日本オペレーションズ・リサーチ学会
2021年 春季研究発表会

ドローン配送における上空利用料に関する基礎理論

05001279　筑波大学　＊下津　大輔　SHIMOTSU Daisuke
01013930　国土技術政策総合研究所　石井　儀光　ISHII Norimitsu
01009480　筑波大学　大澤　義明　OHSAWA Yoshiaki

1. はじめに

物流分野における労働力不足が懸念されており，離島や山間部などの過疎地を中心に，最先端テクノロジーであるドローンを活用した配送が現実味を帯びてきている．しかし，民法により土地所有者の権利はその上空に及び，無許可で第三者の土地の上空をドローン飛行できない．打開策として，ドローン事業者が土地所有者に上空利用料を支払うという空路ビジネスが提案されている．料金算定の根拠として，ドローンが敷地を通過する回数や距離が料金に反映されることが考えられる．

本研究では，敷地と道路の形状・規模など地上側の土地利用情報を明示的に取り入れた空間モデルを構築し，地域住民への金銭的インセンティブを付与する上空利用料に関して定量的試算を行う．固定料金と可変料金から構成される**二部料金**制の上空利用料と敷地や道路の土地利用条件との関係を解析的に導出する．

2. 理論モデル

2.1 上空利用料の期待値

ドローン配送では需要側からは速達性，供給側からはバッテリー制約のため最短距離での移動が求められる．最短距離での移動のためには直線飛行が考えられ，このとき第三者上空での飛行は不可避である．ドローン配送はこれから利用が急増すると予測されるため，飛行ルートを特定することは難しい．そこでドローン飛行に関して恣意性が入らない状況として，積分幾何学[1][2]の知見を用い，「ドローンが敷地上空を飛行する」ことを「**ランダムライン**が敷地を通る」と考え，一本のランダムラインが通る敷地の通過数，通過長の期待値を用いて，利用料の理論値を算定する．

格子街区が現実に多いことに着目し，格子街区での分析を行う．対象領域Ωを横，縦の長さがa, bの矩形とする．矩形Ωを，横にn_1個，縦にn_2個で等分割し生成される同一形状の$n_1 n_2$個の矩形敷地を考える．ただし，矩形敷地を取り巻く道路の幅員はcとし，$a \geq n_1 c, b \geq n_2 c$とする．$n_1 = 3$，$n_2 = 1$の例を図1に示す．1本のランダムラインによる敷地の通過数をm，通過長をlとし，金銭換算するパラメータを$\lambda(\geq 0)$および$\mu(\geq 0)$としたとき，上空利用料の期待値$\mathrm{E}[\lambda l + \mu m]$は次のようになる[3]：

$$\mathrm{E}[\lambda l + \mu m] = \frac{\frac{\lambda\pi}{2}(a-n_1c)(b-n_2c)+\mu(n_2a+n_1b-2n_1n_2c)}{a+b}.$$

上空利用料は道路幅cの減少関数となることが分かる．道路幅が増加すると，敷地率（領域の面積のうち，敷地の面積が占める割合）は減少する．したがって，上空利用料は敷地率の上昇により増加するという直感に整合する．

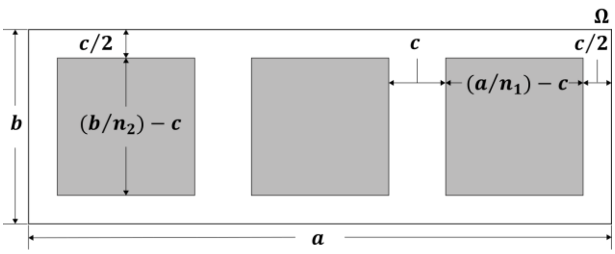


図 1 格子モデルの一例（$\boldsymbol{n_1 = 3, n_2 = 1}$）

2.2 通過数・通過長の相関係数

ランダムラインによる通過数・通過長の相関の強さに着目する．$2 \times 2, 3 \times 3, 4 \times 4$格子における結果は，煩雑な計算を経て，表1の様に解析的に求められる[3]．相関係数は強い水準にあり，敷地数が増加するにつれて相関係数が高くなる様子が観察できる．

表 1　共分散，相関係数の解析解

格子	$E[lm]$	共分散	相関係数
2×2	3.606	0.464	0.853
3×3	8.326	1.257	0.923
4×4	14.938	2.371	0.945

3. 数値シミュレーション

敷地が増えても共分散と相関係数の解析解導出は可能だが，計算が一層煩雑となるため，5×5格子以降数値シミュレーションにより導出する．敷地を単位正方形，対象領域を正方形（$n \equiv n_1 = n_2, a = b = n$）とし，通過数$m$と通過長$l$との相関係数$\rho_{m,l}$を求める．具体的な手順は次のようになる：

(s-1) 対象領域内にM系列乱数(メルセンヌ・ツイスタ)を用いて一様にランダムな直線を発生させる.
(s-2) 直線が通過する敷地数(通過数)x_iと，敷地上の延長(通過長)y_iを計算する.
(s-3) ステップ(s-1)と(s-2)をk回繰り返し，最後に，
$\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} x_i$，$\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} y_i$，$\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} x_i^2$，$\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} y_i^2$，$\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} x_i y_i$を計算し，相関係数$\rho_{m,l}$を求める.

敷地率$\alpha = 1.0, 0.9, 0.8, 0.5$とし，$n$を 2 から 12 まで変化させ, 各$n$に対し$k = 10{,}000$とした結果を図2に示す. シミュレーション値と表 1 に示した 3 通りの解析結果とは小数点以下二桁まで完全に一致した.

図2から, 第一に敷地数が多いほど相関が強くなることが分かる. 敷地数が増えると通過数mのレンジが大きくなり，通過長lに応じて通過数mは変化することが理由であろう. 第二に, 敷地率が高くなるにつれて相関が強まる. 正方形領域では，敷地率が下がるとn個の敷地をまたいで飛んでいたドローンが道路上を飛ぶ確率が高くなるため，相関係数は低下する.

4. 敷地データ分析

通過長を実際の敷地で導出するためには, 境界が明確に判別できる敷地データが必要である. しかし, 現状そのような敷地データは存在していない. 敷地データを作成するには, 相応の計測コストが発生する. 計測コスト削減のため, 土地利用条件によって料金制度を使い分ける必要があり, ランダムラインによる敷地の通過数と通過長の相関関係に着目する.

戸建て住戸が立ち並ぶ郊外住宅地である横浜市戸塚区と, 人口約 3,000 人の北海道天塩町という密度が異なる 2 つの地域を対象とする. Google マップの航空写真とストリートビューを参考に, ArcGIS10.8.1 に描画することで敷地データを作成した. ArcGIS10.8.1 を用い, 各地域任意の位置に作成した 500m 四方の正方形グリッド内を領域とし，通過数mと通過長lの相関係数を算出した. 具体的な手法は前項の数値シミュレーションと同様のものであり，10,000 本のランダムラインによる敷地の交差判定を行った.

戸塚区と天塩町の各対象領域における, ランダムラインによる敷地の通過数と通過長の散布図を図 4 に示す. 相関係数は戸塚区が 0.98 と極めて高い相関関係を示しているのに対し, 天塩町は 0.79 に留まっている(表 2). 図4からも, 通過数に対する通過長のバラツキが天塩町の方が大きいことが読み取れる. 敷地率が高く敷地が狭い都市部では固定料金制, 敷地率が低く，敷地が広くバラツキのある地方部では二部料金制が有用である.

参考文献

1) 腰塚武志(1976) : 積分幾何学について(4), オペレーションズリサーチ, 21(12), pp.711-716.
2) 腰塚武志(2019) : 応用のための積分幾何学. 近代科学社.
3) 下津大輔, 石井儀光, 大澤義明(2020): 「上空利用料に関する積分幾何学を用いた基礎理論」, 都市計画学会論文集, 55(3), pp. 400-406.

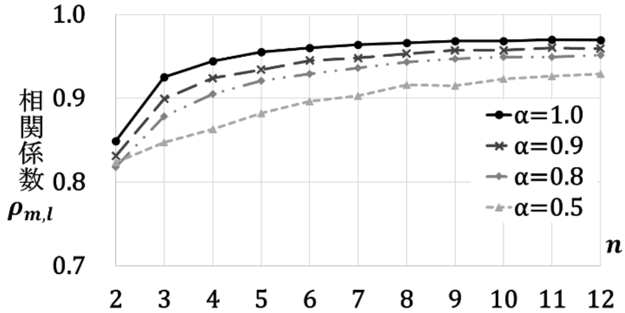
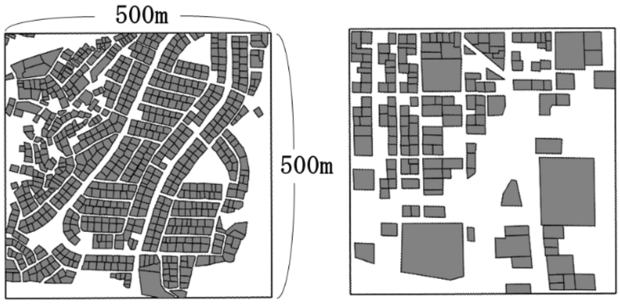


図 2 シミュレーションによる単位正方形の相関係数



(ア) 戸塚区対象領域　(イ) 天塩町対象領域

図 3 シミュレーション対象領域

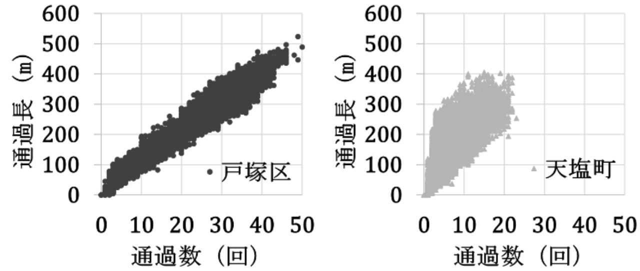


図 4 通過数と通過長の散布図

表 2 相関係数比較

	横浜市戸塚区	天塩町
相関係数	0.98	0.79