

監視経路設定問題における対象船舶分割による局所解について

01110110 東京工業大学 *小宮 享 KOMIYA Toru

01601360 東京工業大学 森 雅夫 MORI Masao

1. 監視経路設定問題とこれまでの経緯

船舶の航路保全や不審船舶の早期発見/対処を目的とした航空機による海上監視活動が、日本周辺海域において定期的に実施されている。監視活動は、連続的な線分経路により構成される基準飛行経路に沿いつつ飛行することで実施される。我々はこれまでに運用の効率化を図る目的で、この基準経路を設定する問題(監視経路設定問題)を提案してきている[1]。[監視経路設定問題]は、以下のように定式化される。

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

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

$$\text{ただし} \quad X = (x_1, y_1, \dots, x_n, y_n) \in \mathbf{R}^{2n}$$

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

$((\alpha_j, \beta_j)$; 監視時点の船舶の予想位置の (x, y) 座標)

$(j = 1, \dots, m$; m は対象海域に存在する予想船舶数)

$$g(l(x, y, x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1})) = 1 - \exp\left(-k \cdot \frac{\sqrt{R^2 - l^2}}{Rl^2}\right) \quad (0 < l \leq R; k \text{ は正定数})$$

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

$(i = 1, \dots, n$; n は飛行経路を構成する端点の数)

この問題の従来の解法は、所与の初期経路から始めて、基準経路の沿って飛行する際の海上に発見する船舶数(期待値)を最大化するように端点列 X を連続的に変化させるものである。対象海域の船舶存在密度 $d(x, y)$ は飛行開始前に既知であるとし、経路に沿って飛行する際の発見事象が生起する確率 $g(l(x, y, x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1}))$ との積を、搜索センサのレンジ R 内の領域 V_i で積分することで、局所領域における期待発見船舶数を求める。このとき、個々の端点は、局所的な期待発見船舶数を最大化するように移動させる以外、特に制約を課さなかったため、船舶密度が比較的高い領域に複数の端点が集中しがちとなり、期待発見船舶数は増加するものの、その付近で端点が振動したり、ループ状の局所経路を構成したりして、実際の運用に適さない経路を構成してしまうという問題が生じていた。

本研究では、端点の移動に関与する船舶を絞り込むことで上記の問題の発生を抑制し、実際の運用により適した経路の構成を目指した。

2. 対象船舶分割による局所最適化

区分的な線分経路の端点を決定する要因は、各区分経路の近傍に存在する船舶(密度)であり、各区分経路からはるか彼方に存在する船舶は、決定すべき端点を移動させる要因として作用しないと考えられる。これより、対象海域に存在する船舶を最寄りの部分経路を含む領域(線分 Voronoi 領域)に分割し、各領域内で、それらの船舶により端点を局所最適化して経路を得ることで、端点の集中等の問題の発生を抑制することを考えた。以下にアルゴリズムを示す。基本的な部分は従来の Newton 法と同じであるが、線分 Voronoi 領域とその中に含まれる矩形領域を基準として局所的な目的関数値や偏導関数値を扱っている点が従来と異なる。

[アルゴリズム]

step1

対象領域に n 端点で構成される初期経路を設定する。

step2

反復パラメータ $k = 1$; 各船舶を端点列の線分 Voronoi 領域に分割する。

step3

$i = 1, \dots, n$; 線分 $(x_i^{(k)}, y_i^{(k)})(x_{i+1}^{(k)}, y_{i+1}^{(k)})$ と船舶中心座標 $(\alpha_j, \beta_j); j = 1, \dots, m$ との距離を測り R 以下ならば矩形領域 $V_i^{(k)}$ ごとに目的関数値を計算する。

step4

$i = 1, \dots, n$; 線分 $(x_i^{(k)}, y_i^{(k)})(x_{i+1}^{(k)}, y_{i+1}^{(k)})$ Voronoi 領域に分割された船舶に関し、端点 $(x_i^{(k)}, y_i^{(k)}), (x_{i+1}^{(k)}, y_{i+1}^{(k)})$ を移動させるための 1.2 階偏導関数値を $V_i^{(k)}$ でそれぞれ計算し、移動方向を決定する。移動幅の上限を近傍の船舶を含む領域に制限し、ラインサーチにより新しい点を決定する。

step5

終了条件が満たされているか判定する。満たされていれば端点列を出力し終了する。そうでなければ、 $k = k + 1$ とし step2 に戻る。

3. ヒューリスティクスによる局所経路決定方法

発見確率 $g(l(x, y, x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1}))$ は l^2 の関数であることから、経路の両側で対称であり、かつ単調減少関数でもある。従って、個々の船舶密度に対し、経路からの距離 l が小さいほど、1 隻あたりの期待発見船舶数は増大することが見込める。ここでは、区分的な線分経路の決定に関して、局所的な経路長の延伸を抑えつつ、分割領域内の個々の船舶までの l^2 の和を最小化するヒューリスティックな端点の決定方法を提案する。

4. 数値実験

モデル経路 ($n = 26, m = 54$ の場合) による計算例について示す。局所 Newton 法、ヒューリスティクスいずれでも実際の運用に適した基準経路が得られていることがわかる。端点数を変化させたいくつかの計算例より、期待発見船舶数は、一般に局所 Newton 法による値の方がヒューリスティクスでの値よりも大きい。これは、分割した船舶に対し、各端点が細かく移動した(追従した)ためと考えられる。そのため、経路長も局所 Newton 法による場合の方が長くなる傾向にある。ヒューリスティクスでは、端点が分割された船舶の平均的な位置に配置されるために、端点数が少ない例では、経路が滑らかになる反面、期待発見船舶数は局所 Newton 法に比し少ない。計算時間に関しては、局所 Newton 法はヒューリスティクスの 5 倍以上の時間を要する。

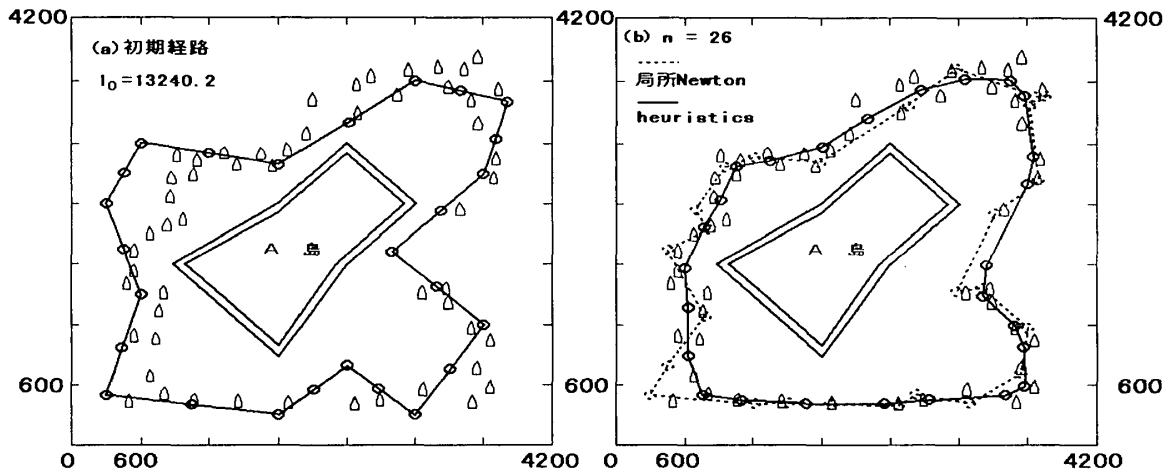


図 1: (a) 初期経路と (b) $n=26$ の場合の改良経路

表 1: 端点数の変化の影響 (計算時間の単位: 秒/反復、 obj_0 は初期経路での発見隻数)

	$(n, obj_0) = (13, 21.55)$		$(n, obj_0) = (26, 21.47)$		$(n, obj_0) = (52, 21.25)$	
	局所 Newton	heuristics	局所 Newton	heuristics	局所 Newton	heuristics
発見隻数	27.19	20.64	28.63	26.06	30.31	30.14
経路長	12095.7	10095.5	12882.9	11111.0	13253.0	12401.3
計算時間	3.26	0.39	2.41	0.62	2.79	1.05

5. まとめ

監視経路設定問題で、分割した船舶に対し、局所的な Newton 法及びヒューリスティクスを適用し経路を構築した。いずれの方法とも、一長一短があるものの、従来で構築される経路で問題となっていた局所的な端点の集中や経路の交差が除かれ、実用的な経路が構成されるようになった。

参考文献

[1] 小宮享, 森雅夫: 海上監視活動における経路設定問題. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 41 (1998) 455-468