

定期連絡船とドローンを連携させた地域配送システム

01107680 慶應義塾大学 栗田 治 KURITA Osamu

1. 緒言

定期的に航行する旅客船やコンテナ船を基地として離発着する自律制御ドローンによって沿岸部や島嶼部の目的地に物品を配送し回収するシステムを提案する。日本の近海、わけても瀬戸内海の地図などを見ると、こうした船舶の航路が縦横無尽に張り巡らされている。多くのカーフェリーやコンテナ船は比較的に船体が大きいため、若干の設備によってドローンを搭載することが十分に可能であろう。

配送目的地は、例えば本州や四国の沿岸部や島嶼部の集落である。こうした集落には小売店の撤退、高齢化、そして交通網の不備を起因として買い物弱者が居住している場合が多い。そうした住民を船舶&ドローン連携システムによって救うためのアイデアである。

提案する配送システムは、(1) 陸地からドローンを飛ばすよりも飛行時間を抑制できる、(2) 海上を飛行させることによって市街地の安全性を確保できる、(3) 定期連絡船や定期コンテナ船等の寄港地をデポとする物流システムを作成できる、といった特長を持っている。

ドローンを都市・地域計画に活かすための本邦の研究も増えつつある [1, 2, 3, 4]。一方、海外の研究では従来のトラック配送とドローンを組合せた地域配送システムが盛んに研究されている [5, 6]。本研究はこれに類しているが、今回述べる定期連絡船にドローンが“タダ乗り”するタイプのスケジューリング研究は他には見られないようである。

2. 定式化

速さ w で航行する船舶の航路を十分に長い直線と与える。航路の向きを x 軸とする直交座標 (x, y) を設けて、 n 箇所の配送先の座標 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ を与え、配送先の添え字集合を $\Lambda = \{1, 2, \dots, n\}$ とする。ドローンは x 軸上の位置 p で船舶を発進し、 n 箇所の配送・回収を行った上で位置 q で船舶に帰還する (図 1)。ドローンの飛行スピードは v とし ($v > w$ と想定)、各地点での荷下&回収時間を一律に a とする。

ドローンの墜落確率を (そして消費エネルギーを) 最小化するために配送距離 (発進から帰還までの距離) を最小化すべきである。そこで最初の配送先を $i \in \Lambda$ とし、最後の配送先を $j (\neq i) \in \Lambda$ とするとき、メトリックを直線距離として始点が i で終点が j の巡回セールスマン問題 (TSP) を解き、その距離を s_{ij} とする。

ドローンの飛行距離、飛行時間ならびに配送時間を求めると次の通りである：

$$d_{\text{飛行}}(p, q) = \sqrt{(p - x_i)^2 + y_i^2} + s_{ij} + \sqrt{(q - x_j)^2 + y_j^2}, \quad (1)$$

$$t_{\text{飛行}}(p, q) = d_{\text{飛行}}(p, q)/v, \quad (2)$$

$$t_{\text{配送}}(p, q) = t_{\text{飛行}}(p, q) + na. \quad (3)$$

式 (3) では n 箇所の配送に対応して荷下&回収時間が n 回分計上されている。ドローンの配送中に船舶は $q - p$ だけ進むのだから、航行時間は次の通りである：

$$t_{\text{航行}}(p, q) = (q - p)/w. \quad (4)$$

ドローンが船舶に帰還できるためには

$$\tau(p, q) = t_{\text{航行}}(p, q) - t_{\text{配送}}(p, q) \quad (5)$$

と定義するとき $\tau(p, q) \geq 0$ であればよい。 $\tau(p, q)$ はドローンが最後の配送先で荷下&回収を完了した後の発進までの待機時間と解釈できる。ドローン飛行距離最小化問題を次の様に定式化する：

$$\text{Minimize } d_{\text{飛行}}(p, q) \quad (6)$$

$$\text{subject to } \tau(p, q) \geq 0. \quad (7)$$

これは凸計画問題である。制約なしの $d_{\text{飛行}}(p, q)$ の最小解は式 (1) から簡単に $(p_{ij}^*, q_{ij}^*) = (x_i, x_j)$ である。これが実行可能領域の内部にあるためには $\tau(x_i, x_j) > 0$ であればよい。この不等式を等価変形すると次式を得る：

$$w(|y_i| + |y_j| + s_{ij}) < v(x_j - x_i - naw). \quad (8)$$

一方、不等式 (8) が成り立たないときは、等号制約 $\tau(p, q) = 0$ (つまりドローンの待機時間がゼロ) の下でラグランジュ関数

$$L(p, q, \lambda) = d_{\text{飛行}}(p, q) - \lambda \{t_{\text{配送}}(p, q) - t_{\text{航行}}(p, q)\} \quad (9)$$

に基づく最適条件 $\partial L / \partial p = 0$, $\partial L / \partial q = 0$ を吟味すればよい。その結果、ドローンの発進角度と帰還角度 (それぞれ船舶の航路軸とドローンの発進経路ならびに帰還経路がなす角度) が相等しいことが必要条件であることが示される (図 1, 証明略)。 (p, q) の最適解において等発進角・帰還角原理が成立するのである。

そこで、この角度を θ とし ($\theta \in (0, \pi)$ である)

$$z = \cot \theta \quad (10)$$

と定義すれば、発進位置座標 p ならびに帰還位置座標 q を z の関数として書ける (図 1)：

$$p = x_i - |y_i|z, \quad (11)$$

$$q = x_j + |y_j|z. \quad (12)$$

式 (11) と (12) 中の絶対値記号は、2 つの配達先が船舶の航路の左右どちら側にあっても計算が矛盾しない

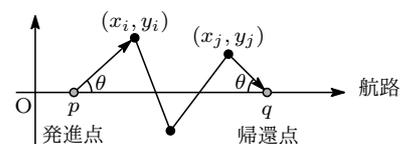


図 1 ドローンの最適飛行経路において成立する等発進角・帰還角原理 (3 箇所巡回配送の例)。

ように付している. この p と q を等号制約式 $\tau(p, q) = 0$ に代入し, これを満たす $z = z_{ij}^*$ を求めた:

$$z_{ij}^* = \frac{vE + w\sqrt{E^2 + (v^2 - w^2)(|y_i| + |y_j|)^2}}{(v^2 - w^2)(|y_i| + |y_j|)}, \quad (13)$$

ただし, 次を定義する:

$$E = ws_{ij} + v(naw + x_i - x_j). \quad (14)$$

z_{ij}^* を式 (11) と (12) の z に代入すれば, 最適な発進・帰還地点の座標 p_{ij}^* と q_{ij}^* を得る.

以上要するに, KKT 条件を満たす最適発進・帰還地点が, 不等式 (8) 成立の是非で場合分けして求められた. この解を式 (1) に代入すれば, “最初の配送地点が i で最後の配送地点が j のとき最適に巡回配送する飛行距離” となる. それを最小化する i と j を求めればよい:

【ドローン飛行距離最小化問題】

$$\text{Minimize } d_{\text{飛行}}(p_{ij}^*, q_{ij}^*) \quad (15)$$

$$i, j \in \Lambda, i \neq j$$

これを解くには, $i \neq j$ なる全ペア (i, j) について調べ, 最小値を与える $(i, j) = (i^*, j^*)$ を求めればよい. 最適な発進点と帰還点は $p = p_{i^*j^*}^*$ と $q = q_{i^*j^*}^*$ である.

特に $n = 2$ の場合は次が成立する (証明は割愛):

【2箇所配送時の最適巡回順序定理】

$n = 2$ のとき, $C_1 = (x_1, y_1)$ と $C_2 = (x_2, y_2)$ を $x_1 \leq x_2$ を満たすように設定して C_1, C_2 の順に配送すれば, ドローンの飛行距離を最小化できる. $x_1 = x_2$ の場合は, 巡回順に依らず飛行距離は同一の値をとる.

3. 数値例

船舶の速さは四国開発フェリーの新居浜港・神戸六甲港を結ぶ『おれんじホープ』を例に取り $w = 28\text{km/h}$ とする. ドローンの速さは米国 Bell 社の電動垂直離着陸 (eVTOL) 機『APT70』の巡航スピードである $v = 120\text{km/h}$ を採用する. この機種は自律型で最大積載量 32kg, 最大飛行距離 40km である.

10km×10km の正方形領域内にランダムに配送地点を n 個発生させ, この領域の中心線を貫く航路を設けた. 幾つかの n に関してドローンの最適配送経路を求めた例を図 2 に示す. ただし, ドローン飛行距離最小化問題を解くためのプログラムを数式処理システム Mathematica Ver. 12.0.0.0 を用いて作成・実行した (TSP は FindShortestTour 関数を用いて解いた).

図 2 の全てで等発進角・帰還角原理が成立しているのがわかる. 図 2 (i) 配送先が 1 箇所の場合, 同原理により配送経路が二等辺三角形形状になる. 図 2 (i)~(iii) では荷下&回収時間を $a = 3$ 分としたことも影響し, 配送箇所の数 n が増えるほどドローンの帰還までの時間が大きい. 図 2 (iii) では不等式 (8) が成立するため, 最終配送先での待機時間 $\tau = 0.47$ 分が発生している. 図 2 (iv) では特に $a = 0$ 分とし, 少し多めの $n = 30$ の例を示した. これは物品の配送ではなく, ドローンが 30 箇所をめぐって地表を撮影し, 何らかの点検を行っているイメージである. 災害時の罹災地の状況確認や, 島嶼部への外敵の侵入から我が国を防衛するための確認を航行中の船舶から行えることを示唆している.

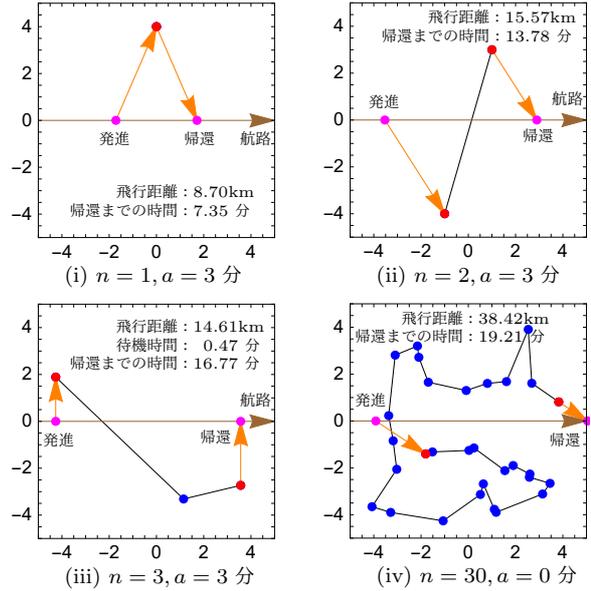


図 2 数値実験 ($w = 28\text{km/h}$ かつ $v = 120\text{km/h}$ であり, 軸の数値の単位は km である).

4. 結語

ドローンの安定した帰還のために, 船舶を停止させる必要があるかもしれない. その場合は, 船舶の停船に要する時間を航行時間に加算した上で制約式を設け, 同様に計算すればよい. また, ドローンが最終配送地点で荷物の回収を終えた時点での船舶の位置と進行方向ベクトルは, 風, 波浪, 潮流等の影響で, 当初の計算による想定からずれる. しかし, その時点でのドローンの帰還経路の再計算は単純な算術で実行できる. 最終的には, ドローンが船舶の近傍に入った段階で, ビコンならびに画像認識システムを援用した帰着が行われることになる. ドローン制御のエンジニアによる, その技術の確立が本システムが成立するための必要条件である. 最後に, 本論文では船舶との連携を考察したが, 鉄道とドローンを連携させれば, 内陸部の僻地に対して同様のサービスを提供できる可能性がある.

参考文献

- [1] 栗田 治 (2018): ドローンによる物品配送サービスの待ち行列モデル, 都市計画論文集, Vol. 53, No. 3, pp. 610–617.
- [2] 栗田 治 (2019): 固定点から線分・円周・円盤上の一様な点への距離分布—直線距離と制約付きドローン距離に基づく整理—, 都市計画論文集, Vol. 54, No. 3, pp. 795–802.
- [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—ドローン配送時代を迎えて—, 都市計画論文集, Vol. 55, No. 3, pp. 400–406.
- [4] 田端祥太, 新井崇俊, 本間健太郎, 今井公太郎 (2020): ランダムドローン網を用いた重み付きシュタイナー問題の発見的解法—大型ドローン航空路網導入に伴う用地補償の最小化—, 都市計画論文集, Vol. 55, No. 3, pp. 459–466.
- [5] Campbell, J.F., D.C. Sweeney II, J. Zhang and D. Pan (2018): Strategic design for delivery with linked transportation assets: tracs and drones, *Technical Report of the Institute for Transportation (InTrans)*, Iowa State University, January 2018.
- [6] Murray, C.C. and A.G. Chu (2015): The flying sidekick travelling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery, *Transportation Research Part C*, Vol. 54, pp. 86–109.