectionManager(以後 HDM) である．NTMobile は，カプセル化などを行うカーネルモジュールとネゴシエーションを行うデーモンプログラム(以後 NTM デーモン)，仮想インターフェースにより動作する．カーネルモジュールはカーネル層に実装され，NTM デーモンはライブラリ層にネイティブアプリケーションとして実装されている．

提案方式の切り替え手法を行う HDM は Android アプリとして実装をする．HDM は，Wi-Fi 関連の処理を行う機能 (Wi-Fi Manager) とルーティングテーブルを操作する機能 (Routing Table Operator)，NTM デーモンに指示を出す機能 (Handover Director) の 3 つの機能を持つ．

次に HDM と NTMobile の関係を図 5.2 に示す．NTMobile はアプリケーションの名前解決処理を検知すると，NTM デーモンは名前解決およびトンネル構築を実行する．トンネル構築時のネゴシエーションメッセージは，NTM デーモンより実インターフェースに送信される．アプリケーションが送信するパケットは Netfilter によりフックされ，カーネルモジュールでカプセル化および暗号化が行われ，実インターフェースから送信される．また，カプセル化されたパケットを受信した際にはデカプセル化および復号処理を行い，アプリケーション

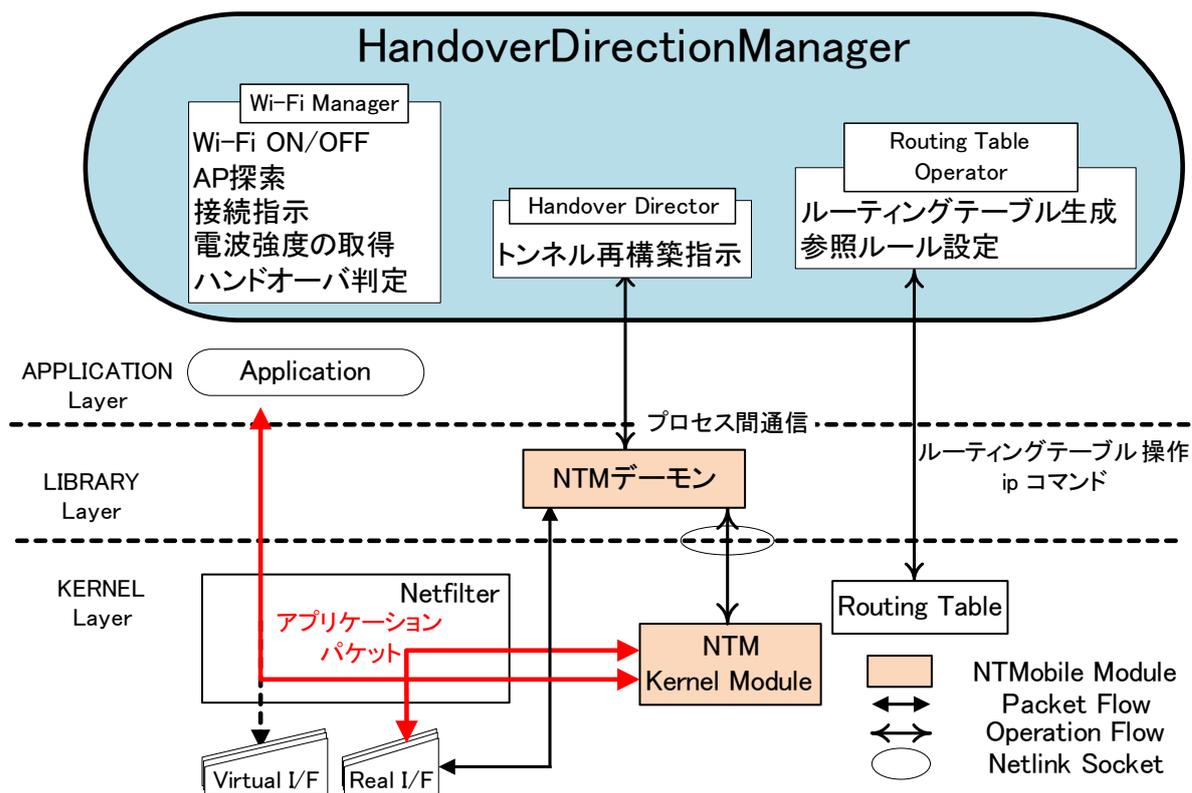


図 5.2 HDM と NTMobile の関係

ンへ渡される。HDM は、Routing Table Operator にて iproute2 を実行し、カーネル層のルーティングテーブル情報の操作やパケット参照ポリシーの設定を行う。またハンドオーバーを決定した時に Handover Director から NTM デーモンに対しトンネル再構築処理の開始を指示する

5.2 HDM の処理内容

HDM は、主に Wi-Fi Manager によって Wi-Fi の制御を行い、ハンドオーバーの決定を行う。まず、Wi-Fi で通信を行っているかを判定する。Wi-Fi で通信を行っていない場合は、Wi-Fi デバイスの ON を行い周辺の AP を探すためにチャンネルスキャンを行う。探索により得られた周辺の AP リストとアプリ内に持つ接続可能 AP リストとを比較し、接続可能リストに記載されている AP を見つけた場合、その AP との接続処理要求を OS に指示する。もし接続可能 AP がないもしくは周辺に AP がなければ Wi-Fi を OFF にし、次の実行を待つ。接続可能リストの作成方法は、Android が保持している接続履歴を取得することにより作成する。

DHCP の処理が完了し、IP アドレスの取得が完了すると、Wi-Fi にハンドオーバーすることを決定する。ハンドオーバーが決定されると、Routing Table Operator によりルーティングテーブルの更新とポリシーの設定を行う。さらに、Handover Director により、NTM デーモンに

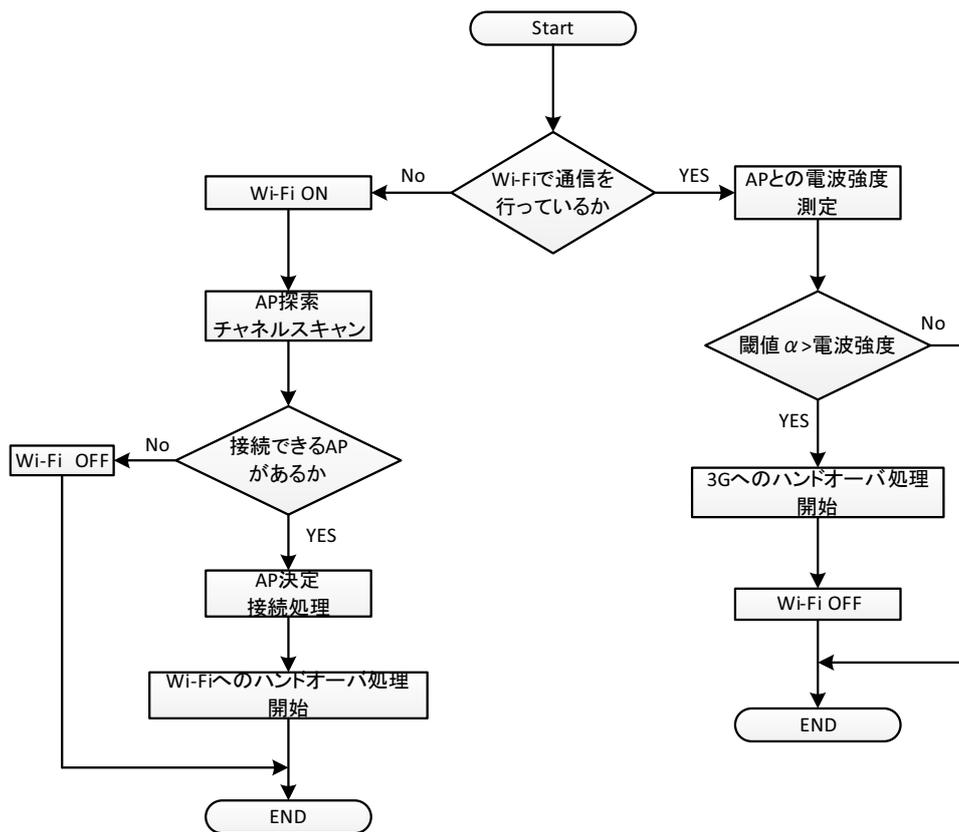


図 5.3 Wi-Fi Manager の動作フロー

対して Wi-Fi 側でトンネルを再構築する命令を出す。

また、Wi-Fi 接続がすでにされている場合には、AP の電波強度を取得し閾値との比較を行う。閾値を下回った場合、3G へのハンドオーバーを決定し、ルーティングテーブルの更新とポリシーの設定を行う。さらに、Handover Director により、NTM デーモンに対して 3G 側でトンネルを再構築する命令を出す。

これらアプリケーションの作成には、Google 社が提供する Android SDK [20] を利用して作成することで、Android のフレームワークに従ったアプリとした。Wi-Fi 制御に必要な機能は、API (Application Programming Interface) として提供されているため、これら API を利用して HDM を実装した。

ルーティングテーブルの更新は、4.4 節で示したルーティングテーブルの操作やポリシーを設定するために、アプリ内から iproute2 のコマンドを発行し、実行する。NTM デーモンへの移動指示は、NTM デーモンと HDM 間でプロセス間通信を行うことにより、メッセージの送受信を可能にした。

5.2.1 スマートフォンへの実装

提案方式を ,Nexus One¹ への実装した . 提案方式を ,Android 端末へ実装した . Android のソースコード [19] のダウンロードを行い ,ConnectivityService に変更を加え ,カスタム OS を作成した . この時使用した Android バージョンは Android2.3.7 である .

また ,カーネルに対しても一部変更を行った . iproute2 を使用するのに必要なカーネルオプションを有効にし ,カーネルの再構築を行った . その際、NTMobile で仮想インターフェースとして使用する TUN デバイスのカーネルオプションも有効にした . 有効にしたオプションは以下のオプションである . 使用した Linux カーネルのバージョンは 2.6.35.7 である .

- IP:advanced router
- IP:policy routing
- IP:equal cost multipath
- IP:verbose route monitoring
- Universal TUN/TAP device driver support

¹Google 社が販売するスマートフォン . ハードウェア設計は HTC 社が担当 .

第6章 動作確認

Android 端末に ConnectivityService に変更を加えて作成したカスタム OS を実装し，NT-Mobile と HDM の実装を行った．HDM はテスト用に，アプリ内のボタン操作により任意のタイミングでハンドオーバーが行える機能を実装し，提案方式の動作確認を行った．

6.1 実験環境

図 6.1 に示す環境でハンドオーバー実験を行った．CN には NTMobile を実装し，グローバル IP アドレスを割り当てている．NTMobile のネゴシエーションに必要な DC もグローバル IP アドレスを割り当てた．MN に，提案方式と NTMobile を実装した．3G ネットワークへの接続は b-mobile SIM のデータ通信専用のものを利用した．3G インターフェースは，グローバル IP アドレスを取得しており，Wi-Fi は AP に接続すると，プライベートアドレスを取得する．

6.2 パケットロスの測定

提案方式の性能を測定するために，6 節の環境でハンドオーバーの実験を行った．測定には iperf¹ を使い，MN と CN 間で 1470 バイトの UDP パケットを送信した．帯域制限は 128kbps

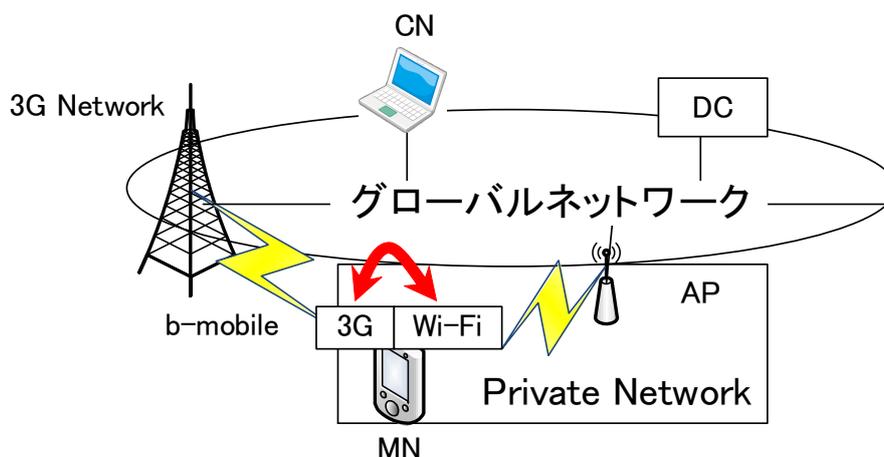


図 6.1 実験環境

¹入手先 <http://sourceforge.net/projects/iperf/>

表 6.1 パケットロス数

		NTMobile のみ適応	提案方式
3G	Wi-Fi	6	0
Wi-Fi	3G	55	0

表 6.2 スループット

測定間隔 [ms]	スループット [Kbps]
10	503
100	496
1000	500

である。1回の測定で20秒間UDPパケットを送信し、その間に切り替えの指示を1回出す。この測定を3GからWi-Fi、Wi-Fiから3Gともに各5回試行した。また、同じ環境において、NTMobileのみを実装した端末でも測定を行い、パケットロスの比較を行った。

表 6.1 に測定したパケットロス数を示す。NTMobileのみを実装し、ハンドオーバーを行った時のパケットロス数と比較すると、3GからWi-Fiのハンドオーバーでは、6パケットロスしているが、提案方式ではパケットロスは発生しなかった。Wi-Fiから3Gへのハンドオーバーでも、55パケットのロスだったところが、提案方式ではパケットロスの発生はなかった。よって、通信断絶時間が無くなり、シームレスにハンドオーバーできることを確認した。

6.3 スループットの測定

HDMは、Wi-Fi接続時に電波強度の測定を頻繁に行っているため、Wi-Fi接続時の電波強度測定間隔が通信に影響を与える可能性が考えられる。そこで、電波強度測定間隔を変化させて、スループットを比較した。HMDの電波強度測定間隔は10ms、100ms、1000msとして実験を行った。測定には、iperfを用い、MNとCN間で30秒間のTCP通信を5回試行してスループットの平均をとった。表 6.2 にスループット測定結果を示す。どの電波強度測定間隔であっても、スループットにほとんど変化がないことがわかる。このことから、電波強度測定間隔が通信に影響を与えることはほとんどないことを確認した。

第7章 まとめ

本稿では，Android OS に変更を加えることにより，Wi-Fi と 3G の同時接続を可能にし，通信断絶時間の発生を除去した．ハンドオーバ手法では，トンネルを事前に準備することで，パケットロスが発生しないハンドオーバ手法を提案した．iproute2 により経路を制御することで，同じ相手に対して一方のインターフェースで通信をしながらもう一方のインターフェースで NTMobile のネゴシエーションを同時に送信することを可能にし，事前にトンネルを構築しておくことを可能にした．動作確認の結果，パケットロスのないシームレスなハンドオーバが可能であることを確認した．また，HMD が通信に影響を与えることがほとんどないことを確認した．

本提案のハンドオーバトリガーとして電波強度のみで判断しているため，回線の混雑状況や回線速度等を考慮することにより利便性が向上すると考えられるため，今後の検討課題として検討を進めたい．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，多大なるご指導そしてご協力を頂きました，名城大学大学院理工学研究科 渡邊晃教授に心より厚く御礼申し上げます．また，本論文を制作するにあたり，多大なるご指導そしてご協力をいただきました，名城大学大学院理工学研究科 柳田康幸教授，旭健作助教，鈴木秀和助教に心より厚く御礼申し上げます．日々の研究指導において多大なるご助言とご指導をいただきました，三重大学大学院工学研究科 内藤克浩助教に心より厚く御礼申し上げます．日々の研究活動に対して様々なご助言とご指導を頂きました名城大学理工学部情報工学科の鈴木秀和助教に心より感謝いたします．また，本研究を遂行するにあたり，多大なるご助言そしてご協力いただきました，名城大学大学院理工学研究科 鈴木研究室 上醉尾一真氏に心より感謝いたします．本研究の方式検討において，有益なご助言，適切なご検討をいただきました，渡邊研究室の皆さまに心より厚く感謝いたします．

参考文献

- [1] Le D., Fu X. and Hogrefe D. : A Review of Mobility Support Paradigms for the Internet, IEEE Communications Surveys, Vol. 8, No. 1, pp. 38-51 (2006)
- [2] 鈴木秀和, 上酔尾一真, 水谷智大, 西尾拓也, 内藤克浩, 渡邊 晃 : NTMobile における通信接続性の確立手法と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.54, pp.367-379(2013)
- [3] 内藤克浩, 上酔尾一真, 西尾拓也, 水谷智大, 鈴木秀和, 渡邊 晃, 森香津夫, 小林英雄 : NTMobile における端末アドレスの移動管理と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.54, pp.380-393(2013)
- [4] 上酔尾一真, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃 : IPv6 ネットワークにおける NTMobile の検討, 情報処理学会研究報告, Vol. 2011-MBL-59, No. 9, pp. 1-8 (2011)
- [5] 上酔尾一真, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃 : IPv4/IPv6 混在環境で移動透過性を実現する NTMobile の実装と評価, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム論文集, Vol.2012, No.1, pp.1169-1179(2012)
- [6] 上酔尾一真, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃 : NTMobile の Android 端末への実装と評価, モバイルコンピューティングとユビキタス通信 研究報告, Vol.2012-MBL-62, No.19, pp.1-8(2012)
- [7] 金本綾子, 鈴木秀和, 伊藤将志, 渡邊 晃 : IPv4 移動体通信システムにおけるパケットロスレスハンドオーバーの提案, 情報処理学会論文誌, Vol.50, pp.133-143(2009)
- [8] IEEE : IEEE 802.21 Media Independent Handover Services IEEE Std., 2009
- [9] PERKINS, C. : IP mobility support for IPv4 RFC3344, 2002
- [10] JONSON D. : Mobility Support in IPv6 RFC3775, 2004
- [11] Wakikawa, R. Devarapalli, V. Tsirtsis, G. T. Ernst, K. N. : Multiple Care-of Addresses Registration RFC5648, 2006
- [12] 三屋光史朗, 北地三浩, 長澤知津子, 守田空悟, 横田知好, 湧川隆次, 村井純 : IEEE802.21 を用いたスムーズな異種メディア間ハンドオーバーシステムの実現, 情報処理学会論文誌, Vol.49, pp.335-349(2008)
- [13] 竹内元規, 鈴木秀和, 渡邊 晃 : エンドエンドで移動透過性を実現する Mobile PPC の提案と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.47, pp.3244-3257(2006)
- [14] 西尾拓也, 内藤克浩, 水谷智大, 鈴木秀和, 渡邊 晃, 森香津夫, 小林英雄 : NTMobile における端末アドレスの移動管理と実装, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2011) シンポジウム論文集, Vol.2011, No.1, pp.1139-1145(2011)

- [15] Linux Advanced Routing & Traffic Control HOWTO :
<http://linuxjf.sourceforge.jp/JFdocs/Adv-Routing-HOWTO/>
- [16] L. M. S. C. of the IEEE Computer Society : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11, 1999
- [17] IEEE : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications : Medium Access Control (MAC) Security Enhancements, IEEE Std 802.11i, 2004
- [18] Google Play : <https://play.google.com/store>
- [19] Android Opensource Project : <http://source.android.com/>
- [20] Android Developer : <http://developer.android.com/>

研究業績

国内会議（査読あり）

1. 福山陽祐, 鈴木秀和, 渡邊 晃：IPv4 移動体通信において携帯電話網と無線 LAN 間をシームレスに移動する方式の提案, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DI-COMO2011) シンポジウム論文集, Vol. 2011, No. 1, pp. 1115-1120 (2011).

研究会・大会等

1. 福山陽祐, 鈴木秀和, 渡邊 晃：携帯電話網と無線 LAN 間をシームレスに移動する Mobile PPC の提案, 年度電気関係学会東海支部連合大会論文集, Aug.2010 .
2. 福山陽祐, 鈴木秀和, 渡邊 晃：通信中に携帯電話網と無線 LAN 間をシームレスに移動できる MobilePPC の提案, 情報処理学会第 73 回全国大会講演論文集, pp.21, Mar.2011 .
3. 福山陽祐, 鈴木秀和, 旭 健作, 内藤克浩, 渡邊 晃：Android 端末における Wi-Fi/3G 間のシームレスハンドオーバの提案と実装, 情報処理学会 モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL) 研究会 第 65 回 MBL 研究発表会 (発表予定)