

## 社会受容性に考慮した空飛ぶクルマの経路最適化

小野, 将治  
九州大学

山本, 薫  
九州大学

セメリス, アンドレアス  
九州大学

<https://hdl.handle.net/2324/7340470>

---

出版情報 : Proceedings of the Annual Conference of the Institute of Systems, Control and Information Engineers. 68, 2024. THE INSTITUTE OF SYSTEMS, CONTROL AND INFORMATION ENGINEERS (ISCIE)

バージョン :

権利関係 : © 2024 一般社団法人システム制御情報学会



## 社会受容性に考慮した空飛ぶクルマの経路最適化

### Optimization-based path planning for socially acceptable flying cars

九州大学 ○ 小野将治, 山本薫, Themelis Andreas  
Masaharu Ono, Kaoru Yamamoto and Andreas Themelis  
Kyushu University

**Abstract** Flying cars are expected to enrich life as a new form of mobility. However, various issues regarding social acceptance, such as psychological concerns among residents near flight paths, the impact of noise, and effects on the landscape, exist in the practical implementation. Therefore, in order to implement flying cars into society, it is necessary to design flight paths considering such social acceptance. This paper proposes a new method for designing flight paths and presents its results.

#### 1 はじめに

現在、空飛ぶクルマの社会実装が進められており、渋滞緩和やアクセスが困難な山間部への新たな移動手段、遊覧飛行による観光資源など、様々な社会課題の解決や新たな価値の創造につながる次世代のモビリティとして活躍が期待されている。

その一方、社会実装に向けてはインフラの整備や法整備など、依然解決すべき課題が多く残っている。それらの課題のうち、十分に検討が進められていない課題の一つとして、周辺住民や地域社会へ配慮した航空経路の設計が挙げられる。航空経路の設計においては、単純に出発地と目的地を結んだ最短経路とすればよいわけではなく、経路周辺の住民への配慮や重要文化財周辺等の景観保全など、社会受容を考慮した経路を設計する必要がある [1]。

これまでには、空飛ぶクルマに類似するエアモビリティであるドローン配送の運用に向けて、安全要件や一般市民の受け入れ、騒音条例などの運用上の制約を考慮した経路計画が行われている [2]。また、UAM(都心航空モビリティ)の飛行前と飛行中緊急時の経路計画システムの運用を自動化するフレームワークが提案されている [3]。しかし、文献 [3] については移動時間の最小化やバッテリー量を考慮した経路計画が行われており、空飛ぶクルマの経路計画に関して社会受容性に焦点をあてた研究は十分に行われておらず、空飛ぶクルマの実用化に向けては早急な検討が必要である。

本研究では、このような社会受容性を考慮した航空経路の設計を行うための最適化手法を提案することを目指す。今回は社会受容で考慮すべき要素として、人口密集地や景観形成重要地区を取り上げ、これらの地域に対して適切なペナルティを設けて最適化問題に組み込むことで、最適な経路を生成するフレームワークを提案する。

数値シミュレーションでは実際に長崎で飛行する場合を想定し、長崎県のマップ情報を用いて行う。

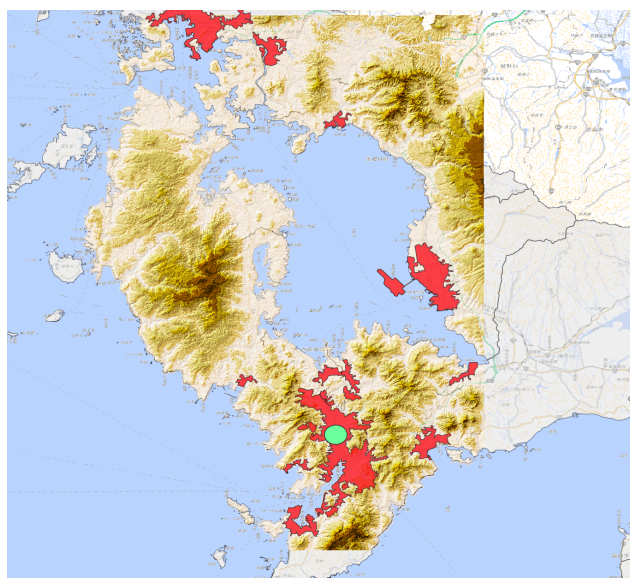


図 1: 長崎のマップ。赤が人口密集地、緑が景観形成重要地区 (平和公園) を表す。

#### 2 問題設定

経路最適化は (飛行距離)+(各領域から受けるペナルティ) を最小化する問題として定式化される。本研究では、社会受容性を考慮して人口密集地と景観形成重要地区 (平和記念公園など) にペナルティを加えることで、該当地域上の航路が選択されにくくする。ただし、飛行禁止区域ではないため、航路として選択される可能性がある。また本稿では、騒音や落下物、墜落時の影響を考慮し、陸上よりも海上を飛行することが望ましいとし、海上が航路として選択されやすくすることを目指す。そのために海にはペナルティを加えず、陸上の空域に適切

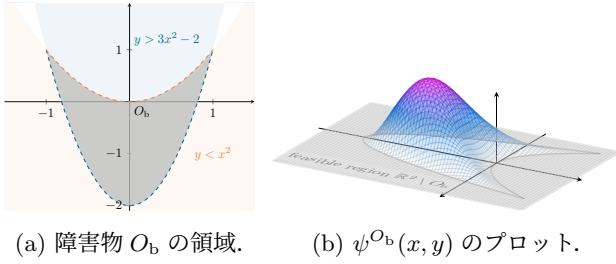


図 2:  $O_b = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : y - 3x^2 + 2 > 0, x^2 - y > 0\}$  で表される領域.

なペナルティを加えるようにする.

## 2.1 領域回避制約の定式化

文献 [4] をもとに、飛行が望ましくない領域や飛行ができない領域を回避するために、それらの領域を障害物と見立てて回避する制約条件の定式化を行う.

障害物の集合を  $\mathcal{O} = \{O_1, O_2, \dots\}$  とする. 各障害物  $O \in \mathcal{O}$  は

$$O = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : h_1^O(x, y) > 0, \dots, h_{N_O}^O(x, y) > 0\}$$

として表される. ここで  $h_i^O(x)$  は障害物  $O$  の  $i$  番目の境界面を表す関数であり, 例えば図 2a のような  $O_b = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : y > 3x^2 - 2, y < x^2\}$  で表される領域  $O_b$  は次のように書き直すことができる.

$$O_b = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : y - 3x^2 + 2 > 0, x^2 - y > 0\}$$

したがって,  $h_1^{O_b}(x, y) = y - 3x^2 - 2$ ,  $h_2^{O_b}(x, y) = x^2 - y$  と表すことができる.

ここで領域  $O$  の外側の領域  $\mathbb{R}^2 \setminus O$  は次のように表される.

$$\mathbb{R}^2 \setminus O = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : h_1^O(x, y) \leq 0 \vee \dots \vee h_{N_O}^O(x, y) \leq 0\} \quad (1)$$

このような不等式で表される領域を等式を用いて書き直す. ここで  $[t]_+ := \max\{t, 0\}$  を考えると,  $h_1^O(x, y) \leq 0$  で表される領域は  $[h_1^O(x, y)]_+ = 0$  と表すことができる. さらに  $[h_1^O(x, y)]_+$  を微分可能な関数として考えるために  $[h_1^O(x, y)]_+^2 = 0$  とすると式 (1) は次のように書き直すことができる.

$$\mathbb{R}^2 \setminus O = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : [h_1^O(x, y)]_+^2 = 0 \vee \dots \vee [h_{N_O}^O(x, y)]_+^2 = 0\} \quad (2)$$

領域  $\mathbb{R}^2 \setminus O$  では  $[h_1^O(x, y)]_+^2, \dots, [h_{N_O}^O(x, y)]_+^2$  の少なくとも一つは 0 である. そのため式 (2) はさらに次のよ

うに書き直すことができる.

$$\mathbb{R}^2 \setminus O = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : [h_1^O(x, y)]_+^2 \dots [h_{N_O}^O(x, y)]_+^2 = 0\}$$

したがって領域  $O$  に対して

$$\psi^O(x, y) := \prod_{i=1}^{N_O} [h_i^O(x, y)]_+^2$$

となる  $\psi^O(x, y)$  を定義する. ここで  $\psi^O(x, y)$  について

$$\psi^O(x, y) \begin{cases} > 0 & ((x, y) \in O) \\ = 0 & ((x, y) \in \mathbb{R}^2 \setminus O) \end{cases}$$

であり,  $\psi^O(x, y)$  の値が大きいほど領域  $\mathbb{R}^2 \setminus O$  から遠ざかっていることを表す.  $O_b = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : y - 3x^2 + 2 > 0, x^2 - y > 0\}$  に対して  $\psi^{O_b}(x, y)$  をプロットしたものを図 2b に示す.

そしてさらに次のような  $\hat{\psi}^O(x, y)$  を定義する.

$$\hat{\psi}^O(x, y) := \frac{\psi^O(x, y)}{\psi^O(\bar{x}^O, \bar{y}^O)}$$

ここで  $(\bar{x}^O, \bar{y}^O)$  は障害物  $O$  の幾何中心であり,  $\psi^O(x, y)$  の最大値を取ると推定される. したがって全ての障害物  $O$  に対して  $\psi^O(\bar{x}^O, \bar{y}^O)$  はおよそ 0 から 1 の間の値を取る. これにより, 領域の大きさによってペナルティの大きさに差が生じることを防ぐ.

$\hat{\psi}^O(x, y)$  を用いて領域  $\mathbb{R}^2 \setminus O$  は最終的に次のように表される.

$$\mathbb{R}^2 \setminus O = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : \hat{\psi}^O(x, y) = 0\} \quad (3)$$

このペナルティ関数  $\hat{\psi}^O(x, y)$  を目的関数に加えることで, 障害物  $O$  を回避するような経路が生成されやすくなる. 障害物  $O_1, O_2, \dots$  に対して, ペナルティ関数  $\hat{\psi}^{O_1}(x, y), \hat{\psi}^{O_2}(x, y), \dots$  をそれぞれ定め, それらを足し合わせた  $\hat{\psi}_o = \sum_{O \in \mathcal{O}} \hat{\psi}^O$  を障害物に対するペナルティ関数として目的関数に加える.

人口密集地, 景観形成重要地区, 陸上の空域に対するペナルティ関数  $\hat{\psi}_p, \hat{\psi}_s, \hat{\psi}_\ell$  も同様に定義される.

## 2.2 最適化問題の定式化

空飛ぶクルマの出発点  $z_0$  と終着点  $z_{N+1}$  の間の  $N$  個の点  $z_1, z_2, \dots, z_N$  について,  $(z_0, z_1, \dots, z_N, z_{N+1})$  によって形成される経路を考える ( $z_i = (x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2$ ). この時, 最適化問題は次のように定式化される.

$$\begin{aligned}
 & \underset{z_1, z_2, \dots, z_N}{\text{minimize}} \quad \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^{N+1} \|\Delta z_i\|^2 + \mu_p \sum_{i=1}^N \hat{\psi}_p(z_i) \right. \\
 & \quad \left. + \mu_s \sum_{i=1}^N \hat{\psi}_s(z_i) + \mu_\ell \sum_{i=1}^N \hat{\psi}_\ell(z_i) \right) \quad (4) \\
 & \text{subject to} \quad \frac{\|\Delta z_i\|}{r_{\max}} \leq \|\Delta z_{i+1}\| \leq r_{\max} \|\Delta z_i\| \\
 & \quad \theta(\Delta z_i, \Delta z_{i+1}) \leq \theta_{\max}
 \end{aligned}$$

ここで  $\Delta z_i = z_i - z_{i-1}$  であり,  $\sum_{i=1}^{N+1} \|\Delta z_i\|^2$  は経路の移動コストに関する項である.  $\|\Delta z_i\|$  が微分不可能であるのに対し,  $\|\Delta z_i\|^2$  は微分可能であり, 問題が単純化することから, この項では  $\|\Delta z_i\|^2$  を用いている.  $\hat{\psi}_p(z_i), \hat{\psi}_s(z_i), \hat{\psi}_\ell(z_i)$  はそれぞれ  $z_i$  に対して人口密集地, 景観形成重要地区, 陸上の空域から与えられるペナルティ,  $\mu_p, \mu_s, \mu_\ell$  は重みである. したがって目的関数は, 移動コストと各領域に対するペナルティの和として表される.

一つ目の制約条件については, 隣接する線分の比率  $r = \frac{\|\Delta z_{i+1}\|}{\|\Delta z_i\|}$  に対して最大比率  $r_{\max} (> 1)$  を設定することで, 図3のような経路が生成されることを防ぐ制約条件である.

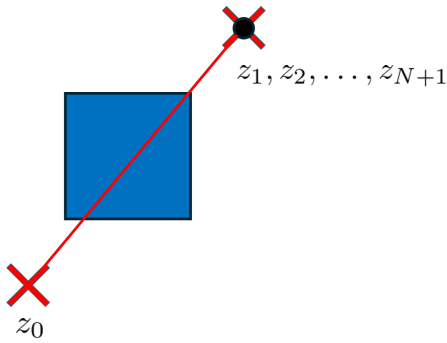


図 3:  $\frac{\|\Delta z_i\|}{r_{\max}} \leq \|\Delta z_{i+1}\| \leq r_{\max} \|\Delta z_i\|$  を設定しない時に生成される望ましくない経路.

そして二つ目の制約条件は, 図4のように隣接する線分のなす角度  $\theta(\Delta z_i, \Delta z_{i+1})$  に対して最大値  $\theta_{\max} (0 \leq \theta_{\max} \leq \pi)$  を設定することで, 急激な方向転換を防ぎ, ジグザグした経路が生成されないようにするための制約条件である.

最適化問題を解いて得られる  $z_1, z_2, \dots, z_N$  は初期軌道によって異なる解が得られる可能性がある. そのため, 初期軌道を数パターン用意し, それぞれの初期軌道に対して式(4)の最適化問題を解き, 得られた各経路の評価値を比較することで最適な経路を選択する.

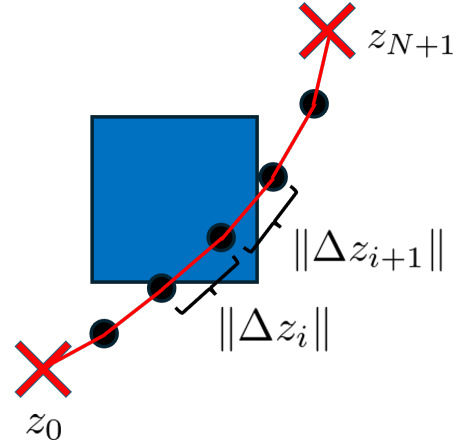


図 4: 隣接する線分.

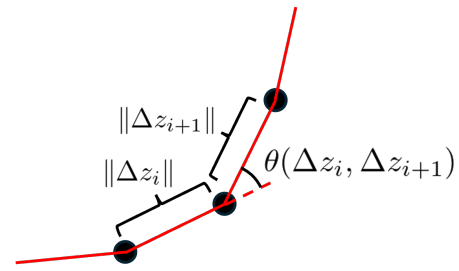


図 5: 隣接する線分のなす角  $\theta(\Delta z_i, \Delta z_{i+1})$ .

### 3 シミュレーション

#### 3.1 シミュレーション条件

シミュレーションは MATLAB を用いて行う. 長崎県の人口密集地や景観形成重要地区などのデータは国土交通省の地理情報データを用いる. 今回マップに反映するデータは人口密集地, 景観形成重要地区, 陸上 (標高データが 0 以上の箇所) である. また出発点と終着点はそれぞれ長崎市内の長崎駅, ハウステンボスに設定する.

各地理データのポリゴンデータをそのまま使用すると計算量が膨大になるため, 今回は近似したポリゴンデータを用いる. 図6に近似後の長崎のマップを示す. ポリゴン同士の辺が重なる部分でペナルティが 0 となるため, 境界面を表す関数  $h(x, y)$  を  $h(x, y) + a$  ( $a \geq 0$ ) と修正することで各領域を拡大し, ペナルティが 0 になることを防ぐ.

今回はポリゴンの数を増やすとシミュレーションにかかる時間が増大する関係から, 飛行禁止領域についてはマップに追加していない. 今後の研究では標高の高い山や空港周辺の上空など, 飛行禁止領域の設定が必要な場所を検討し, マップ情報の追加を行うとともに, データ縮約手法の検討を行う.

各パラメータとシミュレーションで使用する値につい

ては表 1 に示す.

表 1: 各パラメータの説明と値.

| 説明                            | 値       |
|-------------------------------|---------|
| 経路を形成する点の数 $N$                | 20      |
| 人口密集地に対する重み $\mu_p$           | 13      |
| 景観形成重要地区に対する重み $\mu_s$        | 45      |
| 陸上に対する重み $\mu_\ell$           | 4       |
| 隣接線分の最大比率 $r_{\max}$          | 1.1     |
| 隣接線分のなす角度の最大値 $\theta_{\max}$ | $\pi/8$ |
| ペナルティに加える値 $a$                | 1       |

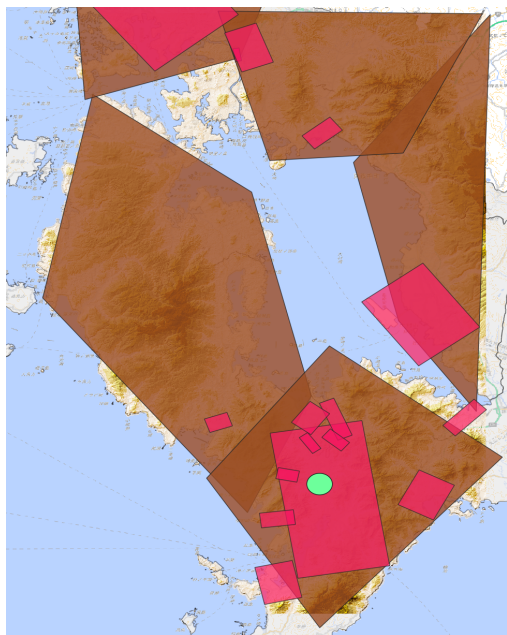


図 6: 近似後の長崎のマップ.

### 3.2 結果

初期軌道を 5 パターン用意し、それぞれに対して式 4 の最適化問題を解いて軌道を生成した結果を図 7 に示す. また, 各軌道の評価値を表 2 に示す. 評価値が低いほどよりコストの低い経路であり, 優れた経路であるとみなすことができる. 図 7 においては赤色の軌道が最も評価値が低い経路である. 生成された結果から, 人口密集地や景観形成重要地区を避けた上で移動距離の短い経路が生成されていることがわかる.

各領域に対するペナルティは  $\mu_p$ ,  $\mu_s$ ,  $\mu_\ell$ ,  $a$  の値を変更することで変化させることができる. 今後は各領域に対するペナルティについて, 移動コストに比べてどの程度のコストをペナルティとして与えるかを検討し, それ

に応じたパラメータの値に調整することが必要だと考えられる.

また, 生成された経路をもとに, どの領域をどの程度考慮するのか実際に運行する観点から検討を行う必要がある.

表 2: 各軌道の評価値.

| 軌道     | 軌道の長さ [km] | 評価値  |
|--------|------------|------|
| パターン 1 | 40.86      | 4.75 |
| パターン 2 | 40.84      | 4.74 |
| パターン 3 | 38.73      | 5.31 |
| パターン 4 | 39.69      | 4.62 |
| パターン 5 | 39.70      | 4.62 |

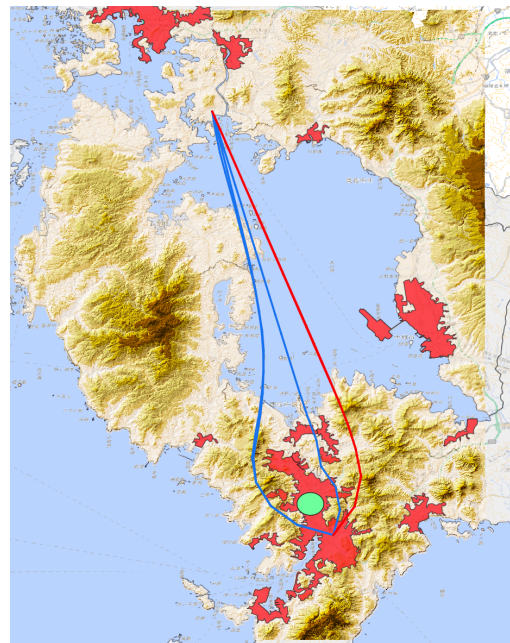


図 7: 生成された軌道. 赤色の軌道が評価値が最も低く, 最適な軌道とみなせる.

## 4 おわりに

空飛ぶクルマの社会実装に向けた経路設計において, 社会受容性を考慮した最適化問題を設定し, 数値例とその結果を示した. 今回の検証では飛行不可能な領域をマップに追加しておらず, 実際の飛行空域や飛行禁止区域を考慮してマップ情報を追加する必要がある. また, 各領域の近似したポリゴンデータは誤差が大きく, 正確な結果が得られないことがあるため, データの近似方法について検討が必要である. そして, 今後は実際に飛行することを想定した場合にどのような経路が最適である

かを検討し、マップ情報やパラメータを改善していく必要がある。

その先の展望としては文献 [5] のように、都市空域設計を考慮してより効率的な経路を生成できるように経路設計手法を改善していくことなどが挙げられる。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 21K17710, JP24K20737, JP24K07546, JST RISTEX JPMJRX21J2 の助成を受けたものである。また、本研究の構想および長崎のマップ作成において、九州大学大学院人間環境学研究院黒瀬武史教授、谷川淳志氏に貴重なご意見をいただいた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] 富士原 大介・真鍋 陸太郎・村山 顕人, 「電動垂直離着陸機 eVTOL の離着陸場配置計画の必要性とその考え方」, 都市計画報告集, 2020, 19 巻, 2 号, p. 144-150.
- [2] X. He, F. He, L. Li, L. Zhang, G. Xiao, “A route network planning method for urban air delivery”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* Volume 166, Oct 2022, 102872.
- [3] S. Kim, C. Harris, C. Y. Justin, and D. Mavris, “Optimal Trajectory and En-Route Contingency Planning for Urban Air Mobility Considering Battery Energy Levels”, *AIAA AVIATION 2022 Forum*, Jun 2022.
- [4] A. Sathya, P. Sopasakis, R. V. Parys, A. Themelis, G. Pipeleers and P. Patrinos, “Embedded nonlinear model predictive control for obstacle avoidance using PANOC”, *2018 European Control Conference (ECC)*, pp. 1523-1528, Jun 2018.
- [5] A. Bauranov, J. Rakas, “Designing airspace for urban air mobility: A review of concepts and approaches”, *Progress in Aerospace Sciences*, Volume 125, August 2021, 100726.