

# 基地局のクラスタ配置を考えた2層セルラネットワークにおける Time-based なハンドオーバー制御手法の評価

05001104 東京工業大学  
東京工業大学  
富士通研究所/理化学研究所

\*徳山喜一 TOKUYAMA Kiichi  
徐逸凡 XU Yifan  
和田裕一郎 WADA Yuichiro

## 1. はじめに

無線通信セルラネットワークでは、日々膨大化する通信の需要に対応するため、基地局の高密度化による通信供給容量の拡大が進んでいる。その一方で、高密度化セルラネットワークでは移動体ユーザ（移動体 UE）の行うハンドオーバーの過剰化が深刻となるため、これらの制御が重要な課題である。以上の背景から、UE に対するハンドオーバー制御が通信性能に及ぼす影響を解析する研究が様々に行われてきた。特に [1] では、Time-based なハンドオーバー制御手法と呼ばれる、スキップ時間という制御可能変数を用いたハンドオーバー制御を2層セルラネットワークにおいて導入し、当該手法の有用性について検証した。なお当該研究では、第2層目を構成するスモール基地局の配置をポアソン-ポアソン・クラスタ点過程 [2] により表すことで、基地局のクラスタ配置をモデル上に取り入れている。しかし、当該研究にて評価された性能指標には近似解析が導入されており、特にハンドオーバーレートの性能指標において、制御可能変数の設定次第でその近似の影響が大きく現れている [1, 図 1 (a)]。ゆえに、当該研究では性能指標に対する近似の影響が少ないスキップ時間の値範囲でのみ性能評価が行われ、特に性能評価関数のスキップ時間に関する最適化は考察されなかった。本発表では当該研究 [1] を拡張し、ハンドオーバーレートの性能指標について近似を導入しないより厳密な解析結果を与える。さらに、その結果を用いて [1] では考察されなかった様々な性能評価を行う。

先駆けとして、本研究で導入するクラスタ点過程の一種であるポアソン-ポアソン・クラスタ点過程、またそのクラスの一であるマターン・クラスタ点過程の定義を述べる。なお、本研究はすべてのクラスタがそのクラスタ重心に対し等方的である状況を特に考察する。

**Definition 1**  $\mathbb{R}^2$  上のポアソン-ポアソン・クラスタ点過程  $\Phi(\lambda_p, g, \bar{m})$  は次のように定義される [2]。

$$\Phi(\lambda_p, g, \bar{m}) = \bigcup_{z \in \Psi_p} z + C^z,$$

ここで  $\lambda_p$  は親過程を表す  $\mathbb{R}^2$  上の定常ポアソン点過程  $\Psi_p$  の強度を表し、 $C^z$  は親点を  $z \in \Psi_p$  にもつ子過程であって  $C^z$  の点の数は平均  $\bar{m}$  のポアソン分布に従う。さらに、点列  $\{\mathbf{x}\} = z + C^z$  は、親点  $z \in \Psi_p$  に関する条件付きで独立かつ同分布であり、 $z$  に対する相対的位置が確率密度関数  $g(\mathbf{x} - z) =: g_d(\|\mathbf{x} - z\|)$  に従う。また、特に  $g_d(s) = \mathbb{1}_{[0, r_d]}(s) / (\pi r_d^2)$  であるとき、 $\Phi(\lambda_p, g, \bar{m})$  をマターン・クラスタ点過程と呼び、 $r_d > 0$  はクラスタ半径を表す。

## 2. システムモデル

本研究では、マクロ層を第1層、スモール層を第2層とした2層セルラネットワークモデルを考える。各層を構成するマクロ基地局群、スモール基地局群はそれぞれ、強度  $\lambda_1$  の定常ポアソン点過程  $\Phi_1(\lambda_1)$ 、ポアソン-ポアソン・クラスタ点過程  $\Phi_2(\lambda_p, g, \bar{m})$  によって2次元平面上に配置されるとする。各層における基地局群はそれぞれ共通の電波発信強度によって全方位に電波を発信するとし、その発信強度をそれぞれ  $P_1, P_2$  ( $P_1 > P_2 > 0$ ) とする。フェージングはレイリーフェージングに

従うとし、シャドーイングは無視する。このとき、 $\mathbf{u}$  に位置する UE が  $\mathbf{x}_k, k \in \mathbb{N}$  に位置する基地局から受信する電波の強度は次のようになる： $P_{(\mathbf{x}_k)} h_{\mathbf{x}_k, \mathbf{u}} \|\mathbf{x}_k - \mathbf{u}\|^{-\beta}$ ,  $h_{\mathbf{x}_k, \mathbf{u}} \sim \exp(1)$ 、ただし、 $P_{(\mathbf{x}_k)}$  は  $(\mathbf{x}_k) \in \Phi_1$  ならば  $P_{(\mathbf{x}_k)} = P_1$ 、 $(\mathbf{x}_k) \in \Phi_2$  ならば  $P_{(\mathbf{x}_k)} = P_2$  を表すものとし、また距離によるパスロスの効果はパスロス指数を  $\beta > 2$  とした指数法則に従うとした。

本研究で定める移動体 UE に対するハンドオーバーの処理プロセスについて説明する。ある地点において移動体 UE がハンドオーバー処理を行う際は、その UE 自身に最も強い電波を供給する基地局が選択されハンドオーバーが行われるとする。なお、ハンドオーバー処理における電波参照ではフェージングの影響は平均化されると仮定する。すなわち、地点  $\mathbf{u}$  に位置する UE がハンドオーバーを行うと、次をみたす位置  $\mathbf{x}_{k^*}(\mathbf{u})$  にある基地局がその UE の新たな通信先となる：

$$\mathbf{x}_{k^*}(\mathbf{u}), \text{ such that } k^*(\mathbf{u}) = \arg \max_k P_{(\mathbf{x}_k)} \|\mathbf{x}_k - \mathbf{u}\|^{-\beta},$$

次に、移動体 UE の移動を表すモデルと、本研究で考察する Time-based なハンドオーバー制御手法を与えるモデルについて説明する。移動体 UE は、次に説明するマルコフ的ランダムウォークモデルに従った Time-based なハンドオーバー制御を試みるとする。任意の  $j$  番目の移動において、UE は点  $\mathbf{p}_{j-1} \in \mathbb{R}^2$  から点  $\mathbf{p}_j \in \mathbb{R}^2$  へと等速直線移動する。このとき、 $\mathbf{p}_j$  は  $\mathbf{p}_{j-1}$  に対し次のように決定される：

$$\mathbf{p}_j = \mathbf{p}_{j-1} + s_i \mathbf{v}_j, \quad \mathbf{p}_0 = \mathbf{o}, \quad i = 1, 2, \quad j \in \mathbb{N},$$

ここで、 $\mathbf{v}_j = (v_j, \psi_j) \in \mathbb{R}^2$  は UE の  $j$  番目の移動における速度ベクトルを表し、 $v_j \in \mathbb{R}$  は定数、 $\psi_j$  は  $\psi_j \sim \text{Unif}(0, 2\pi)$  であって  $j$  について独立とする。さらに、 $s_i$  はスキップ時間と呼ばれ、 $\mathbf{x}_{k^*}(\mathbf{p}_{j-1}) \in \Phi_1$  ならば  $s_i = s_1$ 、 $\mathbf{x}_{k^*}(\mathbf{p}_{j-1}) \in \Phi_2$  ならば  $s_i = s_2$  をみたす制御可能変数であり、 $s_1 > s_2$  であるとする。すなわち、UE は地点  $\mathbf{p}_j$  でハンドオーバーを行った際にマクロ層と通信を行えば時間  $s_1$ 、スモール層と通信を行えば時間  $s_2$  の間等速直線移動を行い、かつその速度は以前の履歴とは独立に決定される。最後に、スキップ時間  $s_i$  を期間とする直線移動の最中は UE はハンドオーバーを行えない、すなわち点  $\mathbf{p}_j$  上でのみ UE はハンドオーバーを行えると仮定する。以上の仮定により、本モデルでは  $s_1, s_2$  を制御可能変数として UE のハンドオーバーの実行頻度を調整できる。

## 3. 解析結果

ある  $j \in \mathbb{N}$  番目の移動期間を速度  $v_j$  で移動する UE に対し、ハンドオーバーレート、データレートの各期待値を解析する。ここで、 $\Phi_i, i = 1, 2$ , が定常かつ  $\mathbf{p}_j$ , と独立であることから、一般性を失わず  $\mathbf{p}_j = \mathbf{o}$  かつ  $\psi_j = 0$  とみなせることに注意する。すなわち、任意の  $j$  番目の移動を原点から水平軸正方向への移動とみなせる。また、以降すべての座標は極座標表記であるとする。  $N(s_1, s_2, v_j)$  と  $D(s_1, s_2, v_j)$  をそれぞれ、 $j$  番目の移動における UE のハンドオーバーレートとデータレートとする。  $\mathbf{x}_{k^*}(\mathbf{p}_{j-1}) \in \Phi_i$ , すなわち  $j$  番目の移動における UE

の通信先の基地局が第  $i$  層に属するとき、ハンドオーバーレートとデータレートはそれぞれ次のようになる。

$$N(s_1, s_2, v_j) = \begin{cases} 1/s_i, & \text{if HO happens at } \ell_1, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (1)$$

$$D(s_1, s_2, v_j) = \frac{1}{s_i} \sum_{t=0}^{s_i-1} E[\log(1 + \text{SIR}_{rv_j, k_i^*})]. \quad (2)$$

以降、ハンドオーバーレート  $N(s_1, s_2, v_j)$  の期待値の解析結果について紹介する。データレート  $D(s_1, s_2, v_j)$  の期待値については、[1, Proposition 2] と同様のものを採用するためここではその解析結果を述べない。

**Proposition 1** (1) において定められたハンドオーバーレートについて、その期待値は次のように与えられる。

$$E[N(s_1, s_2, v_j)] = \frac{2\pi\lambda_1}{s_1} \int_0^\infty r e^{-\lambda_1 \pi r^2} A_1(r) \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \int_0^\pi D_1(r, s_1 v_j, \theta) d\theta \right] dr + \frac{\bar{m}}{s_2} \int_0^\infty e^{-\lambda_1 \pi \bar{P}_{2,1} r^2} A_2(r) \left[ B(r) - \frac{1}{\pi} \int_0^\pi C(r, s_2 v_j, \theta) D_2(r, s_2 v_j, \theta) d\theta \right] dr, \quad (3)$$

ただし、

$$A_i(r) = \exp\left(-2\pi\lambda_p \int_0^\infty z \{1 - e^{-\bar{m} F_d(\bar{P}_{i,2} r |z)}\} dz\right),$$

$$B(r) = 2\pi\lambda_p \int_0^\infty z f_d(r|z) e^{-\bar{m} F_d(r|z)} dz,$$

$$C(r, \ell, \theta) = 2\lambda_p \int_0^\infty z f_d(r|z) e^{-\bar{m} F_d(r|z)} \times \int_0^\pi \exp\left(-\bar{m} \int_{\mathcal{D}_{2,2}(r, \ell, \theta)} g(\mathbf{x}-z) d\mathbf{x}\right) d\theta dz,$$

$$D_i(r, \ell, \theta) = \exp\left(-\lambda_1 |\mathcal{D}_{i,1}(r, \ell, \theta)| - 2\lambda_p \int_0^\infty z e^{-\bar{m} F_d(\bar{P}_{i,2} r |z)} \times \int_0^\pi \left\{1 - \exp\left(-\bar{m} \int_{\mathcal{D}_{i,2}(r, \ell, \theta)} g(\mathbf{x}-z) d\mathbf{x}\right)\right\} d\theta dz\right),$$

ここで、 $F_d/f_d$  は親点を  $z$  にもつある  $\Phi_2$  の点から原点までの距離の分布関数/密度関数を表し、特にマターン・クラスタ点過程に対しては、 $z = \|z\|$  として以下のように表される [2]。

$$F_d^{(M)}(r|z) = \frac{1}{r_d^2} \left\{ [r \wedge (r_d - z)]^2 + \frac{2}{\pi} \int_{r \wedge |r_d - z|}^{r \wedge (r_d + z)} x \cos^{-1}\left(\frac{x^2 + z^2 - r_d^2}{2xz}\right) dx \right\},$$

$$f_d^{(M)}(r|z) = \frac{2r}{r_d^2} \left\{ \mathbb{1}_{[0, (r_d - z)^+]}(r) + \frac{1}{\pi} \cos^{-1}\left(\frac{r^2 + z^2 - r_d^2}{2rz}\right) \mathbb{1}_{[r_d - z, r_d + z]}(r) \right\},$$

さらに、 $\mathcal{D}_{i,j}(r, \ell, \theta)$  は次のように表される領域である。

$$\mathcal{D}_{i,j}(r, \ell, \theta) := b((\ell, 0), \bar{P}_{i,j} \omega_{r, \ell, \theta}) \cap b(\mathbf{o}, \bar{P}_{i,j} r)^c, \quad i, j = 1, 2,$$

ただし、 $\bar{P}_{i,j} = (P_j/P_i)^{1/\beta}$ 、 $\omega_{r, \ell, \theta} = \sqrt{r^2 + \ell^2 - 2r\ell \cos \theta}$ 、 $i, j = 1, 2$ 、 $\ell \geq 0$ 、である。

上述の  $\mathcal{D}_{i,j}(r, \ell, \theta)$  はハンドオーバーの発生領域とみなすことができ、 $j$  番目の移動直後の地点  $\mathbf{p}_j$  において第  $i$  層から第  $j$  層へのハンドオーバーが発生することは、領域  $\mathcal{D}_{i,j}(r, \ell, \theta)$  に  $\Phi_j$  の点が 1 つ以上含まれることと同値である。 $\Phi_2$  を特にマ

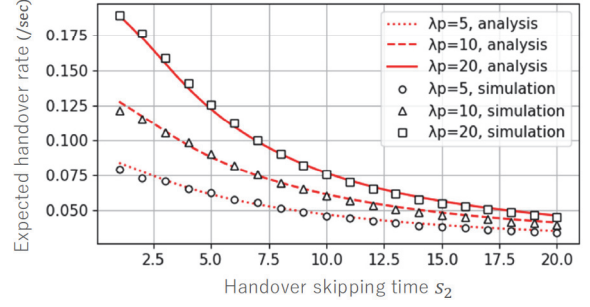


Fig 1: 式 (3) で与えられた  $E[N(s_1, s_2, v_j)]$  と、試行回数 20000 回のシミュレーションによる  $N(s_1, s_2, v_j)$  のモンテカルロ平均との数値例比較結果。他のパラメータ設定は次の通りである：  
( $s_1, v_j, \lambda_1, \bar{m}, r_d, P_1/P_2, \beta$ ) = (20 (sec), 0.02 (km/sec), 1.0 (units/km<sup>2</sup>), 5 (units), 0.1 (km), 1000, 4).

ターン・クラスタ点過程とすれば、 $\mathcal{D}_{i,j}(r, \ell, \theta)$  に関する解析結果は次のようになる。

**Lemma 1**  $\Phi_2(\lambda_p, g_d, \bar{m})$  を特にマターン・クラスタ点過程とするとき、 $|\mathcal{D}_{i,1}(r, \ell, \theta)|$  および領域  $\mathcal{D}_{i,2}(r, \ell, \theta)$  に関する積分項はそれぞれ次のように表される。

$$|\mathcal{D}_{i,1}(r, \ell, \theta)| = \eta(\bar{P}_{i,1} r, \ell, \bar{R}(\bar{P}_{i,1} r, \bar{P}_{i,1} \omega_{r, \ell, \theta}, \ell)) + \pi [\bar{P}_{i,1}^2 \omega_{r, \ell, \theta}^2 - (\ell + \bar{P}_{i,1} r)^2]^+,$$

$$\int_{\mathcal{D}_{i,2}(r, \ell, \theta)} g(\mathbf{x}-z) d\mathbf{x} = G^{(M)}(\bar{P}_{i,2} r, \bar{P}_{i,2} \omega_{r, \ell, \theta}, \ell | z, \phi),$$

ただし、 $h, r' > 0$ 、として、

$$\eta(r, \ell, \theta) = \omega_{r, \ell, \theta}^2 \cos^{-1}\left(\frac{r \cos \theta - \ell}{\omega_{r, \ell, \theta}}\right) - r^2 \theta + r \ell \sin \theta,$$

$$\bar{R}(x, h, \ell) = \cos^{-1}\left(-1 \vee \frac{x^2 + \ell^2 - h^2}{2x\ell} \wedge 1\right),$$

$$G_d^{(M)}(r', h, \ell | z, \phi) = \frac{1}{\pi r_d^2} \left\{ \int_{r' \wedge (r_d - z)^+}^{(h+\ell) \wedge (r_d - z)^+} x R_{x, h, \ell} dx + \left( \int_{(h+\ell) \wedge |r_d - z|}^{(h+\ell) \wedge (r_d + z)} - \int_{r' \wedge |r_d - z|}^{r' \wedge (r_d + z)} \right) x H^{(M)}(x, R_{x, h, \ell} | z, \phi) dx \right\},$$

また、 $\psi, u > 0$ 、として、

$$H^{(M)}(x, \psi | z, \phi) = (\phi + \psi + R_{x, r_d, z} - 2\pi)^+ + (\phi + \psi) \wedge R_{x, r_d, z} - (-R_{x, r_d, z}) \vee (\phi - \psi) \wedge R_{x, r_d, z},$$

$$R_{x, h, u} = \cos^{-1}\left(\frac{x^2 + u^2 - h^2}{2xu}\right).$$

図 1 は、式 (3) で得られたハンドオーバーレート解析結果の数値例であり、シミュレーション結果と合致していることが分かる。本結果と、[1, Proposition 2] にて得られた (2) の期待値の解析結果を用いて、2 層セルラネットワークにおける UE の通信性能の評価を行う。その評価結果の詳細については、口頭発表にて報告する。

謝辞 本研究は、東京工業大学の三好直人先生のご貢献のもとで行われました。この場を借りて、感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] X. Yifan, K. Tokuyama, and Y. Wada, "Handover Skipping Analysis in Dense Cellular Network Using Poisson Cluster Process," to appear in IEEE VTC 2022-Spring.
- [2] N. Miyoshi, "Downlink Coverage Probability in Cellular Networks With Poisson-Poisson Cluster Deployed Base Stations," in IEEE Wireless Commun. Letters, vol. 8, no. 1, pp. 5-8, 2019.