

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 7 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500085

研究課題名（和文） 仮想単一セル化マイクロセル連結方式の研究

研究課題名（英文） Mobility control to make micro-cells seem a virtual single cell

研究代表者

山田 喬彦（YAMADA TAKAHIKO）

立命館大学・総合理工学研究機構・教授

研究者番号：00268161

研究成果の概要（和文）：

大容量 IP 通信を可能とするマイクロセルによる大規模移動通信網の構築をめざし、端末が移動してもあたかも単一セルに滞留しているように見せかける仮想単一セル技術の研究を行った。既存移動通信網を含む統合移動通信網構成を提案し、シミュレーションによる仮想単一セルの効果を示し、制御集中を排除する移動管理のアルゴリズム、無線資源の効率化に向けた無効ポーリング削減法のアルゴリズム、複数基地局が連携したマイクロセル構成を考案した。

研究成果の概要（英文）：

A new micro-cellular network based on a virtual single cell concept which allows high performance in IP packet transportation is presented. In detail, an integrated mobile network is proposed which includes conventional macro-cellular network, WLAN and the proposed virtual single cell network. The simulation result on packet transfer performance in wireless section is shown. Mobility control algorithms to avoid concentrated processing and to minimize the frequency of vacant polling which the virtual single cell architecture draws.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：移動通信・マイクロセル・高速移動・高速転送・マルチメディア・移動制御

1. 研究開始当初の背景

自動車電話から出発した移動通信は大きな発展を遂げ、電話通信に限れば固定電話を超える通信手段となっていた。一方、固定通信の世界では電話中心の通信網体系からインターネット通信体系への移行が進みつつあった。

このような状況の下で移動通信も次の段階として固定通信と同様に IP ベースによるマルチメディア通信網へ発展していくことが想定された。これには通信速度を速めることが必須である。ただし、移動通

信では固定通信のように光ファイバのような高速伝送媒体はない。無線通信はあく

まで空中通信であり、そこには無線資源（利用できる周波数帯）ネックの問題が横たわっている。限られた無線資源の範囲で高速マルチメディア移動通信を実現していくにはマイクロセルの採用が必須である。セルサイズを小さくして空間的な無線資源の再利用を行えば利用可能な無線資源は増大し、無線資源問題の解決が可能となる。

ただし、マイクロセルを大規模に利用した移動通信網を実現するには高頻度ハンドオーバーの問題を解決する必要がある。セルが小さくなると移動速度が速い移動体ではセル間移動（ハンドオーバー）の頻度が増大する。これによって転送不連続が生じ、円滑な高速パケット転送が不可能となる。

したがって、報告者は将来に向けてはハンドオーバー問題を解決し、大規模にマイクロセルを利用する新しいネットワークが必要と考えた。マイクロセル当時は現在も繁華街などトラフィックが多く、混雑の激しい地域に補完的に利用されるに過ぎない。なお、研究開始時には現在のスマートフォンの普及は予想されていなかった。現在、スマートフォンの急速かつ大規模な普及が進み、無線資源ネックの解決は今や緊急の課題である。

2. 研究の目的

(1) 研究対象の基本概念

上記の背景のもとに本研究の提案者はマイクロセル網による仮想単一セル網の概念構築を行ってきた。仮想単一セル網は、図1(a)に示すように複数マイクロセルを連結した論理マクロセルと論理マクロセルの移動管理によって実現される。これらの多数のマイクロセルは主要道路沿いに設置されるものと想定している。トラフィックが多く、高頻度のハンドオーバーが問題となるのは多量の自動車が存在するエリアである。

仮想単一セル網においてはまず、単一論理マクロセル内の移動を隠ぺいする。論理マクロセルとは端末の在圏が想定されるマイクロセルを中心として隣接するマイクロセルを一つの仮想セルとして扱うものである。論理マクロセル内の各マイクロセルでは同一端末に向けて同一のポーリングを発し、応答のあったセルでパケット転送をおこなう。これによって論理マクロセル内のどのセルに位置してもパケット転送を行え、論理マクロセル内の移動を隠ぺいできる。なお、端末に向けたパケット転送では論理マクロセル内の各基地局にあらかじめ送信パケットをマルチキャストしておく。また、応答を得た基

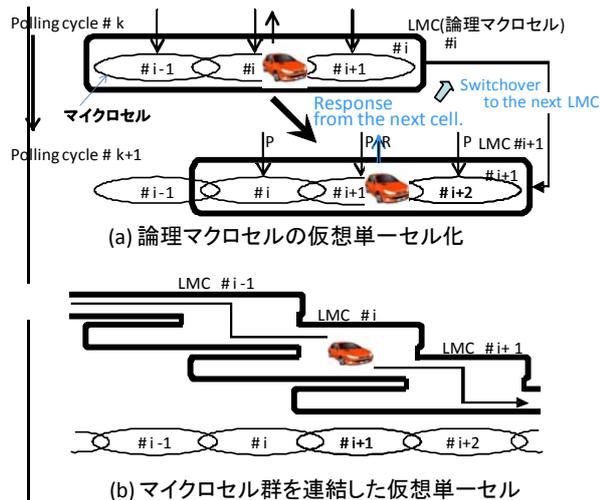


図1 仮想単一セルの概念

地局ではポーリング応答信号を無応答となっている他の基地局にもマルチキャストし、論理的な連続性を維持する。

広域の移動隠ぺいに向けては論理マクロセルの端末移動への追従を行う。端末が中心セルから隣接セルに移動したことを検出すると旧論理マクロセルから隣の新論理マクロセルに切り替える（図1(a)）。端末の移動に合わせ、図1(b)に示すように次々と新しい論理マクロセルに切り替える。すると図1(b)に示すように端末は論理マクロセルに囲まれて移動を続ける。したがって端末が移動する範囲が仮想単一セルであり、端末はあたかも一つのセルに滞留してパケット転送を行うように仮想化できる。

(2) 研究目標の具体化

本研究では上記の概念を実際のシステムとして構築可能とするための基本技術の研究を行う。ネットワーク全体にわたるため多くの課題があるが、以下を重点目標として研究を進めることとした。なお、新しい方式であり、研究目標、研究課題を見出すことも研究である。

① 既存移動通信網との連携法

すでにマクロセルベースの移動通信網が普及しており、提案技術が単独で利用されることはない。社会的に有効とするため位置づけと連携法を示す。

② 仮想単一セル網の効果評価

仮想単一セル網がハンドオーバーの隠ぺいに効果があることは概念的には明確であり、実際にどの程度の効果があるかをシミュレーションによって示す。

③ 制御の集中を排除する移動管理の考案

ポーリング実行自身は各基地局に分散可能であるが、ポーリング結果の通知、論理マ

クロセルの切り替え、パケットの組み立てなどで通信と共通処理が生じる。これらはシステムの性能限界の要因となるものであり、極力の分散処理化を実現するアルゴリズム実現に取り組む。

④ 無効ポーリング対策

論理マクロセル構成では端末が在圏していないセルにもポーリングを発する。これは無線資源の無駄使いともなる。極力の無効ポーリングを不要とする制御アルゴリズムの考案に取り組む。

⑤ 新しい無線セル構成の考案

仮想シングルセル構成では各無線セルの作りは従来とは異なるものになると考えられる。従来はハンドオーバーを実現するため、旧セル内で新セルの通信可能性を見出して制御を渡す必要があり、セル間電波の重なりが必要とされたが、隣接複数セルへの多重ポーリングではセル間の無線の重なりは必要でない。また、従来構成では基地局の数を減らすため電波到達領域を極力大きくすることが求められたが、仮想シングルセルではむしろセル境界を明確化し、セルの数を増やして通信容量を拡大することが必要となる。

したがって、提案方式では従来の基地局を中心とするセル構成（図 2(a)）でなく、複数基地局の間にセルが存在するようなセル構成を追及する。

3. 研究の方法

本テーマはシステム研究であるが、プロトタイプ構築以前の基礎段階の研究であり、机上検討と計算機シミュレーションによる評価が中心となる。

(1) 机上検討による検討

主に机上解析による対案比較を行う。道路沿いに連結して設置するマイクロセルとい

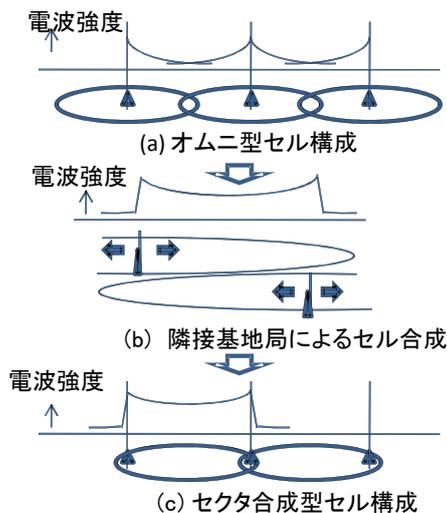


図 2 複数基地局による合成セル

う適用条件、動作環境を想定し、最悪条件を想定しつつ課題の解決案、対案比較を行う。なお、小規模セルに特化しており、無線インタフェースについては無線LANを参考とする。ただし、保証型の通信を前提としており、網の条件としてはマクロセルベースの移動通信網の設計条件を参考にする。

(2) 計算機シミュレーション

フリーウェアシミュレーションプログラム OMNET++を用いて性能評価を行う。

4. 研究成果

上記の課題に基づき、研究を行ったが、成果は公表物としており、ここではその一部を抜き出して示す。

(1) 既存移動通信網との連携法

マイクロセルは無線資源を有効に利用し、高速通信の容量増大に有効であるが、全域を面的にマイクロセルで埋め尽くすのは現実的ではない。ユーザ過疎の領域も多く、セル数が膨大になり、大規模の投資を必要としながら多くのマイクロセルでセル内にユーザが一人もいない状況が生じてしまう。基本的にはトラフィックが多いところでマイクロセルを設置し、マイクロセルの設置されていない広いエリアをマクロセルがカバーする形態が自然である。一方で現在の移動通信網と WiFi のような独立な通信網では通信網では効用がうすれる。

上記の観点からは図3のようなIPベースの統合移動通信網化が有効と考えられる。単一セル仮想化網は都市部のユーザ密度の高いエリア、さらに主要道路沿い配置する。仮想単一セル網は移動を隠ぺいできることから高速移動端末に対してマクロセルベースの移動体通信よりも円滑にパケット転送を行える。ユーザ数の多い領域を仮想単一セル網がカバーすると残りはユーザ低密度

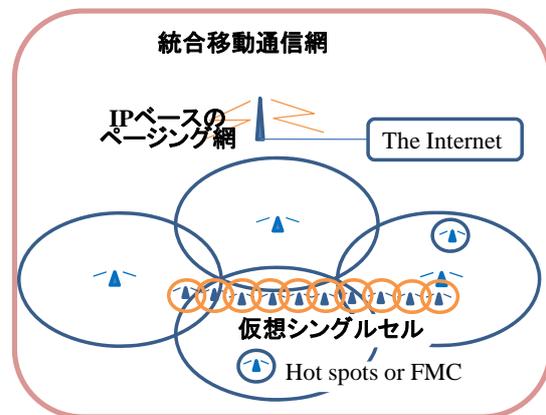


図 3 統合移動通信網の概念

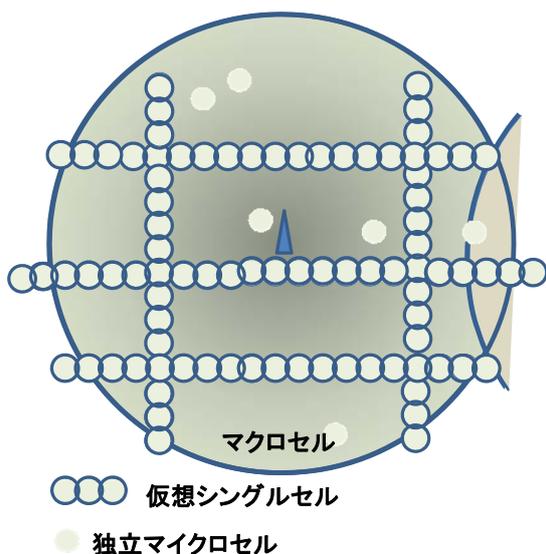


図4 マクロセルとマイクロセルの配置

領域となり、広い範囲を既存移動通信網がカバーできる。ユーザが移動しない駅中や商業施設では小規模マイクロセルが機能する。

3種の網の統合化に向け、これらの網に共通に機能するページング網(メタ信号網)を設ける。またこれらの網の間では垂直ハンドオーバー機能を設け、3種の網の間の連携をとって統合移動通信網を構成する。

仮想単一セル網がマクロセルベースの網と連携をとることによってどの程度の容量増大が図れることを図4のモデルで評価した。既存移動通信網に対応するマクロセルと仮想単一セル網であるマイクロセルとが同一無線資源を利用する場合は無線資源の排他的な配置が必要である。ただし、マクロセル内に配置されたマイクロセルは他のマクロセルの資源を利用して繰り返し単位を作れる。マクロセルの繰り返し単位を n とするとマイクロセルの繰り返し単位は $n-1$ となる。マイクロセルは一次元配置であり、マクロセルの資源衝突は生じない。ただし、マクロセル同士が重複している境界領域にマイクロセルを配置する場合はマイクロセルにマクロセルが利用しない資源配置が必要となる。これは繰り返し単位の増大となり、損失 ($sN/(sN+n)$) が生じる。厳密には重複するマクロセルが利用しない資源を割り当てることが可能であるが、設備設計の単純化を考慮して排他的資源割り当てとする。安全側の評価である。

仮想単一セル網の配置による性能向上率を表1に示す。ここで N : マクロセルの資源

表1 統合移動通信網の性能向上率

P	10	50	100	150	200
0.7	6	27	53.3	79.5	105.8
0.8	6.8	30.8	60.8	90.8	120.8
0.9	7.5	34.5	68.3	102	135.8

再利用繰り返し数、 n : マクロセルオーバーラップ領域に入るマイクロセル数、 s : マクロセルのセクタ数である。なお、マイクロセルではセクタ分割はしない。常識的に $s=3$ 、 $n=3$ とすると上式は $3N/(3N+3)=N/(N+1)$ となる。 $n=3$ ではマクロセルのオーバーラップ領域をカバー出来ない可能性があるが、3種類のセルがあり、繰り返し利用を行えば良い。

これらを考慮した統合網の容量増大比率は $T = sN(1+pm)/(n+sN) = N(1+pm)/(1+N)$ である。ここで T : ネットワークの容量増大比率、 m : マクロセル内の平均マイクロセル数、 p : マイクロセルの容量低減率(多重ポーリング等による仮想単一セルオーバーヘッド)である。 N についてもセクタ方式を考慮して繰り返し数 N を3とすると、 $T=0.75(1+pm)$ となる。評価の一例を表1に示す。空セルへの冗長マルチポーリングによって性能が $p=0.8$ 程度に低下するとし、1個のマクロセル内のマイクロセル数を50個とするとネットワークの容量はマクロセルのみの性能に対して約31倍となる。

(2) マルチポーリングの効果の評価

仮想単一セル方式の主要技術であるマルチポーリングの効果の評価のためフリーウェア OMNET9++によるシミュレーションを行った。表2に示すシミュレーションパラメータを用いた。802.11仕様の無線インタフェースを前提としている。

比較対象に著名なリンクレイヤ高速ハンドオーバー技術である、SyncScan、DeuceScan、MBBrkを用いた。対象とする3種の方式は以下のとおりである。

SyncScan: あらかじめ隣接セルの情報を得ておいて隣接セルのビーコンを走査する。可能性のあるビーコンの中から対象となるビーコンを探し出す操作が必要である。また、コンテンツベースであり、ハンドオーバー時には移動先セルでの再登録が必要である。

DeuceScan: 隣接セルのビーコンの時間空間

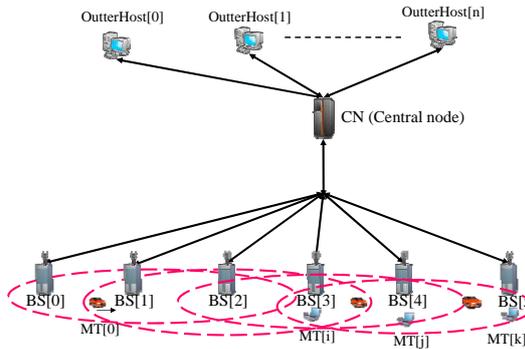


図 5 シミュレーションモデル

情報を入手しておく。移動に合わせてあらかじめもっとも近い隣接セル情報をえることができる。候補となる基地局から対象となる基地局を探し出す操作が不要である。ただし、コンテンションベースであり、新セルへの移行時に再登録が必要である。

MBBrk: コンテンションベースの転送制御を行う無線インタフェースカードを二つ用意しておく。一方はデータ転送用に用いる。もう一方は制御カードとして利用する。この制御カードを用いてハンドオーバー先のセルのビーコンを絶えず走査し、有効なハンドオーバー先を見出した時ハンドオーバーをデータ転送と並列に実行する。ハンドオーバーを実行後はカードの役割が交代する。制御カードはハンドオーバーを実行後は継続して新セルでのデータ転送を行う。旧データ転送用カードは新セルでは制御カードとして動作する。この方式はハンドオーバー遅延を削減できるが、2つの無線インタフェースを必要とし、また無線環境が重複するような場合、間違ったハンドオーバーを「実行してし合う可能性ある。

図5にシミュレーションモデルを示す。10個の基地局がリング状に接続され、1 Gbpsのイーサネット外部ホストに接続されている。負荷を加えるための移動体が各セルに配置されている。評価対象の移動体は時速100kmで10個のセルを回り続ける。

図6に評価の一例としての負荷量の増加とハンドオーバーを伴うパケット転送間隔の

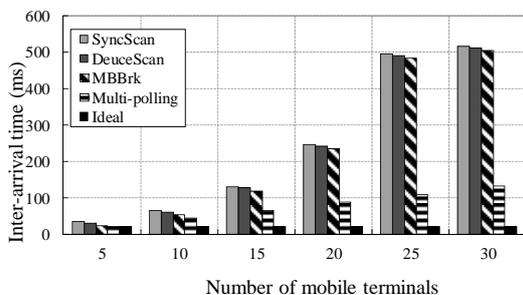


図 6 移動端末の増加とパケット到着間隔

表 2 シミュレーションパラメータ

Parameter	Value
Number of base stations	10
Number of mobile terminals	16 ~ 91
Network region	3000m x 1500m
Wireless channel rate	54Mbps
Transmitter power	10mW
Radio frequency	5GHz
Radio propagation range	300m
Packets size	1000 bytes
LMC size	3 micro -cells
TRH _{hand}	-85dB
TRH _{sel}	3dB
TRH _{mes}	-79dB

変化を示す。端末数が増加するとコンテンション操作の必要な既存方式では衝突再試行が生じ、パケット転送間隔の増加が現れるが、提案方式は短い転送間隔が保たれ、優位性が明らかである。

制御の集中を排除する移動管理の考案

基地局間を連結する地上網としては PON (Passive Optical Network) を用いる。FTTH (Fiber-To-The-Home) 概念に基づくインターネットアクセス手段であり、多数の移動局を経済的に連結できる。また、PON は上位から下位へ放送型で通信を行うため論理マクロセルへの通信に適している。

論理マクロセル起動手順、パケット転送通信、論理マクロセル切り替えのための通信手順を分析した。一例を図7に示す。こ

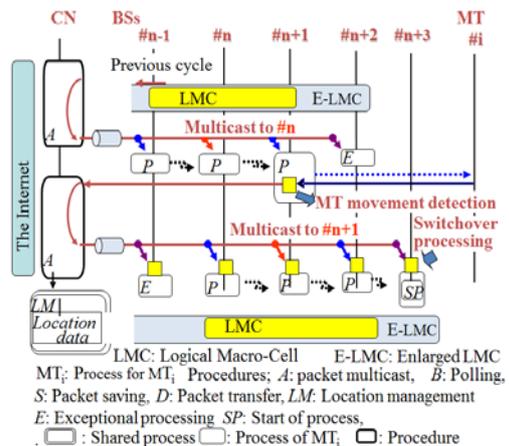


図 7 論理マクロセル切り替え手順の例

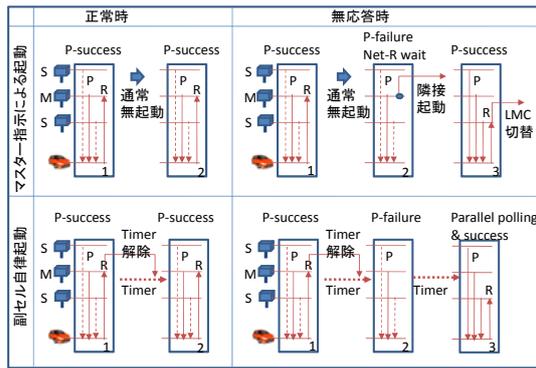


図8 無効ポーリング対策

の検討の中で拡張論理マクロセルによるセル切り替えアルゴリズムを考案した。これは実際に無線ポーリングを発する論理マクロセルの外側に無線ポーリングを発せず、論理マクロセルの論理動作のみを行うもので、新セル組み込み、パケットの予備蓄積、旧セルの排除の準備を行う。これにより論理マクロセル切り替え時の通信手順を単純化できる。

(3) 無効ポーリング対策

端末が中心セルに在圏していることが明らかでない場合は周辺セルでのポーリングを休止する。ただし、この場合ポーリング無応答か、隣接セルへの移動での無応答か識別できなくなる。

この対策として図8の2種のアプローチを考案した。第1は再起動を主セルから能動的に行う方式、第2はタイマーを用いて自律的に行う方式である。

両方式とも無効ポーリングを削減し、かつ無応答への再試行への時間短縮が可能である。

(4) 新しい無線セル構成の考案

ドップラー効果を考慮したセル構成を検討しているが、現時点では継続検討が必要である

むすび

限られた無線資源の中でより高速で、かつ大容量の移動通信が求められるようになってきた。マイクロセルの多用が必須であり、このためには高頻度ハンドオーバーの問題の解決が必須であり、本研究はその解決策の一案を示した。無線セルの詳細構成についての研究が未完成であり、今後引き続き検討を続ける予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 著者名: Thanh Hoa Phan, Gaute Lambertsen, Takahiko Yamada、論文表題: Seamless handover supported by parallel polling and dynamic multicast group in connected WLAN micro-cell system、雑誌名: Computer Communication、査読: 有、巻: 35、発行年: 2012、89-99.
- ② 著者名: Phan Thanh Hoa, Gaute Lambertsen, Takahiko Yamada、論文表題: Polling-Based High-Bit Packet Transfer in a Microcellular Network to Allow Fast Terminals、雑誌名: IEICE TRANS. Commun.、査読: 有、巻: E92-B、発行年: 2009、ページ: 275-280

〔学会発表〕(計9件)

- ① 発表者: Phan Thanh Hoa, Takahiko YAMADA、発表表題: From Macro-cell to micro-cellular system to offer road communication to vehicle、学会名等: APCC2010、発表年月日: 2010年11月1日、オークランド(ニュージーランド)
- ② 発表者: Phan Thanh Hoa, Yamada Takahiko、発表表題: Cooperative control of connected micro-cells for a virtual single cell for fast handover、学会名等: CSDNP、発表年月日: 2010年7月22日、発表場所: ニューキャッスル(イギリス)
- ③ 発表者: Takahiko Yamada, Phan Thanh Hoa、発表表題: Virtual single cells over a micro-cellular network along roads supporting vehicular multimedia、学会名等: The Fully Networked Car Workshop by ITU、発表年月日: 2010年3月4日、発表場所: ジュネーブ(スイス)
- ④ 発表者: Phan Thanh Hoa, Takahiko YAMADA、発表表題: High-speed infrastructure cellular network for vehicular users、International workshop on communication technologies for vehicles、学会名等: ICUMT、発表年月日: 2009年10月14日、発表場所: サンクトペテルブルグ(ロシア)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 喬彦 (YAMADA TAKAHIKO)

立命館大学・総合理工学研究機構・教授

研究者番号: 00268161