

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11781

研究課題名(和文)無線システムにおける端末主導ハンドオーバーの研究

研究課題名(英文)Research on terminal-oriented handover in wireless systems

研究代表者

西村 俊和(NISHIMURA, Toshikazu)

立命館大学・情報理工学部・准教授

研究者番号：00273483

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：無線システムにおける基地局(BS)間ハンドオーバー(HO)の数理モデルを構築してその性能を評価した。確率的ペトリネットと連続時間マルコフ連鎖を用いて、各システム状態の定常状態確率を求め、特定のシミュレーション初期条件やシナリオに依存しない、より理論的な解析を可能にした。ヘテロジニアスセルラー網におけるトランザクション失敗率とセル間HOの関係を明らかにした。成果を国際学会で発表し学術的議論を促進した。近隣のBSに同期リソースを事前に割り当てて移動端末(MT)にそのリソース情報を格納することで、端末主導型HOを支援する手法を提案した。これにより移動元BSとの通信が途絶えてもMTは自律的にHOできる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、無線通信システムの効率化と信頼性の向上に寄与すると考える。数理モデルによる解析は、実際の無線ネットワークの運用において、ハンドオーバーの最適化とシステム障害の予防に役立つ。また、端末主導のハンドオーバー支援手法は、移動端末の通信品質を維持しつつ、ネットワークリソースの有効活用を可能にすることで、次世代の無線通信技術の発展に貢献すると考える。

研究成果の概要(英文)：In this study, we constructed a mathematical model for inter-base station handover in wireless communication systems and evaluated its performance. By using Stochastic Petri Nets and Continuous-Time Markov Chains, we calculated the steady-state probabilities of each system state, enabling more theoretically precise analysis independent of specific simulation initial conditions or scenarios. Specifically, we investigated the relationship between transaction failure rates and inter-cell handover in heterogeneous cellular networks, presenting our findings at international conferences to foster academic discussions. Additionally, we proposed a novel approach to support terminal-driven handover by pre-allocating synchronization resources from neighboring base stations and storing Random Access Preamble (RAP) information in mobile terminals. This approach allows mobile terminals to achieve handover autonomously even when communication with the source base station is disrupted.

研究分野：無線通信システム、数理モデル、ネットワークシミュレーション

キーワード：無線システム 基地局間ハンドオーバー 確率的ペトリネット(SPN) 連続時間マルコフ連鎖(CTMC) ヘテロジニアスネットワーク トランザクション失敗率 端末主導ハンドオーバー 5G

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1 . 研究開始当初の背景

セル無線システム(セルラー網)や無線 LAN (Wireless Area Network)などに代表されるワイヤレスシステム(無線通信網)技術は、利用者や自動車など移動体に通信を提供可能な技術である。ネットワーク技術の進展に伴って移動体通信の需要が急増する一方、自然法則に由来する電波帯域を技術革新で飛躍的に向上させることは難しい。よって電波資源を地理的に繰り返し利用するセルラー網が現在広く用いられている。セルラー網では、移動端末のセル間移動に伴う基地局切り替え(HO: ハンドオーバー)を避けることは原理的にできない。セル内の移動端末当たりの通信容量とHO頻度は原理上セル半径に強く依存しており、一基地局のサービス範囲を絞った小セルでは収容移動端末数を少なくすることで移動端末当たりの通信を大容量化できるが、端末移動に伴ってHOが頻発してHO失敗割合が増加することが問題である。

従来型のHOでは、移動端末がHO元セルとHO先セルの双方と通信可能な重複領域(以下HO区間)が必ず必要であり、このHO区間を通過中にHO手順を必ず完了する必要がある。通常の大セルではHO手順時間に対して十分なHO区間が設定でき、高速移動をしてもHOが失敗することは僅少である。HO手順時間は地上網交換機と移動端末とのプロトコルに依存しているためセルの大小には無関係で、従って小セル間HOを行おうとすると、原理上通常セルと同程度のHO区間を設けなければならない。また、放射電波は距離の二乗に反比例して減衰するため同じ距離移動に対する電波強度の変化は小セルのほうが大きく、移動端末がHO元セルからの電波強度低下を認めてHO手順を開始した時にはすでに通信が不安定になってHOに失敗するおそれも増加する。

これまでのセルラー網では電波資源などの地上網側管理のために、地上網主導のHOが用いられてきた。セルラー網とは異なった地上網制御方式を持つ無線LANのような別無線システムと折り合いをつける垂直HOについても、この方針をそのまま導入した方式はIEEE 802.21技術標準など多数の研究と技術的提案がこれまでなされているにもかかわらず、通信会社間でのプロトコル合意は進まず、従って今日に至るまで実現には至っていない。これは様々なAUP(Acceptable Use Policy; 利用目的に関する制限)や利用契約・約款などに基づく制限が地上網側にあるにも関わらず、地上網側で垂直HO制御を行うのが根本原因であると考えられる。セル無線システムにおいて原理上避けられないHOに関するこのような問題を追及することが本研究の学術探求の本質である。

2 . 研究の目的

セルラー移動網では、移動端末(以下MT)が在圏BS(Serving BS; 以下SBS)のセル外に移動する前に移動先BS(Target BS; 以下TBS)セルに無線区間を切り替えてハンドオーバー(以下HO)する[2]。従来のセルラー移動網では、HOの開始は地上網の交換機あるいは5GコアネットワークのAMF(Access and Mobility Management Function)のようなモビリティ管理の装置(以下SW)からMTに指示される。これをここでは地上網主導型HO(Backhaul-oriented Handover; 以下BoHO)と呼ぶ。BoHOではSWはSBSのセル無線区間を通じてMTにHO指示を行う。また、HO完了時にMTがTBSのセルの在圏外だと無線区間通信が途絶するため、SBSとTBSのセル共通領域にMTが在圏中にBoHOする必要がある。従ってこのBoHOアプローチには

- ・SBSとTBSのセルはある程度オーバーラップしていて、HO区間としてセル共通領域が必要である。

- ・HO区間内でHO手順が完了しないとMT通信が途絶するため、高速移動MTの支援には高速HO手順が必要となる。

など原理上避けられない問題がある。

小セルを用いると、半径数キロ程度の大セルと比べてセル内のMT数が減少しMTあたりの無線区間帯域が増加するが、BoHO用のセル共通領域はマクロセルと同様の面積を維持しないと高速移動MTに対応できない。これは小セルセルラー移動網構成の技術的問題点の一端を示している。

さらに、5G(第5世代移動通信システム)で利用が期待されるミリ波帯では、空間フェージングや障害物などの要因により、信号伝搬における損失が増大する。大規模なセルカバレッジを実現することは、既存のマクロ波帯に比べて困難になる。従来研究の多くが制御面(C-plane)として大セルを仮定してきたのに対して、ここでは別アプローチとして小セルだけからなるセルラー移動網構成を考える。

本研究では、BoHOに起因するこれらの問題に対処するための根本的な解決策として、端末主導型HO(Terminal-oriented Handover; 以下ToHO)を提案する。ToHOは、HO手順のための地上ネットワークへの依存を軽減し、MTが独立してHO手順を開始する手段を提供する。

以上のような背景から、本研究の目的は、ToHOアプローチの実現可能性と有効性を議論す

ることである。セルラーモバイルネットワークの HO 手順を改善する手段として、ToHO を実装することの技術的側面および意味を分析する。HO 開始のための地上ネットワークへの依存を軽減することで、ToHO は既存の制限を克服し、無線システムの全体的な効率と信頼性を高めることができると期待している。

3. 研究の方法

MT 起動時や HO 失敗時には、地上網主導で行える対策は通常はなく、現状では MT が最寄りの BS に RAP (Random Access Procedure; 同期手順) で無線区間通信の復旧を行っている。HO 失敗の場合、MT の地理的局所性から直ちに別地域に移動したりすることはない。よって HO 失敗から回復するためには、MT 起動時と比べてある程度、手順の省略が容易であると考えられる。例えば SBS の周りのセルにおいて、事前に HO 失敗の MT と同期手順の準備を行っておけば、MT 起動時に比べてはるかに簡単な手順で MT と BS の同期ができるものと思われる。同期完了後、通常 HO 手順で行う SBS-TBS 間転送による下りデータの再送も可能となる。また BS の資源に余裕があれば事前に下りデータを同報し、TBS 判明時点で直ちに MT に同データを再送可能であろう [7]。このように HO 失敗後に MT が在圏しそうな BS において、HO の各手順を途中まで進めておけば、MT 側は手近の BS に同期手順を行うだけで HO 再開可能となる。本研究ではこのような HO 失敗回復の準備として、同期準備と下りデータ同報という二種類を地上網側で事前に行っておくことにより、ToHO の実現を行うことを考える。

(1) 同期準備

LTE あるいは 5G NR での制御面での BS アクセス手順は主に HO などに用いられる CFRA (Contention Free Random Access) と、初期アクセスや再同期などに用いられる CBRA (Contention Based Random Access) の二種類がある [2]。後者の CBRA では、4 ステップのメッセージ通信で実行される。

MT は共有サブフレームからランダムに選択した RAP (Random Access Preamble; ランダムアクセスプリアンブル) を RACH (Random Access Channel) で TBS に送信する。

RAP に衝突がなければ当該 TBS は TC-RNTI (Temporary Cell Radio Network Temporary Identifier) と上下チャネル資源を割り当てて DL-SCH (Downlink Shared Channel) で RAR (Random Access Response; ランダムアクセスレスポンス) を MT に返信する。RAR には RAP の識別子と UL Grant (Uplink Grant; 上り資源割り当て)、TA (Timing Advance) が含まれる。

MT は UL-SCH (Uplink Shared Channel) で MT の ID や接続要求、RAP 識別子など、もしすでに C-RNTI (Cell Radio Network Temporary Identifier) の割り当てがあればこれを含む MSG3 (Message 3) を TBS に送信する。

TBS は DL-SCH で TA (Timing Advance; タイミング調整) や SRB (Signaling Radio Bearer; シグナリング用無線ベアラ)、MAC メインコンフィギュレーションの設定を含む MSG4 (Message 4) を送信して、接続確立を MT に通知する。

C-RNTI を持たない複数の MT が同じ RAP を選ぶと衝突となって、MT は CCCH SDU (Common Control Channel Service Data Unit) を受け取って、競合解消を PDCCH (Physical Downlink Control Channel; 物理ダウンリンク制御チャネル) で BS から伝達されるのを待つ。PDCCH が受信できないか、タイムアウトが発生すると CBRA 手順をやり直す必要がある。

前者の CFRA では CBRA とは異なり、BS が事前に専用の RAP を割り当てることで、異なる MT が異なるプリアンブルを使用することを保証している。通常の HO では、MT は HO 区間で TBS が割り当てた RAP を受け取って CFRA を実行して TBS と同期をとっている。

本研究のアイデアを LTE あるいは 5G NR での制御面に適用するならば、次に TBS となりうる SBS の近接セルにおいて、CBRA のステップ RAR 返信に必要な資源の確保を行った上で、RAP を MT に事前に送信しておけばよい。これをここでは、制御面での同期準備と呼ぶ。これにより、MT は任意のタイミングで TBS となる SBS の近接セルに接続して HO を要求することができる。地上網 SW は MT からの HO 要求に対して、HO の残り手順を実行すればよい。余剰に準備した周辺セルの資源のいくつかは、ToHO の成功で必要がなくなり、解放しなければならない。これについて後述する仮想モザイク大セル節で議論する。

(2) 下りデータ同報

HO 手順において MT が TBS と同期した後に必要な重要作業は、それまでに SBS に滞留しているダウンリンクデータの、TBS を通じた MT への転送である。5G NR では、SBS と TBS が Xn インタフェースで直接接続されている場合は SBS が TBS にそのインタフェースでデータを転送し、そうでなければ SBS がコアネットワークの UPF (User Plane Function) にデータを転送し、UPF が TBS にデータを転送する。

PON の特徴は、上流機器である OLT (Optical Line Terminal) からのレーザ光を受動素子であるプリズム分割し、下流機器である ONU (Optical Network Unit) 全部に届ける下り通信放送型ネットワークであることである。BS からの電波がセル内のすべての MT に届くのと同様に、PON を地上網の構成に用いれば、UPF からの下り通信を配下の BS に同報することが可能である。すなわち複数の小セル群を連携させて、あたかも大セルであるかのように下り通信を同報して

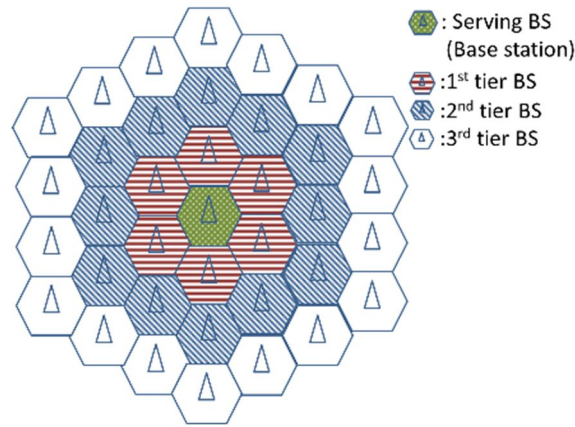


図 1: 3 層 BS の地理的配置の例

Fig. 1: The example of geographical arrangement of

おけば、ToHO において MT が TBS と同期した後に、直ちに TBS から下り通信を転送することが可能となる。ここではこの手法を、ユーザデータ面(U-plane)での下りデータ同報と呼ぶことにする。隣接セルが SBS となっている場合には、在圏 MT 以外の下り通信を常にバッファに蓄積しておく必要がある。バッファの消去のためには、MT から SBS に PUCCH (Physical Uplink Control Channel; 物理アップリンク制御チャネル)を通じて送られる ARQ (Automatic Repeat-Request; 自動再送要求)の ACK (Acknowledge; 送達確認)を SBS から同一 PON 内の他の BS に放送すればよい。

なお HO 中の滞留データのうち、上りデータは MT に格納されているため原理上特別対応は不要である。無線区間通信回復後に MT は直ちに上りデータを送信することが可能である。

(3) 仮想モザイク大セル

本研究ではこのように TBS となりうる隣接セルで予め二種類の同期準備を行うことにより、MT から TBS に向けて HO 要求を行うことが可能となる。制御面における同期準備の実現は、単に数字である RAP を MT に割り当てればよいというのではなく、その RAP が実際に使用可能なようにスケジューリングを行い、無線区間通信の予約を行う必要がある。一方、PON の特徴である放送を用いれば、各 BS にバッファを設けるだけで下りデータ同報が行えるため、Xn インタフェースや UPF による SBS から TBS の滞留データの転送も行う必要がない。この実現には、BS が受信した下りデータのバッファへの転送と管理、バッファを構成するための半導体メモリが必要となる。後者にはない電波という有限の資源を前者が ToHO のために余分に準備するという状況を考えると、どちらかというところ前者の準備はできるだけ狭い範囲で行い、後者はバッファ容量やバッファ管理という計算資源の許す限り広い範囲で実施可能と考えられる。

そうすると、本研究で提案する ToHO のための地上網の二つの支援手法は、以下の三種の組み合わせモデルが合理的であると思われる。

- ・ 第一層 BS (1st tier BS): SBS の近隣 BS。CFRA 用 RAP の MT への送付、下りデータ保持。
- ・ 第二層 BS (2nd tier BS): 第一層 BS の近隣 BS: RAP なしで、下りデータ保持。
- ・ 第三層 BS (3rd tier BS): 第二層 BS の近隣 BS: RAP、下りデータともになし、ただし HO 失敗 MT の捕捉は準備。

SBS を中心とした一般的な三層 BS 群の地理的セル配置例を図 1 に示す。SBS を中心に、SBS の隣接セルの BS が第一層 BS、第一層 BS に隣接しているセルの BS が第二層 BS、第二層 BS に隣接しているセルの BS が第三層 BS となっている。これは小セルを結合して、あたかも小セルの何倍もの面積をもつ仮想的な大セルを構成したかのように働くと予想される。各セルは異なる電波チャネルを用いていて、その ToHO への準備状況も異なるため、本研究ではこのような三層 BS 群の地理的セル配置を仮想モザイク大セルと呼ぶ。

第一層 BS では同期準備がなされて、かつ下りデータ同報もなされているため、MT は事前に受け取った RAP で TBS に直ちに通信可能で、これで TBS に在圏している間に HO 手順が終了すれば HO 成功である。

すなわち、これらの手法による ToHO によって、以下のような利点が予想される。

- ・ SBS と TBS のセルはオーバーラップする必要はなく、HO 区間は TBS 全体となりうる。これにより、小セルだけからなる大容量のセル方式無線システムでの高速 HO が容易となる。

第二層 BS は隣接する第一層 BS に MT 主導の HO 要求がなされて TBS になった場合、次に第一層 BS となるべき BS である。よって、RAP を準備して TBS を通じて MT に送信する必要がある。何らかの問題で一時的に HO 完了が遅れ、残留下りデータの送信が TBS 在圏内で完了しなかった場合に、次の ToHO で元の第二層 BS が TBS になっても残留下りデータを保持しており、SBS から残留下りデータを転送されなくても MT に向けて直ちに残留下りデータの送信ができる。これが第二層 BS を準備する利点である。これをまとめると以下のように表現できる。

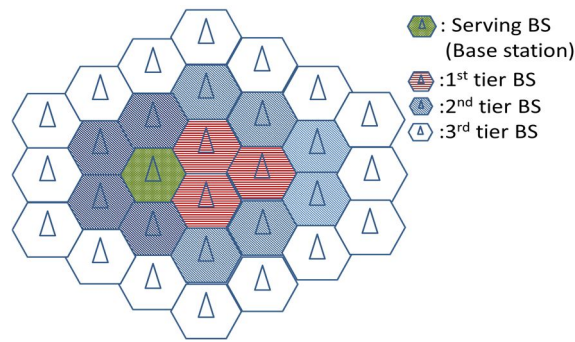


図2: 端末右方向高速移動時の3層BSの地理的配置の例

Fig. 2: The example of geographic placement of 3

・HO 区間となる TBS では第二層 BS が第一層 BS となる準備ができれば電波区間の通信を維持することが可能である。残留下りデータは MT が元の第二層 BS まで高速移動している間に転送が完了すれば十分である。

鉄道軌道や高速道路など、MT の移動先に偏りがある場合には、その移動可能性に合わせて仮想モザイク大セルを变形させることも考えられる。図2はMTが右向きに高速移動をしていると観測された場合に上下と左方向の第一層BSを省略し、右方向に第一層BSを追加したものである。

地上網側では、MT からの ARQ(自動再送要求)の Ack を同報セル群に伝えて資源を開放し、MT からの同期手順が成功した BS を SW で TBS とみなせば HO 完了である。

4. 研究成果

参考文献[1]は無線システムにおける基地局間 HO について、確率的ペトリネット (SPN) と連続時間マルコフ連鎖 (CTMC) を用いて数理モデルを構築した本研究の研究成果である。ns3 (network simulator three) のような離散事象ネットワークシミュレータ (DINS) で得られる模擬結果と異なり、数理モデルでは当該システムの各々の状態の恒常的存在確率を求めることによって、特定の模擬初期値や模擬シナリオに依存しない、より理論的に精密な解析が可能であると考えている。各基地局の移動端末収容状態は、離散分散システムとして SPN でモデル化することができるため、この SPN を全ブレース内のトークン数の組み合わせ状態として展開して各々の恒常的存在確率を求めることによって、例えばハンドオーバー先基地局の通信チャンネル不足など、特定の無線システム固有問題の発生確率を求めることができる。CTMC は特に各基地局への移動端末新規到着をモデル化するためのものである。

大セル・小セルの入り混じったヘテロジニアスなセル型無線ネットワークにおいて、トランザクション失敗率などのシステム性能とセル間ハンドオーバーとの関係を上述数理モデルで構築し、このモデルに適切なパラメタを設定して模擬を行うことにより、トランザクション失敗率に対してセル稼働率が敏感なこと、対してハンドオーバー用閾値が鈍感なことを明らかにした。また、この研究成果を査読付き国際会議にて発表し、関連研究分野研究者と議論した。

参考文献[2]は、端末主導のハンドオーバー支援手法の開発：移動端末が起動時に地上網と同期する必要がある手順を洗い出し、地上網で事前に同期準備することにより、端末主導のハンドオーバーを地上網で支援する新たな手法を提案したものである。この手法は、従来の地上網主導のハンドオーバー手順と異なり、周囲の基地局から CFRA (Contention Free Random Access) 同期に必要な資源を事前に要請し、その RAP (Random Access Preamble) 情報を予め移動端末に蓄積することで、移動端末が移動元基地局との通信が途絶えた状況でも端末主導でハンドオーバーを実現可能にした。

これらの成果は、無線システムにおける基地局間ハンドオーバーの問題に対する新しいアプローチの可能性を示し、無線通信網の新たな展開を期待させるものだと自負している。今後も、現行の LTE (Long Term Evolution), 5G などを対象とした研究を進め、作成モデルの正当性をさらに検証していく予定である。

参考文献

- [1] Zhiyi Zhu, Toshikazu Nishimura, Eiji Takimoto, and Junjun Zheng, Performance Evaluation of Heterogeneous Cellular Networks Using Stochastic Petri Nets, Proc. of International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) 2021, pp. 1-6, doi: 10.23919/SoftCOM52868. 2021.
- [2] 西村俊和, 無線システムの端末主導型ハンドオーバー: 周辺セルでの多層回復手法, 信学技報, vol. 123, no. 398, IN2023-99, pp. 201-206, 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 西村 俊和	4. 巻 vol. 123, no. 398,
2. 論文標題 無線システムの端末主導型ハンドオーバ：周辺セルでの多層回復手法	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 信学技報 IN2023-99	6. 最初と最後の頁 201-206
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/SoftCOM52868.2021.9559100	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhiyi Zhu, Toshikazu Nishimura, Eiji Takimoto, and Junjun Zheng	4. 巻 -
2. 論文標題 Performance Evaluation of Heterogeneous Cellular Networks Using Stochastic Petri Nets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) 2021	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/SoftCOM52868.2021.9559100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 西村 俊和	
2. 発表標題 無線システムの端末主導型ハンドオーバ：周辺セルでの多層回復手法	
3. 学会等名 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会	
4. 発表年 2024年	

1. 発表者名 西村 俊和	
2. 発表標題 小セル無線システムにおける端末主導ハンドオーバー	
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会, B-5-15	
4. 発表年 2023年	

1. 発表者名 Zhiyi Zhu, Toshikazu Nishimura, Eiji Takimoto, and Junjun Zheng
2. 発表標題 Performance Evaluation of Heterogeneous Cellular Networks Using Stochastic Petri Nets
3. 学会等名 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関