

## 海上監視活動における経路設定問題

02103050 東京工業大学 \*小宮 享 KOMIYA Toru  
01601360 東京工業大学 森 雅夫 MORI Masao

## 1. はじめに

日本周辺海域においては、一般船舶の航路保全・不審船舶の早期発見/対処を目的とする、航空機による海上監視活動が定期的に行われている。この際の基準となる飛行経路の設定に関し、季節的に変動する漁船位置情報や将来位置が予測される船舶の分布に関する情報等が考慮されてこなかった。本研究では、これらの情報を考慮に入れた、限られた飛行時間(距離)内での効率的な飛行基準経路を設定する方法を提案し、モデル例によりその妥当性を検証した。

## 2. 監視経路設定問題のモデル化

航空機により海上船舶を監視する際は、ある与えられた海域で、連続する多数の直線分で構成される基準経路に沿いつつ、航空機自身が搭載するセンサ(レーダ、光学機器等)により発見した目標(船舶であるかはその時点では不明である。)に次々と接近して、最終的に眼で見て確認するという手順で実施される。この際、各目標位置に関する正確な情報は、飛行前情報として予め十分に入手可能ではなく、監視飛行の過程で次第に明らかとなる。従って、目標を次々に巡るという点では、従来から経路設定問題として深く研究されている巡回セールスマン問題(Travelling Salesman Problem; TSP)と類似しているが、航空機の運行途中で目標が発見され、その位置(ノード)情報が順次取得されるという点で一般的なTSPとは様子が異なる。

このように、運行前のノード位置に関する確定的な情報が与えられていない本問題を扱う際の考え方として、対象海域の各点での船舶が存在する確率密度を利用し基準経路を構成していくことを考える。これは、監視飛行が定期的に行われ、その運用サイクルに比し船舶の航行変位量が小さく、次の同じ海域での監視飛行での前回確認した船舶の推移位置をある程度予想できることから、監視飛行のつど把握する船舶位置情報を蓄積し、次回以降の監視飛行においてその情報を密度分布図として反映させようとする考え方である。

この船舶密度分布と航空機のセンサ範囲内での発見確率との積から海上の各点に対する期待発見隻数(密度)が求まり、これを飛行経路(区分的に直線)に沿って積分することで、1飛行あたりの期待発見隻数が求められる。これを目的関数とし、その最大化するように基準経路を構成する端点を移動させる問題として定式化した。ただし、1飛行あたりの飛行可能上限距離  $L$  が制約条件となる。

船舶密度  $d(x, y)$  は、各船舶期待位置を中心とした2次元正規密度関数の和として与える。航空機からの発見確率  $g(x, y)$  は、光学的センサの特性を反映した、航空機と目標との距離の3乗に逆比例する性質(逆3乗法則)を仮定する。この法則下で、 $g(x, y)$  は、経路から目標までの距離(横距離)  $l$  のみの関数  $g(l(x, y))$  となる。以上より、[監視経路設定問題] は、以下のように定式化される。

$$\text{最大化} \quad I(X) = \int \int_V d(x, y)g(x, y) dx dy = \max_{x_i, y_i} \sum_{i=1}^n \int \int_{V_i} d(x, y)g(l(x, y, x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1})) dx dy$$

$$\text{制約条件} \quad \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} \leq L$$

$$\text{ただし} \quad X = (x_1, y_1, \dots, x_n, y_n)$$

$$g(l(x, y, x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1})) = 1 - \exp\left(-\frac{2ch}{l^2 w} \cdot \frac{\sqrt{R^2 - l^2}}{R}\right)$$

$$l(x, y, x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1}) = \frac{|(x_{i+1} - x_i)(y - y_i) - (y_{i+1} - y_i)(x - x_i)|}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}$$

$$(i = 1, \dots, n \quad ; \quad n \text{ は飛行経路を構成する端点の数})$$

$$d(x, y) = \sum_{j=1}^{n'} h_j(x, y) \quad \left( h_j(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x-\alpha_j}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{y-\beta_j}{\sigma_2}\right)^2\right]} \right)$$

$$((\alpha_j, \beta_j) \quad ; \quad \text{一定時間後の予想船舶中心位置の}(x, y)\text{座標})$$

$$(j = 1, \dots, n' \quad ; \quad n' \text{ は対象海域に存在する予想船舶数})$$

### 3. 監視経路設定問題の解法

【監視経路設定問題】の目的関数  $I(X)$  は、複雑な形状をしており、凸性が一般的に保証されないため、基本的な降下法に頼らざるを得ない。この際、制約付き最大化問題の解法である拡大ラグランジュ関数法を利用しアルゴリズムを構築した。

### 4. 数値実験

モデル経路 ( $n = 13, n' = 54$  の場合) による計算例について示す。予想船舶位置に近接し、距離上限 (+ 収束判定量) である 11100 以下の経路が得られていることがわかる。計算時間に関しても十分実用的な範囲に収まっている。

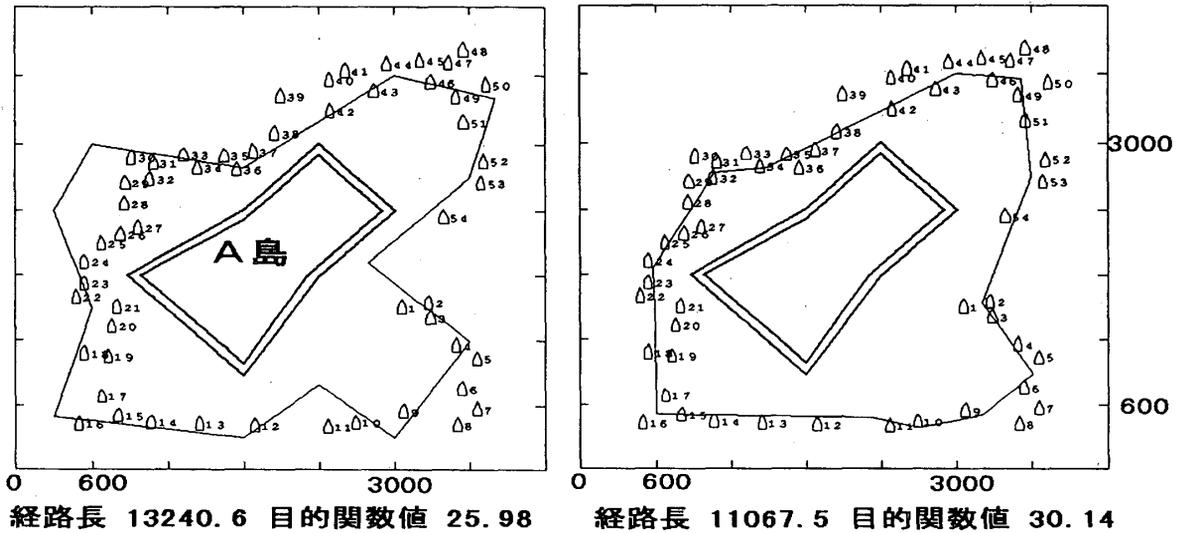


図 1: 初期経路と改良された経路

表 1: 平均計算時間 (単位: 秒)

$n$	$n'$			
	54	108	162	216
13	9.294	17.485	26.155	35.323
26	16.266	32.938	45.788	65.321
52	25.098	52.706	70.162	95.985
104	49.331	99.828	143.208	198.796

### 5. まとめ

本論文では、海上監視活動における効率的な経路設定方法として、航空機からの期待発見隻数を最大化するように基準経路を移動させる方法を提案し、数量的な検討を加えた。海上監視における基準経路の決定に際し、従来にない数量的な視点が持ち込まれたという点において、本研究は新しい研究である。また、数量的な検討の結果、初期設定した経路に比し、予想船舶位置に近接する経路が構成されていることから、今回提案した方法の考え方の妥当性・有効性が示された。

## 参考文献

- [1] Abramowitz, M. and Stegun, I.A. (eds.) *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover, New York., 1964.
- [2] 今野 浩、山下 浩. 「非線形計画法」, 日科技連., 1978.
- [3] 岡部篤行、鈴木敦夫. 「最適配置の数理」, 朝倉書店., 1992.
- [4] Silverman, B.W. *Density Estimation for Statistical and Data Analysis*. Chapman and Hall, London., 1986.
- [5] 多田和夫. 「探索理論」, 日科技連., 1973.