

ストリーミング品質制御も考慮した確率幾何学的手法によるハンドオーバー制御手法の提案

研究代表者 宮 田 純 子 東京科学大学 工学院 准教授

1 はじめに

近年、スマートシティ構想における移動端末へのリアルタイムな情報伝達や、5G/Beyond 5G 異種高密度ネットワークにおける高品質な動画ストリーミングの需要が急速に高まっている。しかし、これら高密度ネットワーク環境下では頻繁なハンドオーバー(HO)が発生し、シグナリングオーバーヘッドの増大や通信品質(QoS)の劣化、ひいてはストリーミングのバッファ枯渇を招くという重大な課題がある。本研究調査では、ネットワークの規模増大に対しても高い応用性を持つ確率幾何学的手法に着目し、セル滞在時間および現実的な基地局配置モデルを考慮した新たなハンドオーバー制御手法の確立、およびそれによるストリーミング通信などの品質向上への寄与を目的として取り組んだ。

2 研究背景と目的

最新のモバイル市場予測 [1]によれば、世界のモバイルサブスクリプション数は引き続き堅調な増加傾向にあり、5G ネットワークの浸透に伴って高データレート通信環境の整備が加速している。それに伴い、超高速・大容量通信のさらなる高度化や、次世代の Beyond 5G および第6世代移動通信システム (6G) への展開に対する期待が高まっている。これまで第5世代移動通信システム (5G) は、数 Gbps のデータレート、信頼性のある低遅延接続、ネットワーク容量の増加を実現し、機械や物体、デバイスをいつでもどこでも仮想的に接続する基盤として設計されてきた [2]。しかし、5G の普及に続く次世代の超高密度・異種ネットワーク環境においては、頻繁なハンドオーバーによる通信品質 (QoS) の劣化をいかに抑制するかが、リアルタイムな情報伝達や高品質なストリーミング通信を実現するための重要な課題となっている。

また、モノのインターネット (IoT) やスマートシティ、災害監視や交通システムのスマートシティアプリケーションの関心は年々高まっている [3]。これらの要求に対応するアプローチ方法に異種高密度ネットワーク化がある [4]。異種高密度ネットワークとは、従来 から 4G ネットワークとして使用しているカバー範囲の広いマクロセル(以下、M セル) 上に、5G 基地局のようなカバー範囲の狭い、高速通信可能なスモールセル(以下、S セル) を高密度に配置したネットワーク環境である [5]。ここでセルとは、基地局が電波を発信と受信、カバーできるエリアのことを指す。異種高密度ネットワークでは、モバイルデバイス上で実行されているすべてのアプリケーションの接続性を維持し、基地局切り 替え中も同じセッション内で継続的にエンドツーエンドのデータサービスを提供し、低遅延と最小限のパケットロス の両方を提供するために2種類のハンドオーバー(以下、HO) が存在する [6]。1つ目が、垂直 HO と呼ばれる 4G から 5G のような異なるレイヤーのセル間で起こる HO である。2つ目が、水平 HO と呼ばれる 5G から 5G のような同じレイヤーのセル間で起こる HO である。異種高密度ネットワークでは、異種類の基地局が 高密度に混在するために、異なるネットワーク間の接続の切り替えを行う垂直 HO 回数が増加する。この問題はシグナリングのオーバーヘッドや運用コストの増加、通信を行うためのリソース不足を招く。また、トラヒックの余計な待ち時間の増加に繋がる [7]。これらの問題を解決するために、垂直 HO について様々な研究が行われているが、異種高密度ネットワークのトポロジーの多様性により非常に複雑なモデリングになる。そのため、分析の際に多くの困難が生じる。

既存手法 [8] では、確率幾何学的手法を用いることで比較的単純なモデリングを可能とし、垂直 HO 回数の解析を行っている。しかし、S セルの滞在時間を考慮していないために、短い 滞在時間のための HO が発生する。これでは、HO の連続による接続の中断や、システム側のコスト増加につながる。既存研究 [9] では、S セル滞在時間分布に指数分布を仮定した解析を行い、垂直 HO 回数を削減した。また、ユーザ移動速度によって変化する、S セル滞在時間に応じた滞在時間閾値を設けたときの垂直 HO 回数の特性解析を行っている [10]。しかし、S セル滞在時間分布を指数分布に仮定していることに理論的な正当性は無い。

本研究では、既存手法 [9], [10] とは異なる、確率幾何学的手法によるセル滞在時間分布に基づく垂直 HO

解析を行う。また、ベルトランのパラドックスの問題を踏まえた3つのシナリオにおけるセル滞在時間分布の導出も行い、通信品質に関する議論も行う。

2 関連研究

これまで、垂直H0回数を減らすことを目的としていくつかの研究がなされている[11], [12]。岸田らは、ユーザの速度ごとに優先するセルの角度を変動させ、またその角度外に存在かつ接続中のセルでない受信信号対干渉雑音比 SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) にマイナス補正を加えて、そのセルを選択されにくくする制御法を提案している[11]。しかし、この手法では、補正値を加えただけであり、完全に不必要なセル選択を減らせるわけではない。また、異種高密度ネットワークの場合では、頻繁なH0の発生につながる可能性がある。一方で、Alablaniらは、異種高密度ネットワークにおける重要なセル選択要因である受信信号強度RSSI (Received-Signal-Strength-Indicator)、ユーザの速度、ユーザと基地局の角度・負荷に閾値を設け、基地局との接続をできるだけ長く維持するためのセル選択を提案している[12]。しかし、角度をセル選択要因に設けているために、滞在時間の短いセルが選択される可能性があり、垂直H0回数削減のための最適なセル選択法とはいえない。これらの研究は、理論解析がなされておらず、特定の状況にしか対応しないシミュレーション解析である。

これに対し、異種高密度ネットワークを確率幾何学的手法を用いて解析する研究があり、モデリングによる性能傾向や理解するためのアプローチとして、いくつかの研究がある[2], [8]~[10], [13], [14]。Zhangらは、マルチコネクティビティ(MC)の複雑なH0発生パターンを確率幾何学的手法を活用したアンカーベースのマルチコネクティビティアーキテクチャを提案し、H0発生確率を導出した[2]。Xuらは、高密度のヘテロジニアスネットワーク(HetNet)は頻繁なH0につながるとし、確率幾何学を用いて垂直H0プロセスの解析モデルを提案し解析している[13]。Baoらは、異種ネットワークにおけるH0を、ポアソン点過程とポアソンクラスタ過程の組み合わせを用いた基地局配置のモデル化を行い、確率幾何学的手法で解析している[14]。Duongらは、異種ネットワークによる異なるトポロジーの影響を捉えるために、ユーザモビリティとSセルネットワークに関する確率幾何学的解析方式を提案し、発生する垂直H0回数の期待値の理論式とそれに対応する近似値を導出している[8]。しかし、既存研究[2], [8], [13], [14]の共通の問題として、Sセルの滞在時間を考慮していないために、短い滞在時間のための垂直H0が発生する。

この問題に対して申請者はこれまでに、異種高密度ネットワークの問題である垂直H0回数の増加を抑えるために、セル滞在時間に基づく確率幾何学的手法を用いて垂直H0回数を削減した[9]。また、ユーザ移動速度によって変化するSセル滞在時間に、移動速度に応じた滞在時間閾値を設けたときの垂直H0回数の特性解析も行っている[10]。しかし、既存研究[9], [10]では、Sセル滞在時間分布に理論的な正当性の無い指数分布を仮定しているため、現実の問題とは整合しない。本研究では、セル滞在時間および現実的な基地局配置モデルを考慮した解析を行い、評価を行った。

3 提案手法

3-1 システムモデル

図1は、本研究が想定するシステムモデルを示したものである。電波受信のカバー範囲(半径 R の円状)が広いMセルの中に、カバー範囲(半径 r の円状)が比較的小さなSセルを多数(N_s 個)配置した構成となっている。ここでSセルは、Sセルの中心が密度 λ の均質なポアソン過程に従ってランダムに分布していて N_s は確率変数であり、ユーザはMセルを一定の移動速度で直線的に横切るものとする。

3-2 提案アルゴリズム

既存研究では、スモールセルへの垂直ハンドオーバーの判断基準として、速度や電波受信強度、負荷状態、滞在時間といった複数の閾値を組み合わせた複雑な制御アルゴリズムが用いられていた。しかし、これらは

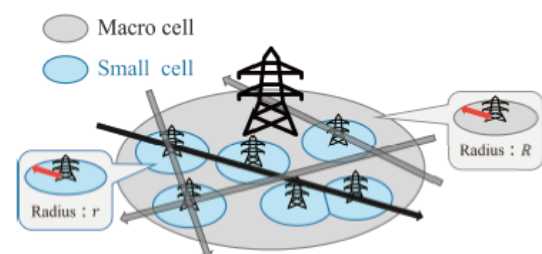


図 1. システムモデル

実際の環境において処理コストが大きく、性能評価も難しいという課題を抱えている．そこで本研究では、制御の簡素化を図るため、滞在時間のみに基づいたセル選択手法を提案する．

提案アルゴリズムでは、端末が新たなスモールセルへと入射するタイミングでハンドオーバーの可否を判定する．まず、端末がすでに別のスモールセルに接続している状況で新たなスモールセルへ進入した場合、新セルの滞在予定時間が現セルの残り滞在時間よりも長ければスモールセル間の切り替え(水平ハンドオーバー)を行い、そうでなければ現セルに留まる．一方、端末がマクロセルに接続している状況で新たなスモールセルを検知した場合は、そのセルでの滞在予定時間が事前に定めた滞在時間閾値を超える場合のみ垂直ハンドオーバーを実行し、一時的な通過に過ぎない場合はマクロセル接続を維持して無駄な切り替えを抑制する．また、接続中のスモールセルのカバーエリアから完全に離脱し、進行方向に接続可能なスモールセルが存在しない場合には、マクロセルへの垂直ハンドオーバーを実施する．

4 確率幾何学に基づく垂直ハンドオーバー数の理論解析

4-1 スモールセル滞在距離分布の導出

移動端末(ユーザ)がマクロセル内をランダムに移動する際の経路を考える．このとき、スモールセルを通過する線分の長さ(滞在距離 L)の分布を評価するにあたり、ランダム性の与え方によって確率測度が異なるというベルトランのパラドックスの問題が生じる．本研究では、以下の3つの異なるアプローチ(シナリオ)でランダム性を定義し、滞在距離が一定の長さ l 以下となる確率を導出した．

(1) シナリオ A (円の中心と弦の距離が一樣に分布)

移動経路に垂直なスモールセルの半径上で、経路の交点の位置が一樣に分布すると仮定するスタイルである．スモールセルの半径を r としたとき、確率式は次式で与えられる．

$$Pr[L \leq l] = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{l}{2r}\right)^2}$$

(2) シナリオ B (円と弦の交わる角度が一樣に分布)

端末の移動経路とスモールセル境界の接線とがなす角度が、可能な範囲で一樣に分布すると仮定するシナリオである．確率式は次式で与えられる．

$$Pr[L \leq l] = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{l}{2r} \right)$$

(3) シナリオ C (弦の midpoint が円内で一樣に分布)

スモールセル内からランダムに選ばれた点が、通過する経路の midpoint になると仮定するシナリオである．確率式は次式で与えられる．

$$Pr[L \leq l] = \frac{l^2}{(2r)^2}$$

以上の議論で得られたシナリオ A, シナリオ B, シナリオ C に基づく滞在距離の期待値とシミュレーショ

ンで得られた滞在距離データを次節にて比較する。この結果を踏まえて、本研究に適切なシナリオを選択し、滞在時間を考慮した垂直 H0 回数の期待値の式の導出を行う。

4-2 滞在時間分布に基づく接続 S セル選択

端末の移動速度が一定であることから、滞在時間の閾値 t_{th} は、滞在距離の閾値として置き換えることができる。これに基づき、スモールセルでの滞在時間が閾値を超える（＝ハンドオーバーの対象となる）確率は、各シナリオの累積分布関数の余事象として求まる。

従来の滞在時間を考慮しないスモールセル接続数の期待値を $E[N]$ とすると、滞在時間閾値を満たすスモールセル接続数の期待値 $E[N_{th}]$ は、次式のように表される。

$$E[N_{th}] = E[N] \times Pr[T > t_{th}]$$

4-2 滞在時間分布に基づく接続 S セル選択

上記で得られた $E[N_{th}]$ をもとに、従来の確率幾何学的なハンドオーバー解析モデルを拡張する。スモールセルへの滞在時間を考慮した選択制御を行った場合の、マクロセルとスモールセル間で発生する垂直ハンドオーバー回数の期待値 $E[H_{th}]$ は、次式で定義される。ここで $E[P]$ は、マクロセル内におけるユーザの軌跡の長さの期待値を表す。

$$E[H_{th}] = 2E[N_{th}] \left(1 - \frac{\pi}{2E[P]} r \right)^{E[N_{th}]-1}$$

5 現実的な移動シナリオへの拡張

5-1 セル配置の偏りとフォン・ミーゼス分布

第4章で導出した幾何学的な垂直ハンドオーバー回数の解析モデルは、スモールセル（Sセル）がマクロセル内に完全に均一かつランダム（均質なポアソン点過程）に展開されているという理想的な環境を前提としていた。しかし、実際の都市環境やネットワーク運用環境を考慮すると、基地局の配置は完全な一様ランダムではなく、主要な道路網、繁華街、駅周辺、あるいは特定のインフラ・目的地に向けて、ある程度高密度に密集する特定の設置エリアやセル配置の地理的な偏り（集中度）を持つことが一般的である。このように、空間的なセル配置に偏りが存在する場合、端末がセルに突入する際の入射角や、セル内を通過する滞在距離の確率分布は、前章で示した単純な一様分布のモデル（ベルトランのパラドックスにおける基本シナリオ）から大きく変化することが予想される。

したがって、確率幾何学アプローチによる解析モデルをより実用かつ現実的な環境へと適合させるためには、セル配置の集中度の強弱を柔軟に表現できる数理モデルを組み込む必要がある。そこで本章では、方向データ解析だけでなく空間的な偏りの表現においても応用されるフォン・ミーゼス分布（von Mises distribution）をシステムモデルに導入する。これにより、スモールセル基地局が特定の中心線やエリア周辺にどれだけ集中して配置されやすいかというセル配置の集中度を数理的に表現し、この地理的な集中度がスモールセル滞在距離分布、および最終的な垂直ハンドオーバー回数に与える影響を理論的に解明することが可能となる。

5-2 フォン・ミーゼス分布を用いたシステムモデル

フォン・ミーゼス分布は、円周上における正規分布に相当する連続確率分布であるが、本拡張モデルでは、マクロセル内を直線移動するユーザの軌跡に対して、スモールセル基地局の配置エリアがどれだけ中心に密集しているかを表す空間分布モデルとして定義する。この配置モデルにおいて、スモールセルの境界を通過する際の幾何学的配置を評価するため、確率変数の変換処理を行う。マクロセル内を横断する移動軌跡（弦）から、各スモールセルの中心までの最短距離（垂直距離）を y と定義すると、セル配置の密

集中度（偏りの強さ）を表すパラメータを用いて、移動経路から距離の位置にスモールセルが配置される確率密度関数は、次式で与えられる。

$$p(y) = \frac{1}{2rI_0(\kappa)} e^{\kappa \cos(\pi y/r)}.$$

ここで、 r はスモールセルの半径であり、 I_0 は 0 次の第 1 種変形ベッセル関数である。集中度パラメータがゼロのときは完全な一様ランダム配置（従来のポアソン点過程）となり、値が大きくなるほど、スモールセル基地局がユーザの移動経路の周辺（主要道路や動線に沿ったエリアなど）に極めて強く集中して配置されている状態を表現できる。

5-3 滞在距離分布の幾何学的導出と定式化

前述の確率密度関数に基づき、端末がスモールセルを通過する際の滞在距離（線分の長さ）を導出する。スモールセルの中心から移動経路（端末の直線軌跡）までの垂直距離が y であるとき、幾何学的な関係性（三平方の定理）から、スモールセル滞在距離が導出される。この幾何学的関係式と、5.2 節で定義した基地局配置の確率密度関数を組み合わせることで、地理的な集中・密集特性を持つエリアをユーザが通過する際のスモールセル滞在距離の期待値 $E[L]$ は、以下の積分形式によって、定式化される。

$$E[L] = \int_{-r}^r 2\sqrt{r^2 - y^2} p(y) dy.$$

この数理モデルは、基地局配置の集中度（偏り）の強さが、ユーザの移動経路に対してスモールセルをかすめて通る（垂直距離 y が大きい）確率と、セルの中央を深く横切る（垂直距離 y がゼロに近い）確率のバランスをどのように変化させるかを定量的に示している。集中度が大きくなるほど（特定の主要道路や中心エリア周辺に基地局が密集するほど）、ユーザの移動動線と重なるセルの位置関係が統計的に制限されるため、滞在距離のばらつき（分散）や期待値の挙動に強い影響を与えることが判明した。

5-4 拡張モデルにおける垂直ハンドオーバー回数への影響

導出したフォン・ミーゼス分布に基づく滞在距離の特性式を用いることで、第 4 章と同様のプロセスを経て、滞在時間閾値を満たすスモールセル接続数の期待値、および最終的な垂直ハンドオーバー回数の期待値を評価することが可能となる。

理論解析の結果、基地局配置の集中度（偏り）が強くなるほど、一様ランダム配置を仮定していた従来モデルに比べて、特定の条件下における垂直ハンドオーバー回数の削減効率が大きく変動することが明らかになった。これは、スモールセル基地局が特定のエリアや幹線道路沿いに集中して配置されている空間特性をあらかじめ考慮し、その配置の偏りに応じて滞在時間閾値を動的に設計（最適化）することで、一様なランダム配置を想定していたときよりも、さらに無駄な垂直ハンドオーバーを効率的に排除できる可能性を示唆している。次章の数値解析において、この配置の集中度の強さがハンドオーバー削減効果に与える具体的な数値影響をシミュレーションによって検証する。

6 数値実験

本数値解析における数値パラメータ設定は表 1 の通りである。

表 1 Numerical analysis parameters

Parameter	Value
Number of macro cells	1
Number of small cells	[100-1000]
Radius of coverage of M cells R	1000 m
Radius of coverage of S cells r	40 m
Distribution of small cells	Poisson Point Process
User speed v	[30-90] km/h
Number of users	1

6-1 滞在時間分布に基づく接続 S セル選択

ある円を通過する際の滞在時間分布を 4. 1 節において 3 つ のシナリオごとに導出を行った。そこで、本研究の背景である ユーザが M セルをランダムに横断した際の S セルの滞在距離 分布は 3 つのシナリオのうち、どのシナリオが適切であるかを シミュレーションで確認する。Mセル内にポアソン点過程に従って S セルを 600 個配置された環境を想定する。この環境を ユーザがランダムに移動した際の S セル滞在距離の統計データ と 4. 1 節で得られた滞在距離分布を比較したのが図 2 である。

図 2 より、本研究における S セル滞在距離分布は 4. 1 節 で導出されたシナリオ A の滞在距離分布が適切であることがわかる。

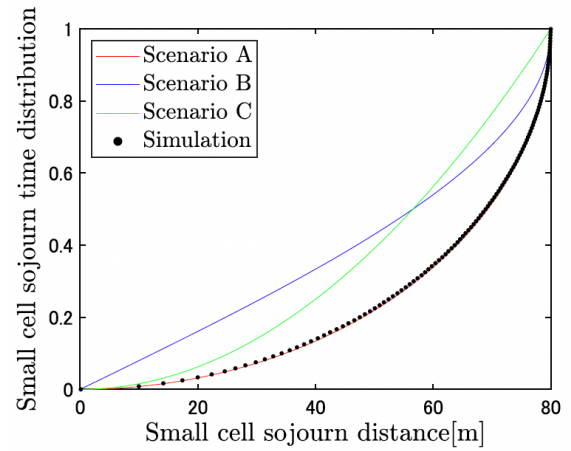


図 2. S セル滞在距離分布

6-2 スモールセル数ごとの垂直 HO 回数

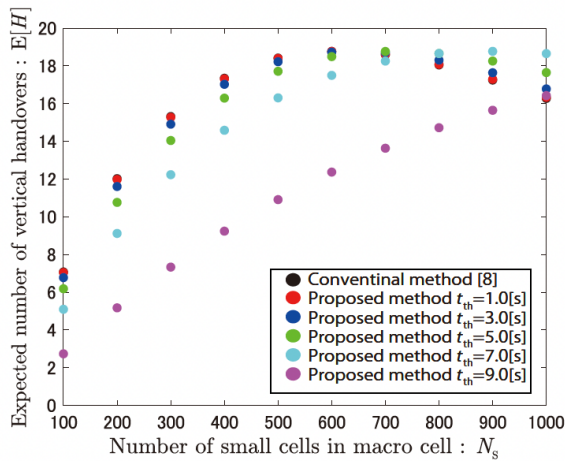


図 3. 垂直 HO 数の期待値
(移動速度が 30 km/h のとき)

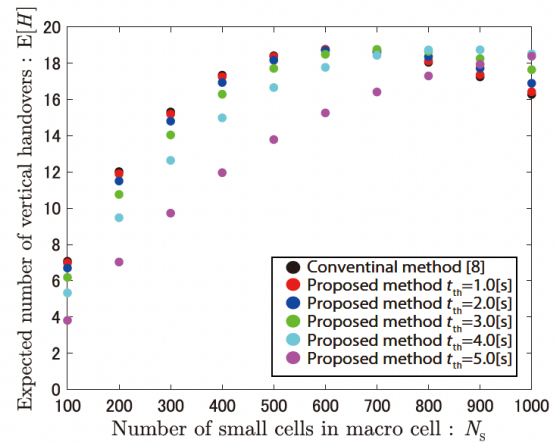


図 4. 垂直 HO 数の期待値
(移動速度が 50 km/h のとき)

次に、様々なユーザ移動速度における N_s を、100 から 1000 まで 100 ずつ変化させたときの、垂直 HO 回数の期待値を解析する。ここで、シナリオ A の滞在時間分布を用いた垂直 HO 回数と既存手法[8] と垂直 HO 回数の期待値の比較を行う。図 3 にユーザ移動速度 v が 30 km/h における垂直 HO 回数の 期待値の比較を

示す。 $v = 30$ km/h における S セルの最大滞在時間は 9.6 s であることから、 t_{th} の範囲を 1.0 ~ 9.0 s とした。

図 4 に、ユーザ移動速度 v が 50 km/h における垂直 H0 回数の期待値の比較を示す。 $v = 50$ km/h における S セルの最大滞在時間は 5.7 s であることから、 t_{th} の範囲を 1.0 ~ 5.0 s とした。 また、図 5 に、ユーザ移動速度 v が 70 km/h における垂直 H0 回数の期待値の比較を示す。 $v = 70$ km/h における S セルの最大滞在時間は 4.11 s であることから、 t_{th} の範囲を 1.00 ~ 4.00 s とした。 図 3, 4, 5 より、提案手法は既存研究[8] より垂直 H0 回数を減少させることが出来ている。

既存研究[8]では、ユーザ移動速度 v ごとによって変わるセル滞在時間を考慮していないため、通過する S セルすべてに接続している。したがって移動速度を変えても垂直 H0 回数は変化しない。提案手法では、S セル滞在時間を考慮した滞在時間閾値 t_{th} を設定したことで滞在時間が短い S セルに接続するような無駄な H0 を無くしたため、垂直 H0 回数を減らすことが出来たといえる。またユーザ移動速度が速くなるほど、 t_{th} を大きく設けられない。これは速い v のユーザほど S セル滞在時間が短いため、滞在時間閾値による S セル選択が大きく影響を受けない。一方、 v が遅いユーザは、比較的幅のある滞在時間閾値を設定できることがわかる。よって、ストリーミングなどの動画配信を考慮した比較的高いデータレートが必要な通信において、垂直 H0 実行にかかる処理時間が及ばず接続の中断、遅延を考慮した移動速度に応じた最適滞在時間閾値を探索することが今後必要であることが明らかとなった。

図 3, 4, 5 より、滞在時間閾値を長くするほど、既存手法[8] と比べ垂直 H0 回数を削減することができる。既存研究[8]では、 $N_s = 600$ あたりで $E[H]$ が最大値を持つ。この理由は、 N_s が増加すると S セル同士の重りが多くなり水平 H0 を増加させるため、 $E[H]$ は N_s に対して凹関数となり最大値を持つ。しかし、提案手法である S セル滞在時間分布に基づく滞在時間閾値を設けることで、接続時間が短い水平 H0 は起こらない。一方、密度に比例した垂直 H0 回数が増加してしまうため、グラフは最大値を持たず、線形に近くなる。

6-3 フォン・ミーゼス分布に基づく指向性移動環境への拡張

これまでの評価は、スモールセルの配置が空間的に完全に一様（ランダム配置）であることを前提としていたが、実際の都市環境における主要道路網や特定のインフラ周辺を模した基地局配置の偏り（集中度）がハンドオーバー特性に与える影響を評価するため、第 5 章で定式化したフォン・ミーゼス分布モデルに基づく数値解析を実施した。

本評価では、配置の偏り（集中度）を表すパラメータ κ を変化させ、従来の一様ランダム配置モデルとの比較を行った。図 6 に、特定の環境において空間的な集中度を段階的に変化した際の、S セル滞在距離の累積確率分布（Small cell sojourn distance distribution）の推移を示す。評価の結果、フォン・ミーゼス分布を導入してセル配置の密集性を考慮したモデルにおいては、完全な一様分布を仮定していた従来の提案手

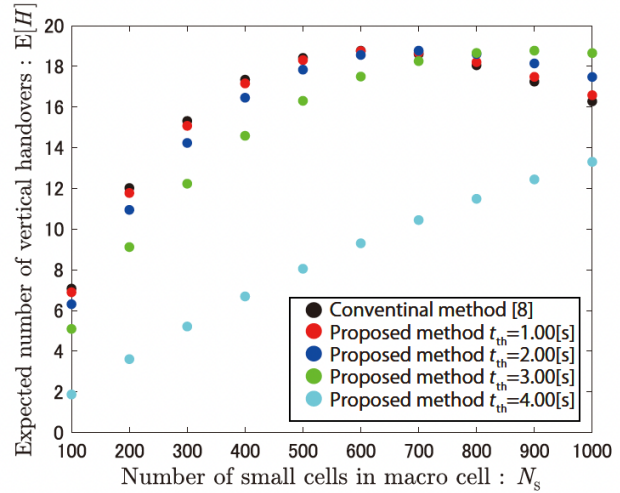


図 5. 垂直 H0 数の期待値
(移動速度が 50 km/h のとき)

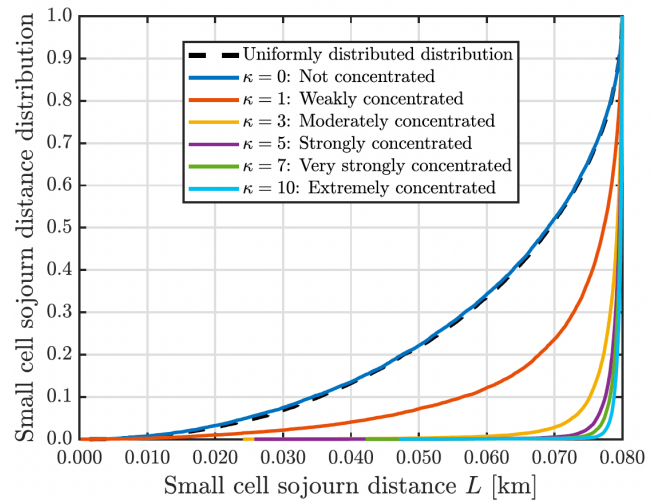


図 6. 集中度を変化させた場合の垂直 H0 回数

法（シナリオ A）よりも、滞在距離が全体的に長く引き伸ばされる特性が顕著に現れ、無駄なハンドオーバーをより低く抑制できることがわかる。

この挙動の理由は、幾何学的な通過特性の変化から説明できる。基地局の配置に特定の集中度（偏り）が存在する（主要な幹線道路沿いや中心街にセルが密集している）環境下では、ユーザの移動動線に対してスモールセルをかすめて通過する確率が統計的に減少し、セルの中心付近を深く直線的に横断する確率が高くなる。その結果、セル進入時における平均滞在距離および滞在時間が全体的に引き伸ばされるため、事前に設定した滞在時間閾値をクリアして有効な通信を提供できる優良な S セルへの接続比率が相対的に向上する。さらに、空間的なセル配置の集中度が高くなるほど（密集性が強まるほど）、このハンドオーバー回数の削減効果は顕著に現れることが確認された。

これは、従来の完全な一様ランダム配置だけを想定したネットワーク設計に対し、基地局配置の集中特性や都市のインフラ密集度をあらかじめ把握・考慮して滞在時間閾値を動的に制御することで、ハンドオーバー時のシグナリング負荷をさらに最適化できる可能性を示している。

これまでの議論より、エリアの重複が激しい現実の都市型異種高密度ネットワーク環境において、本研究で提案した現実 に即したフォン・ミーゼス分布に基づくセル配置の集中度を考慮した滞在時間閾値制御が、無駄な通信中断やパケットロスを抑制し、アプリケーション層における動画ストリーミング等の通信品質を高度に維持するための極めて有効なアプローチであることが示された。

7 おわりに

本研究では、Beyond 5G やスマートシティ構想において不可欠となる異種高密度ネットワーク環境を対象とし、高品質な動画ストリーミング通信における通信品質（QoS/QoE）の確保大目的とした、新たな垂直ハンドオーバー（垂直 H0）回数の削減・制御解析手法を提案し、その特性を理論解析と数値実験の両面から厳密に評価した。

従来の垂直 H0 解析においては、移動端末（ユーザ）の移動速度やそれに応じて動的に変動するセル滞在時間が十分に考慮されておらず、結果として過剰かつ無駄な H0 シグナリング負荷が発生し、ストリーミング品質を著しく劣化させるという重大な課題があった。これに対し本研究では、確率幾何学的手法を導入することでスモールセル（S セル）の滞在時間・距離分布を厳密に定式化し、滞在時間が極めて短い不安定なセルへの接続を排除する滞在時間閾値に基づくセル選択アルゴリズムを確立した。

定式化に際しては、幾何学におけるベルトランのパラドックスの問題を踏まえ、ランダム性の与え方が異なる 3 つのシナリオ（シナリオ A, B, C）を定義し、シミュレーション値との詳細な比較検証を行った。その結果、円の中心と弦との距離が一樣に分布すると仮定した「シナリオ A」の幾何学モデルが、実際の高密度環境下におけるユーザのランダムな移動経路特性と極めて高い精度で一致することを示し、一樣直線移動モデルにおける理論解析の妥当性を担保した。

さらに、本研究の成果をより現実的な運用の場へと適応させるため、方向性統計の概念であるフォン・ミーゼス分布をシステムモデルへと組み込み、セル配置に偏りが存在する（特定の主要エリアや道路網沿いに基地局が密集している）現実的な都市型シナリオへと理論を大きく拡張した。数値実験の結果、特定の主要道路網などに沿ってセル配置の集中度が強くなる環境下では、ユーザがセルを深く直線的に横断する確率が統計的に向上するため、提案する閾値制御を用いることで、一様ランダム配置を想定していた従来の手法よりも、さらに効率的に垂直 H0 回数を削減できるという知見を得た。これにより、エリアの重複が激しい超高密度環境においても、無駄なネットワーク切り替えを抑え、高速・大容量な帯域をフルに活かして端末バッファヘデータを急速に蓄積できる優良なセルのみを的確に選別・維持できると考えられる。

本研究で得られたセル滞在時間制御は、通信レイヤにおけるシグナリングオーバーヘッドの大幅な削減をもたらすだけでなく、アプリケーションレイヤにおけるリアルタイム通信のフリーズを防止し、体感品質（QoE）を高度に維持するための堅牢な基盤技術となる。

今後の課題および展望としては、本研究で確立した幾何学的な滞在時間・距離特性の結論をベースとして、さらに物理層における電波干渉やリソース競合、ユーザのパケット滞留や割り当て限界を動的に評価・解決するため、待ち行列理論を融合させたシステムモデルへと拡張展開していく必要がある。高密度化に伴うセルの重複度が通信リソース（バッファやチャネル数）の割り当てに与える影響を定式化し、本研究の移動モ

デルと結合することで、実際の都市型異種高密度ネットワーク運用フェーズにおいて、よりよいストリーミング品質制御を達成するための、新たな滞在時間閾値設定法を探索していく所存である。

【参考文献】

- [1]. Ericsson, “Ericsson Mobility Report,” <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>, ref. Oct. 1, 2023.
- [2]. H. Zhang, W. Huang, and Y. Liu, “Handover probability analysis of anchor-based multi-connectivity in 5g user-centric network,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. Aug., no. 2, pp. 396–399, 9 2019.
- [3]. S. L. Aljohani and M. J. F. Alenazi, “Mpresisdn: Multipath resilient routing scheme for SDN-enabled smart cities networks,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 4, Apr. 2021.
- [4]. E. Hossain and M. Hasan, “5G cellular: key enabling technologies and research challenges,” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 18, no. 3, pp. 11–21, May 2015.
- [5]. 金澤宏哉, 宮田純子, “セルの異種超高密度配置における滞在時間に基づくハンドオーバー制御,” *信学技報*, vol. 122, no. 4, CCS2022-64, pp. 7–12, Mar. 2023.
- [6]. J. M´arquez-Barja, C. T. Calafate, J.-C. Cano, and P. Manzoni, “An overview of vertical handover techniques: Algorithms, protocols and tools,” *Computer Communications*, vol. 34, no. 8, pp. 985–997, Jun. 2011.
- [7]. Q. Huang, Y.-C. Huang, K.-T. Ko, and V. B. Iversen, “Loss performance modeling for hierarchical heterogeneous wireless networks with speed-sensitive call admission control,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 5, pp. 2209–2223, Apr. 2011.
- [8]. T. M. Duong and S. Kwon, “Vertical handover analysis for randomly deployed small cells in heterogeneous networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 4, pp. 2282–2292, Jan. 2020.
- [9]. 福原健太, 宮田純子, “異種高密度ネットワークにおけるセル滞在時間に基づく垂直ハンドオーバー数の削減,” *ソサイエティ大会*, N-2-7, Sep. 2023.
- [10]. 福原健太, 宮田純子, “ユーザ移動速度も考慮したセル滞在時間閾値に基づく垂直ハンドオーバー数の特性解析,” *信学技報*, vol. 123, no. 253, CCS2023-31, pp. 37–42, Nov. 2023.
- [11]. 岸田朗, 森広芳文, 浅井孝浩, 奥村幸彦, “端末移動方向を考慮した 5g 多層セル環境におけるハンドオーバー頻度低減方式に関する検討,” *信学技報*, vol. 116, no. 508, pp. 223–228, Mar. 2017.
- [12]. I. A. Alablani and M. A. Arafah, “An adaptive cell selection scheme for 5g heterogeneous ultra-dense networks,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 64 224–64 240, 4 2021.
- [13]. X. Xu, Z. Sun, X. Dai, T. Svensson, and X. Tao, “Modeling and analyzing the cross-tier handover in heterogeneous networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 12, Sep 2017.
- [14]. W. Bao and B. Liang, “Handoff rate analysis in heterogeneous wireless networks with poisson and poisson cluster patterns,” *Proceedings of the 16th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, p. 77–86, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2746285.2746317>

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Transfer Probability-Based Job Reallocation Method for Heterogeneous Edge Clouds	IEEE Open Journal of the Communications Society	June. 2025.
Extending 5G Small Cell Sojourn Distance Models Toward Realistic Scenarios Using a von Mises Distribution-based Placement	IEEE CISOSE	July 2025
Bertrand's Paradox in Vertical Handover: A Probabilistic Analysis	IEEE Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC) (IEEE Best workshop award 受賞)	Nov. 2024
異種混合ネットワークにおけるセル集中度を考慮した水平/垂直ハンドオーバーの統合モデル	信学技報, vol. 125, no. 416, CCS2025-79, pp. 142-147.	2026 年 3 月
4G/5G 異種混合ネットワークにおける垂直ハンドオーバー発生頻度の近似解析	信学技報, vol. 125, no. 173, IN2025-31, pp. 42-47 (最優秀発表賞受賞, 第 32 回情報ネットワーク研究会研究賞受賞)	2025 年 9 月