

# 3次元空間を飛び回る UAV 同士の無線通信のための 確率幾何を用いた通信性能解析と飛行高度の最適化

平井 健士\*

## Stochastic Geometry-based Performance Analysis and UAV Height Optimization in 3D Space for UAV-to-UAV Communications

Takeshi HIRAI\*

This paper proposes a stochastic geometry-based analytical model for the packet reception ratio in unmanned aerial vehicle (UAV)-to-UAV communications in a 3D space and optimizes UAV heights based on the proposed model. The key idea in the proposed model is to reflect the density distribution of UAVs per height to the model by using stochastic geometry. Our analytical results showed that a higher density distribution at a lower height achieved a higher packet reception ratio to mitigate the interference with the line-of-sight condition.

### 1. 研究背景

将来、多数の unmanned aerial vehicle (UAV) が市街地等を3次元的に飛び回り、様々な次世代サービスを提供することが期待される。例えば、UAVを用いた配達（ラストワンマイルデリバリ）等が挙げられる。この際、各 UAV は、貨物輸送のためにビル街や市街地等を低空飛行しつつ、配達時には地上に着陸するというように比較的low空を飛び交うような状況が想定される。

このような次世代サービスにおいて、UAV同士が情報交換・連携するために、UAV同士の無線通信（UAV-to-UAV: U2U）が重要となる。例えば、ビル陰に隠れた UAV 等を認識し、安全走行・衝突回避するために、UAV同士がU2Uを使って、相互に位置情報を送受信する必要がある。これらの情報交換や連携を正確に行うためには、U2Uの通信成功率が十分高くなければならない。U2Uは、従来の地上での無線通信とは異なり、飛行高度を自由に制御できるため、各 UAV が適切な高度で飛行すれば、それぞれの通信成功率が向上し得る。通信成功率は、「自身の通信信号の電力」と「それ以外の通信による干渉信号の電力和」の比である信号対干渉ノイズ比によって決まる。この通信信号と干渉信号に対して、ある UAV が自身の飛行高度を上昇させることによって、以下の3つの影響が生じる。①自身の通信が障害物に邪魔されにくくなる（つまり、見通しになりやすくなる）ため、自身の通信信号が強まる。②障害物が減り、見通しになりやすいため、他の UAV から到来する干渉が強まる。③障害物が減り、UAVの存在可能な空間が広がるため、他の UAV との距離が遠くなり、他の UAV から到来する干渉が弱まる。逆に、この高度上昇は、他の UAV に対して、2と3の影響を与える。従って、U2Uの通信成功率は、全 UAV の飛行高度とそれに伴う上記3つの影響のバランスに左右され、非常に複雑な特性を示す。

そこで、本研究では、市街地等でのU2Uの利用に向けて、UAVが3次元空間を飛び交うU2U通信環境において、通信成功率を高めるような高度毎のUAV密度分布を明らかにする。そのために、本研究では、UAVの飛行高度の分布と通信成功率を確率幾何アプローチにより解析し、知見を得る。この解析を基に、通信成功率を最大化する最適な飛行高度の分布を明らかにし、一様な分布と比較したときの最適分布のゲインを示す。ただし、本稿では、高度-密度分布による①と②の特性を明らかにするために、[1][2]で公開した基礎的な解析について説明する。近日中に投稿予定の高度毎のUAV密度分布のモデル化及び高度毎のUAV密度分布の最適化に関する内容については、詳細な説明を省略する。

### 2. U2Uにおける確率幾何解析モデル

まず、システムモデルについて説明する。UAVは、最高高度 $Z$ の3次元円柱空間に非一様なポアソン点過程で分布していると仮定する。つまり、各高度 $z$ に対する高度-密度分布の関数を $\lambda(z)$ となるように配置されている。ある2台のUAV  $k$ と $j$ において、その水平距離を $r_{kj}$ とし、これらの高度を $z_k$ 及び $z_j$ とする。すなわち、3次元距離を $d_{kj}$ とする。また、見通しの条件を $b \in B = \{L, N\}$ とし、 $b$ の発生確率を $p_b(r_{kj}, z_k, z_j)$ と表現する。送信電力を $P$ とし、電波減衰は、距離減衰

$\theta_b(d_{kj})$ とパラメータ $m_b$ を持つ仲上 $m$ フェージングゲイン $h_b(k,j)$ に従う。 $\gamma_b(k,j)$ 信号対干渉ノイズ比であり、 $\gamma$ はパケット受信に必要な信号対干渉ノイズ比の閾値である。ある $k$ から $j$ への見通しの条件 $b_k$ としたとき、信号対干渉ノイズ比 $\gamma_{b_k}(k,j)$ は、以下のように表現できる。

$$\gamma_{b_k}(k,j) = \frac{Ph_{b_k}(k,j)\theta_{b_k}(d_{kj})}{I + N_0}$$

ここで、 $I$ は他の UAV からの干渉の総和であり、 $N_0$ はノイズ電力である。

以上のシステムモデルにおいて、ある UAV  $k$ から $j$ へのパケット受信率 $\psi(k,j)$ は、見通し $b_k$ の発生条件下におけるパケット受信率 $\psi_{b_k}(k,j)$ を用いて、以下のような期待値として表現できる。

$$\psi(k,j) = \sum_{b_k \in \mathcal{B}} p_{b_k}(r_{kj}, z_k, z_j) \psi_{b_k}(k,j) = \sum_{b_k \in \mathcal{B}} p_{b_k}(r_{kj}, z_k, z_j) \Pr(\gamma_{b_k}(k,j) \geq \gamma | b)$$

このパケット受信率は、ラプラス変換 $\mathcal{L}_I(s)$ を用いて、以下のように表現できる。

$$\psi_{b_k}(k,j) = \sum_{n=0}^{m_b} \left( c_1 \sum_{t=0}^n \binom{n}{t} N_0^{n-t} (-1)^t \left[ \frac{d^t}{ds^t} \mathcal{L}_I(s) \right]_{s=c_2} \right)$$

ここで、 $c_1$ と $c_2$ は定数である。この $\mathcal{L}_I(s)$ は、ガンマ関数の moment generating function 及びポアソン点過程における probability generating functional の特性を適用することで、以下のように表現できる。

$$\mathcal{L}_I(s) = \prod_{b \in \mathcal{B}} \exp \left( -2\pi \int_0^z \int_0^\infty \lambda(z) p_b(r, z, z_j) \left( 1 - \left( \frac{m_b}{m_b + sP\theta_b \left( \sqrt{r^2 + (z-z_j)^2} \right)} \right)^{m_b} \right) r dr dz \right)$$

このラプラス変換の項に、高度-密度分布関数 $\lambda(z)$ が含まれており、この $\lambda(z)$ によりパケット受信率が変動する。

### 3. 解析結果

本稿では、代表的な高度-密度分布関数 $\lambda(z)$ として、図1のような4つの UAV の密度分布に対するパケット受信率を解析する。図1は、横軸が高度、縦軸が UAV の密度である。ここでは、①と②の影響のみが反映されている。特に、図1における右肩上がり型の分布関数のように、高高度に UAV 数が多い場合、①の影響から、他の UAV に干渉を与えるため、パケット受信率が低下することが予想される。詳しい $\lambda(z)$ の式については、[2]に示しているため割愛する。また、その他のパラメータも[2]の記載の通りである。

図2は、図1で与えた $\lambda(z)$ において、高度毎に対するパケット受信率を示している。横軸は受信 UAV  $j$ の高度を示しており、縦軸はパケット受信率を示している。右肩上がり型の UAV 分布では、一様型と比べて、パケット受信率が低下していることが分かる。一方、右肩下がり型では、パケット受信率が向上していることが分かる。以上のことから、最適化の際には、高高度の UAV 密度を抑えることがより重要になってくることが示された。

### REFERENCES

- 1) 清水聡真, 平井健士, 若宮直紀, 信学技報, 123 (2024) 106-111, SeMI2023-69.
- 2) 清水聡真, 平井健士, 若宮直紀, 信学技報, 123 (2024) 47-52, IN2023-73.

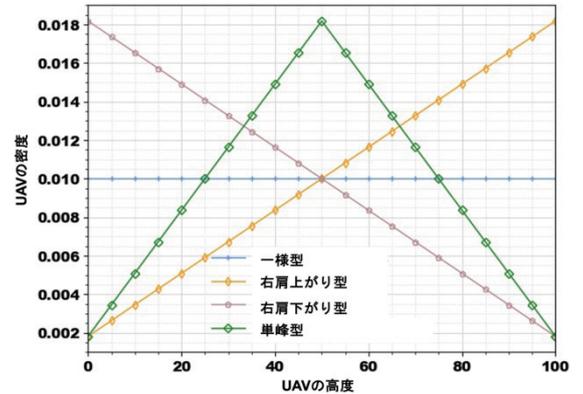


図1 高度に対する UAV の密度分布関数[2].

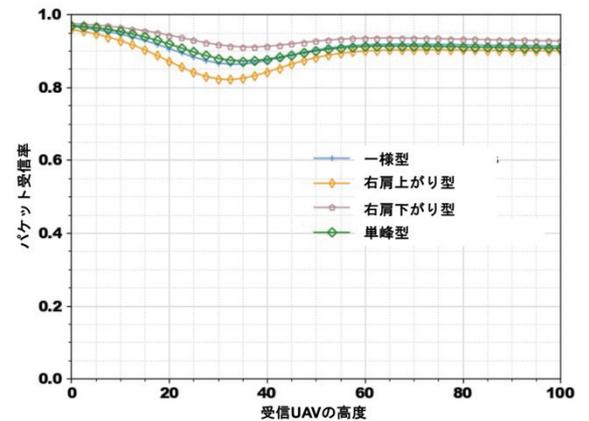


図2 受信 UAV の高度に対するパケット受信率[2].