

飛行禁止区域を考慮したトラックおよびドローンの併用による配送計画問題
Vehicle Routing Problem using a Combination of a Truck and Drones with No-Fly Zones

東山 敏也¹⁾ 平山 勝敏¹⁾ 沖本 天太¹⁾
Toshiya Higashiyama Katsutoshi Hirayama Tenda Okimoto

1 はじめに

最終拠点から顧客までの物流をラストワンマイルと呼ぶ。そのラストワンマイルのための新たな配送方式として、近年ドローンが注目されている。政府は、2022 年度を目処として有人地帯におけるドローンの補助者なし目視外飛行 (レベル 4) の実現を目指すこととしており、それに伴い日本国内においても様々な実証実験が行われている。一般的に、ドローンは速達性や省人化に優れているが、積載重量・飛行可能範囲といった面では制約があり、広域での運用が困難であるという欠点がある。そこで、トラックがある地点までドローンを運ぶことでドローンの飛行制限を補う配送方式が考案されており、トラックとドローンを併用したハイブリッド型運搬システムの開発が検討されている。こうした配送方式は、それぞれの車両が持つ強みを選択的かつ相乗的に活用できるため、従来型と比較して大きなメリットがある。

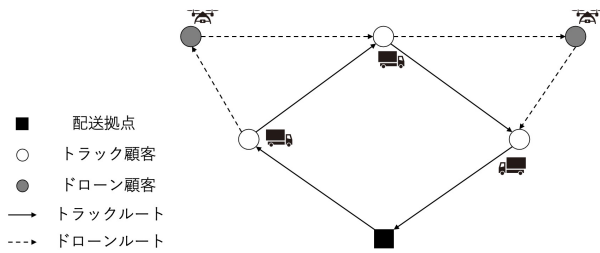


図 1 トラックとドローンを併用した配送方式

Murray&Chu[1] がトラックとドローンを併用した配送方式のモデル化として Flying Sidekick Traveling Salesman Problem (FSTSP) というモデルを提唱して以降、その拡張として様々な研究が行われている。例えば、Jeong らは空港やヘリポートなどのドローンが侵入できない地域の考慮を行い、飛行禁止区域を考慮したモデルを提唱している [2]。そこで、本研究は Jeong らのモデルをベースとし、飛行禁止区域を考慮するとともに配送の効率化を目指して複数のドローンを併用する新しいモデルを提案する。

2 定式化

本章では、飛行禁止区域に関するモデルを示し、飛行禁止区域に対する迂回方法を新たに提案する。その後、本研究モデルの定式化を示す。本研究では以下を仮定する。

- ドローンは、顧客に対応したノード上で発射/回収される。
- ドローンのバッテリーはトラックに回収される度に交換されるものとし、充電時間は考慮しない。
- 飛行禁止区域は円形で、互いに重ならない。

1) 神戸大学大学院海事科学研究科. Graduate School of Maritime science, Kobe university.

複数のドローンを使用した先行研究である MurrayRaj のモデル [3] に倣い以下の記号を定義する。なお、頂点 0 を出発時の配送拠点、頂点 $c + 1$ を到着時の配送拠点とする。

【集合】	
$V = \{1, 2, \dots, v\}$	ドローン集合
$C = \{1, 2, \dots, c\}$	顧客集合
$N = \{0, 1, \dots, c + 1\}$	全ノード集合
$N_0 = \{0, 1, \dots, c\}$	ドローン発射可能なノード集合
$N_+ = \{1, 2, \dots, c + 1\}$	ドローン回収可能なノード集合
$NZ = \{0, 1, \dots, h\}$	飛行禁止区域集合
P	ドローン配送可能な顧客セット
【パラメータ】	
$\tau_{i,j}$	ノード i, j 間のトラック移動時間
$\tau'_{i,j}$	ノード i, j 間のドローン移動時間
$d_{v,i,j,h}$	飛行禁止区域 h におけるノード i, j 間の迂回時間
L	発射に要する時間
R	回収に要する時間
s	サービス時間
e	ドローン飛行可能時間
st_h, et_h	飛行禁止区域の開始/終了時間
【決定変数】	
$x_{i,j}$	トラックがノード i からノード j に移動する場合 1, そうでないなら 0.
$y_{v,i,j,k}$	ドローン v がノード i から発射され、ノード j に配達し、ノード k で回収される場合 1, そうでないなら 0.
\tilde{t}_i	トラックのノード i 到着時間
\bar{t}_i	トラックのノード i サービス完了時間
\hat{t}_i	トラックのノード i 出発時間
$\hat{t}'_{v,i}$	ドローン v のノード i 到着時間
$\hat{t}'_{v,i}$	ドローン v のノード i 出発時間
$z^L_{v_1,v_2,i}$	ノード i にて v_1 が v_2 より先に発射される場合 1, そうでないなら 0.
$z^R_{v_1,v_2,k}$	ノード k にて v_1 が v_2 より先に回収される場合 1, そうでないなら 0.
$z^I_{v_1,v_2,i}$	ノード i にて v_1 の発射が v_2 の回収よりも先な場合 1, そうでないなら 0.
$r^s_{v,i,h}/r^e_{v,i,h}$	ドローン v のノード i 到着時間が飛行禁止区域 h の開始/終了時間より早い場合 1, そうでないなら 0.
$1 \leq u_i \leq c + 1$	部分巡回路除去制約

2.1 飛行禁止区域

以下に、飛行禁止区域を考慮しない場合のドローンの軌跡と考慮する場合のドローンの軌跡について図示する。図 2 は、ドローンがノード i からノード j に移動する様子を示している。

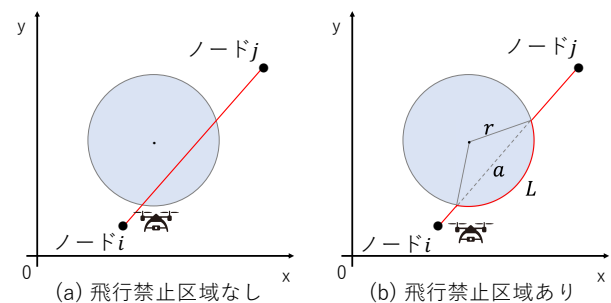


図 2 飛行禁止区域の迂回

図 2(a) で示すように、飛行禁止区域を考慮しない場合はドローンが直線的にノード間を移動する。しかし、飛行禁止区域を考慮する場合は迂回が必要となり、図 2(b) に示すようにドローンがその区域を避けて移動する。

$$\text{detour}_{i,j,h} = L - a = (2r \arcsin \frac{a}{2r}) - a \quad (1)$$

式 (1) は、ノード i からノード j に移動するために半径 r の飛行禁止区域 h を迂回することによって生じる移動距離を示す。飛行禁止区域の迂回が生じる場合は、式 (1) を適用することで移動距離を修正する。

2.2 提案モデル

以下に、飛行禁止区域を考慮した 1 台のトラック及び複数台のドローンの併用による配送計画問題の数理モデルを示す。

$$\text{Min} \quad \hat{t}_{c+1} \quad (2)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j \in N_+} x_{0,j} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{i,c+1} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{i,j} - \sum_{k \in N_+} x_{j,k} = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{j \in C} \sum_{k \in N_+} y_{v,i,j,k} \leq 1 \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{j \in C} y_{v,i,j,k} \leq 1 \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{i,j} + \sum_{v \in V} \sum_{i \in N_0} \sum_{k \in N_+} y_{v,i,j,k} = 1 \quad (8)$$

$$2y_{v,i,j,k} \leq \sum_{h \in N_0} x_{h,i} + \sum_{l \in C} x_{l,k} \quad (9)$$

$$y_{v,0,j,k} \leq \sum_{h \in N_0} x_{h,k} \quad (10)$$

$$p_{i,j} + p_{j,i} = 1 \quad (11)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (c+2)(1 - x_{i,j}) \quad (12)$$

$$u_k - u_i \geq 1 - (c+2) \left(1 - \sum_{j \in C} y_{v,i,j,k} \right) \quad (13)$$

$$u_i - u_j \geq 1 - (c+2)p_{i,j} \quad (14)$$

$$u_i - u_j \leq 1 + (c+2)(1 - p_{i,j}) \quad (15)$$

$$\hat{t}_j \geq \hat{t}_i + \tau_{i,j} - M(1 - x_{i,j}) \quad (16)$$

$$\bar{t}_k \geq \hat{t}_k + s \sum_{j \in N_0} x_{j,k} \quad (17)$$

$$\bar{t}_k \geq \hat{t}'_{v,k} + s - M(1 - z_{v,0,k}^R) \quad (18)$$

$$\bar{t}_k \geq \hat{t}'_{v,k} + s - M(1 - z_{v,0,k}^L) \quad (19)$$

$$\hat{t}_k \geq \bar{t}_k \quad (20)$$

$$\hat{t}_k \geq \hat{t}'_{v,k} - M \left(1 - \sum_{i \in N_0} \sum_{\substack{j \in C \\ i \neq k}} y_{v,i,j,k} \right) \quad (21)$$

$$\hat{t}_k \geq \hat{t}'_{v,k} - M \left(1 - \sum_{l \in C} \sum_{\substack{m \in N_+ \\ l \neq k}} y_{v,k,l,m} \right) \quad (22)$$

$$\hat{t}'_{v,l} \geq \hat{t}'_{v,k} - M \left(3 - \sum_{\substack{j \in C \\ (v,i,j,k) \in P \\ j \neq l}} y_{v,i,j,k} - \sum_{\substack{m \in C \\ m \neq i,k,l}} \sum_{\substack{n \in N_+ \\ (v,i,j,k) \in P \\ n \neq i,k}} y_{v,l,m,n} - p_{i,l} \right) \quad (23)$$

$$\hat{t}'_{v,i} \geq \hat{t}'_{v,i} + L - M \left(1 - \sum_{j \in C} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ j \neq i}} y_{v,i,j,k} \right) \quad (24)$$

$$\hat{t}'_{v,i} \geq \bar{t}_i + L - M(1 - z_{v,0,i}^L) \quad (25)$$

$$\hat{t}'_{v,i} \geq \bar{t}_i + L - M(1 - z_{0,v,i}^L) \quad (26)$$

$$\hat{t}'_{v,i} \geq \hat{t}'_{v_2,i} + L - M(1 - z_{v_2,v,i}^L) \quad (27)$$

$$\hat{t}'_{v_2,i} \geq \hat{t}'_{v,i} + L - M(1 - z_{v,v_2,i}^L) \quad (28)$$

$$\hat{t}'_{v,j} \geq \hat{t}'_{v,i} + \tau'_{v,i,j} + \sum_{h \in NZ} d_{v,i,j,h} (r_{v,i,h}^e - r_{v,j,h}^s) - M \left(1 - \sum_{k \in N_+} y_{v,i,j,k} \right) \quad (29)$$

$$\hat{t}'_{v,j} \leq \hat{t}'_{v,i} + \tau'_{v,i,j} + \sum_{h \in NZ} d_{v,i,j,h} (r_{v,i,h}^e - r_{v,j,h}^s) + M \left(1 - \sum_{\substack{k \in N_+ \\ (v,i,j,k) \in P}} y_{v,i,j,k} \right) \quad (30)$$

$$\hat{t}'_{v,j} \geq \hat{t}'_{v,j} + s \sum_{i \in N_0} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ i \neq j}} y_{v,i,j,k} \quad (31)$$

$$\hat{t}'_{v,j} \leq \hat{t}'_{v,j} + s + M \left(1 - \sum_{i \in N_0} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ i \neq j}} y_{v,i,j,k} \right) \quad (32)$$

$$t'_{v,k} \geq \hat{t}'_{v,j} + \tau'_{v,j,k} + \sum_{h \in NZ} d_{v,j,k,h} (r_{v,j,h}^e - r_{v,k,h}^s) + R - M \left(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ (v,i,j,k) \in P}} y_{v,i,j,k} \right) \quad (33)$$

$$\check{t}'_{v,k} \geq \check{t}_k + R - M(1 - z_{v,0,k}^R) \quad (34)$$

$$\check{t}'_{v,k} \geq \bar{t}_k + R - M(1 - z_{0,v,k}^R) \quad (35)$$

$$\check{t}'_{v,k} \geq \check{t}'_{v_2,k} + R - M(1 - z_{v_2,v,k}^R) \quad (36)$$

$$\check{t}'_{v,k} \geq \hat{t}'_{v_2,k} + R - M(1 - z'_{v_2,v,k}) \quad (37)$$

$$(\check{t}'_{v,k} - R) - \hat{t}'_{v,i} \leq e + M(1 - y_{v,i,j,k}) \quad (38)$$

$$\check{t}'_{v,i} \geq st_h - Mr_{i,h}^s \quad (39)$$

$$\check{t}'_{v,i} \leq st_h + M(1 - r_{i,h}^s) \quad (40)$$

$$\check{t}'_{v,i} \geq et_h - Mr_{i,h}^e \quad (41)$$

$$\check{t}'_{v,i} \geq et_h + M(1 - r_{i,h}^e) \quad (42)$$

$$z_{0,v,k}^R + z_{v,0,k}^R = \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (v,i,j,k) \in P}} y_{v,i,j,k} \quad (43)$$

$$z_{v,v_2,k}^R \leq \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (v,i,j,k) \in P}} y_{v,i,j,k} \quad (44)$$

$$z_{v,v_2,k}^R \leq \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (v_2,i,j,k) \in P}} y_{v_2,i,j,k} \quad (45)$$

$$z_{v,v_2,k}^R + z_{v_2,v,k}^R \leq 1 \quad (46)$$

$$z_{v,v_2,k}^R + z_{v_2,v,k}^R \geq \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (v,i,j,k) \in P}} y_{v,i,j,k} + \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (v_2,i,j,k) \in P}} y_{v_2,i,j,k} - 1 \quad (47)$$

$$z_{0,v,i}^L + z_{v,0,i}^L = \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ (v,i,j,k) \in P}} y_{v,i,j,k} \quad (48)$$

$$z_{v,v_2,i}^L \leq \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ (v,i,j,k) \in P}} y_{v,i,j,k} \quad (49)$$

$$z_{v,v_2,i}^L \leq \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ (v_2,i,j,k) \in P}} y_{v_2,i,j,k} \quad (50)$$

$$z_{v,v_2,i}^L + z_{v_2,v,i}^L \leq 1 \quad (51)$$

$$z_{v,v_2,i}^L + z_{v_2,v,i}^L \geq \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ (v,i,j,k) \in P}} y_{v,i,j,k} + \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ (v_2,i,j,k) \in P}} y_{v_2,i,j,k} - 1 \quad (52)$$

$$z'_{v_2,v,k} \leq \sum_{\substack{l \in C \\ l \neq k}} \sum_{\substack{m \in N_+ \\ (v_2,k,l,m) \in P}} y_{v_2,k,l,m} \quad (53)$$

$$z''_{v_2,v,k} \leq \sum_{\substack{l \in C \\ l \neq k}} \sum_{\substack{m \in N_+ \\ (v,k,l,m) \in P}} y_{v,k,l,m} \quad (54)$$

$$z'_{v_2,v,k} \leq \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (v,i,j,k) \in P}} y_{v,i,j,k} \quad (55)$$

$$z''_{v_2,v,k} \leq \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (v_2,i,j,k) \in P}} y_{v_2,i,j,k} \quad (56)$$

$$z'_{v_2,v,k} + z''_{v_2,v,k} \geq \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (v,i,j,k) \in P}} y_{v,i,j,k} + \sum_{\substack{l \in C \\ l \neq k}} \sum_{\substack{m \in N_+ \\ (v_2,k,l,m) \in P}} y_{v_2,k,l,m} - 1 \quad (57)$$

$$z'_{v_2,v,k} + z''_{v_2,v,k} \leq 1 \quad (58)$$

$$z'_{v_2,v,k} + z'_{v_2,v,k} \leq 1 \quad (59)$$

$$z''_{v_2,v,k} + z''_{v_2,v,k} \leq 1 \quad (60)$$

目的関数 (2) はトラックまたはドローンが配達拠点へ帰還する時間を最小化することを示す。制約式 (3) から (11) は FSTSP のコアモデルである。制約式 (12) から (15) は部分巡回路を除去する制約である。制約式 (16) から (22) はトラック時間の制約、制約式 (23) から (28) はドローン時間の制約を示す。決定変数 $r_{v,i,h}^e$ 及び $r_{v,i,h}^s$ により迂回の有無を決定し、変数 $d_{v,i,j,h}$ により迂回時間を追加する。制約式 (39) から (42) は飛行禁止区域の時間より迂回の有無を決定する。制約式 (43) から (60) は複数ドローンの発射/回収のタイミングを決定する。

2.3 ヒューリスティックアルゴリズム

定式化された問題を数理計画問題として解くと、ノード数が増加するにつれ計算量が膨大となるため、以下のヒューリスティックアルゴリズムを提案する。

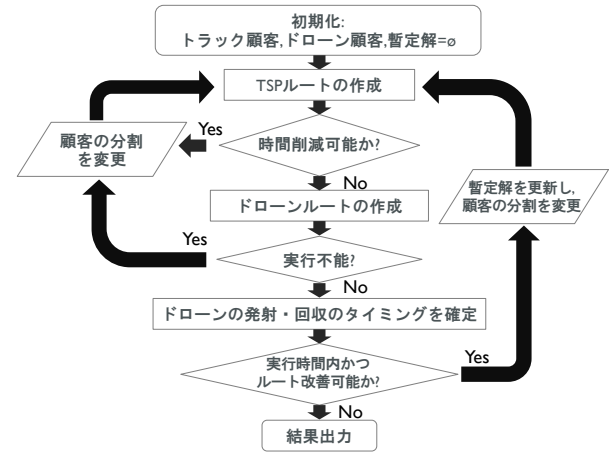


図3 提案ヒューリスティックアルゴリズム

まず、初期化として顧客をトラック顧客とドローン顧客に分割し、トラック顧客のみで TSP ルートを作成する。その後、ドローン顧客をトラック顧客に変更することで配達時間を短縮できるケースが可能か判断し、短縮できるケースが存在しなければトラック顧客を確定する。その後、各ドローンの発射/回収地点を確定し、解が実行可能か判断する。解が実行可能ならば、各ドローンの発射/回収のタイミングを確定する。その時、

ドローンの発射/回収地点の改善が可能ならば、発射/回収地点の変更も行う。この工程を実行時間内でルートが改善されなくなるまで繰り返す。

3 評価実験

提案数理モデル及びヒューリスティックアルゴリズムを定量的に評価するため数値実験を行なった。評価実験の仮想区域として、一辺 10km の正方形領域の範囲内に、1 点の配送拠点ノードと複数点の顧客ノードをランダムに配置した区域を想定する。ドローンの速度は 35km/h で距離をユークリッド距離で計算し、トラックの速度は 17.5km/h で距離をマンハッタン距離で計算する。ドローンの飛行可能最大時間については、Dorling ら [4] の電力消費モデルを元に各顧客の荷物重量毎に算出する。

3.1 提案数理モデルの評価

表 1 数理モデル評価

Model	Obj value	Gap (%)	runtime (sec)
TSP	4454.61	-	-
FSTSP	3827.81	13.90	453.81
mFSTSP	3705.91	16.61	2155.31
FSTSP-ECNZ	3998.31	10.16	287.17
提案モデル	3879.80	12.80	913.22

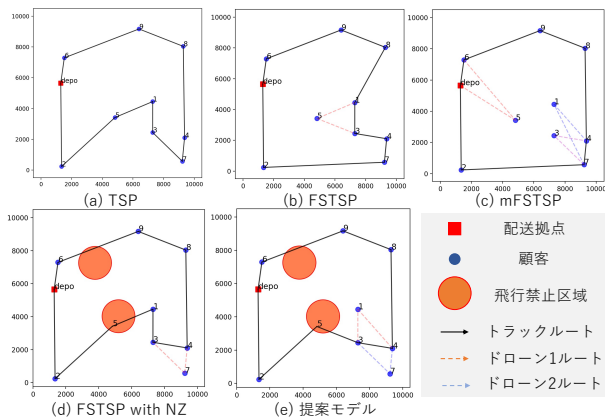


図 4 各モデルの最適ルート

提案数理モデルの評価として、ランダムに生成された顧客数 9 のテストケースを 30 問用いた。表 1 は、各モデルを数理計画問題として解いた場合の計算結果である。mFSTSP は複数台のドローンを考慮したモデルであり、FSTSP-ECNZ は飛行禁止区域を考慮したモデルである。Gap は TSP の最適解と各モデルの最適解との差の割合の平均を示し、runtime は各モデルにより解が算出されるまでの平均実行時間を示す。図 4 に、各モデルの最適ルートを示す。図 4 に示す通り、飛行禁止区域を導入すること及び複数台のドローンの稼働を考慮することで、経路及び目的関数値に明確な違いが生じる。提案モデルは図 4(c)mFSTSP の現実的拡張とも捉えられ、実用化に向けて本提案モデルは有効であると考えられる。

3.2 ヒューリスティックアルゴリズムの評価

ヒューリスティックアルゴリズムの評価として、同様に、ランダムに生成された顧客数 9 のテストケースを 30

表 2 ヒューリスティックアルゴリズム評価

UAVs	Avg. runtime (s)		Gap to MILP (%)		
	MILP	Heuristic	Avg.	Min	Max
1	276.21	1.88	0.78	0.00	11.56
2	595.54	2.08	1.07	0.00	7.73
3	926.14	2.77	1.55	0.00	8.67
4	1686.85	2.97	1.44	0.00	9.93

問用いた。表 2 は、提案数理モデルの最適解とヒューリスティックアルゴリズムによる実行可能解（ヒューリスティック解）とを比較している。UAVs は、トラックが持ち運ぶドローンの数を示し、Avg. runtime は 30 問の平均実行時間、Gap to MILP は数理モデルによる最適解とヒューリスティック解との差の割合を示す。表 2 に示すように、数理モデルの最適解では、ドローンの数を増やすと平均実行時間が急激に増加しているのに対し、ヒューリスティック解では 3 秒以内に解が算出される。また、数理モデルの実行解と誤差は 2%以内となっており、本ヒューリスティックアルゴリズムが有効であることが示唆される。

4 おわりに

本研究は、飛行禁止区域を考慮した 1 台のトラックと複数台のドローンの併用による配送計画問題を新たに定義し、混合整数線形計画問題による数理モデルの定式化及びヒューリスティックアルゴリズムの提案を行なった。また、提案モデルの評価のため数値実験を仮想環境下にて行なった。提案モデルは既存モデルの FSTSP-ECNZ をドローン複数台に拡張したもの、また既存モデルの mFSTSP に飛行禁止区域を導入したものと見なすことができる。今回は、飛行禁止区域の形は円形のみを想定であり、また、時間とともに形が変化することなく固定されていると想定した。今後の課題として、飛行禁止区域が動的に変更される、区域の形を円形以外の形に変更するなど様々な拡張が考えられる。

参考文献

- [1] Chase C. Murray, Amanda G. Chu, "The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery" Transportation Research Part C 54, 86-109,(2015).
- [2] Jeong H.Y., Lee S., Song B.D., "Truck-drone hybrid delivery routing: payload-energy dependency and no-fly zones" International Journal of Production Economics 214, 220-233,(2019).
- [3] Chase C. Murray, Ritwik Raj, "The multiple flying sidekicks traveling salesman problem: Parcel delivery with multiple drones" Transportation Research Part C 110, 368-398,(2020).
- [4] Dorling K., Heinrichs J., Messier G.G., Magierowski S., "Vehicle routing problems for drone delivery" IEEE Trans. Syst. Man. Cybernet.: Systems 47 (1), 70 -85,(2017).