

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

小宮 享 森 雅夫
東京工業大学

(受理 1998 年 8 月 7 日 ; 再受理 1999 年 2 月 15 日)

和文概要 我が国周辺を航行する一般船舶の航路保全及び不審船舶の早期発見/対処を目的とした、航空機による監視活動を実施する際の基準となる経路を局所最適化手法により効率的に設定する方法を、私たちはこれまで提案してきた。この方法では、予め設定した初期経路から始めて、対象領域に存在する全船舶を対象として経路を構成する各端点を移動して経路を更新していくために、船舶が比較的高密度に存在する部分領域へ端点が集中したり、その付近での期待発見船舶数を過剰に計上してしまう等の問題があった。本論文では、対象海域の船舶を分割し、各端点の移動に関わる船舶を制限した局所最適化の手法を提案し、それにより経路を構成している。さらに分割した船舶に対し、基準経路に沿って飛行する際の海上に船舶を発見する確率の対称性を利用したヒューリスティックスによる経路の決定方法を提案している。これらのいずれの方法でも、高密度領域への端点の集中が解消され、実運用に適した経路が構成される。

1. 監視経路設定問題の概要と問題点

我が国周辺海域において、一般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海上自衛隊により定期的に行われている。監視活動は、ある与えられた海域上で連続する線分により構成される基準経路に沿いつつ飛行し、航空機が搭載するセンサにより順次発見する目標に接近し、目で見て確認するという手順で行われる。監視対象となる目標(船舶)は、監視飛行中でも時事刻々と移動するために、たとえ飛行開始時に、個々の目標の正確な位置情報が入手できたとしても、移動する目標を順次巡るような経路を、例えば、巡回セールスマン問題の解法のような組み合わせ的手法を利用して設定することは困難であり、何らかの他の手段に頼らざるを得ない。

こうした環境条件に対し、監視業務における運用の効率化(経路の短縮や発見目標数の向上等)を目指した、監視基準経路の設定方法が小宮ら [2] によって提案されている。この方法では、個々の目標の正確な位置情報が利用できないものの、監視飛行が定期的に行われていることや漁場の季節的変動や航路帯がほぼ決まっていることから、対象海域での船舶分布はある程度予測可能であり、そこでの船舶密度情報は飛行開始前に利用可能であるとして、対象海域において発見する船舶の期待数を最大化するように基準経路を設定する方法を提案している。基準経路を構成する区分的な線分経路に沿って飛行する際に、発見事象が生起する領域内(経路の両側の発見センサのレンジ内)で海上の船舶密度関数と経路からの発見確率との積を積分し、各線分経路を含む領域での発見確率の和(=期待発見船舶数)を求め、それらの合計(1飛行あたり期待発見船舶数=目的関数値)を最大化するように各部分経路を構成する端点を再配置する考え方(監視経路設定問題)を示し、モデル例により数値実験をし、その有効性を確認している。

従来の監視経路設定問題では、対象海域での船舶密度を個々の予想船舶位置を中心とし、位置誤差に依存した(対象領域全体に広がる)連続関数の和により表現し、経路を構成する各端点の移動は、この連続関数により引き起こされるとして検討してきた。しかしこのような密度場内で、端点を領域全体で自由に振り舞わせると、船舶密度が高い部分領域に複数の端点が集中しがちとなり、場合によっては局所的に経路が交差してしまい、実際の運用に適さない経路が構成されてしまうという弊害が生じていた。また、位置誤差が小さい場合の船舶分布に対しては、そうした端点の集中領域で、本来存在する船舶数以上の船舶を“発見”してしまうという過剰計上も問題となっていた。

本研究は、これらの問題点に対し、個々の端点の移動に関与する船舶を絞り込み、端点の集中や局所閉経路の発生を抑えた、実際に運用しやすい経路を構成することを目指すものである。区分的な線分経路の端点を決定する要因は、各区分経路近傍に存在する船舶(密度関数)であり、各区分経路からはるか彼方に存在する船舶は、決定すべき区分経路の端点を移動させる要因としては大きく作用しないと考えられる。このことから、対象領域に存在する船舶を最寄りの部分経路を含む領域に分割し、それらの領域ごとに割り振られた船舶により端点を局所最適化するという操作を反復的に実施して得られる経路について検討する。さらに分割された船舶に対して、区分的経路に沿って飛行する際の航空機からの発見確率の対称性に着目した局所的な経路長を延ばさないようにしつつ目的関数値を増大させるヒューリスティックな経路構成方法も提案し、局所最適化手法で得られる経路と比較する。

本論文は以下の順序で構成される。2節では、個々の船舶が分割される局所領域について定義し、各領域内の導関数値・目的関数値を計算する様子及び船舶を分割するときの局所最適化のアルゴリズムを示す。3節では、ヒューリスティックな手法により端点を移動し経路を得る方法を提案する。4節では、前論文[2]の手法により得られる経路と2・3節で提案した方法により得られる経路とを比較検討する。

2. 局所領域と分割船舶に対する局所最適化アルゴリズム

2.1. 監視経路設定問題の概要

これまでに提案されている[監視経路設定問題]は(2.1)-(2.4)のように定式化される。まず、対象海域 V に初期基準経路を設定し、対象海域における1監視飛行あたりの期待発見船舶数を最大化するように、反復的に基準経路を構成する端点列 X を移動させ基準経路を得ている。1監視飛行あたりの期待発見船舶数は、対象海域での船舶分布を $d(x, y)$ 、基準経路を飛行する飛行機からの発見確率を $g(x, y)$ とすると、(2.1)式のようにそれらの積を対象海域全体で積分して得られるが、基準経路を飛行する際に実際に発見船舶数を計上する領域が、各区分線分経路の両側に発見センサレンジ R の幅で広がった帯状の矩形領域 V_i であることから、目的関数値は、近似的に、各 V_i での期待発見船舶数の和に等しいとして(2.2)式により求めた。(この際、各 V_i の両端にある、各端点を中心とする半円形領域での目的関数値や導関数値の計算は影響量が小さいと考え無視した。また、その付近での矩形領域 $V_i, V_{i\pm 1}$ の重なりによる目的関数値・導関数値の過剰計上も同様に無視した。)

(2.2)式の見発見確率 $g(l(x, y, x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1}))$ は、基準経路を構成する各線分の端点座標を順に (x_i, y_i) ($i = 1, \dots, n$) としたとき、 $(x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1})$ を端点とする区分線分経路を飛行する際の点 (x, y) に対する発見確率である。

$d(x, y)$ は、飛行前に推測される個々の船舶の存在密度関数(中心位置 (α_j, β_j) , 位置偏差 (σ_x, σ_y)) $h_j(x, y)$ の和として(2.3)式のように与えられる。

海上での目標発見事象が光学センサにより生じる場合、飛行機からの瞬間探知確率密度が観測者と目標の距離の3乗に逆比例するという光学センサの特徴を反映した経験法則(逆3乗法則)がよく当てはまり、この条件下で直線分経路に沿って飛行する際の発見確率は、 k を正定数、線分経路から (x, y) までの最短距離を l とすると、(2.4)式のような l のみに依存した形で表現される。

端点数 n 及びその座標は飛行計画立案時に任意に設定可能であるが、監視飛行実施時には、計画案で決定した基準経路に沿いつつ監視業務を行っていくので、多数の端点を想定した細々とした基準経路を作成することは、運用者に負担を強いることになるので得策ではない。海域によっても異なるが、通常は、 n の上限として20～30程度の端点が設定されている。また、監視経路は閉経路とし、閉経路の条件として、 $(x_{n+1}, y_{n+1}) = (x_1, y_1)$ とする。搭載燃料の制約から、飛行可能距離は有限であり、運用上も無用な距離を飛行することは省きたいが、多少の経路長の増減が問題となることはないので、前論文[2]とは異なり、以下の検討では明示的な距離制約は課さないとした。

[監視経路設定問題]

$$\text{最大化 } I(X) = \int \int_V d(x, y)g(x, y) dx dy \quad (2.1)$$

$$\approx \sum_{i=1}^n \int \int_{V_i} d(x, y)g(l(x, y, x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1})) dx dy \quad (2.2)$$

ただし

$$X = (x_1, y_1, \dots, x_n, y_n)$$

$$d(x, y) = \sum_{j=1}^m h_j(x, y) \quad (j = 1, \dots, m; m \text{ は対象海域に存在する予想船舶数}) \quad (2.3)$$

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

$$g(l(x, y, x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1})) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-k \cdot \frac{\sqrt{R^2 - l^2}}{Rl^2}\right) & (0 < l \leq R \text{ のとき}) \\ 1 & (l = 0 \text{ のとき}) \\ 0 & (l > R \text{ のとき}) \end{cases} \quad (2.4)$$

$$l(x, y, x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1}) = \begin{cases} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \\ ((x_{i+1} - x_i)(x_i - x) + (y_{i+1} - y_i)(y_i - y) \geq 0 \text{ のとき}) \\ \sqrt{(x - x_{i+1})^2 + (y - y_{i+1})^2} \\ ((x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x) + (y_{i+1} - y_i)(y_{i+1} - y) \leq 0 \text{ のとき}) \\ \frac{|(x_{i+1} - x_i)(y - y_i) - (y_{i+1} - y_i)(x - x_i)|}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}} \\ (\text{それ以外のとき}) \end{cases}$$

2.2. 局所領域の定義と局所最適化アルゴリズム

これまでに研究されている平面内での移動施設の最適配置を決定する地理的最適化問題では、対象領域に分布している既存の需要点(=顧客)を、施設を配置すべき候補の点のVoronoi領域に分割し、各領域ごとにその中の需要点に対する目的関数値の極大化を実施し領域ごとの施設の最適位置を決定し、それら分割領域を再度まとめることで平面全体での最適配置(及び全目的関数)を得るという方法が採用されている[5]。

従来の [監視経路設定問題] の解法では, V 全体に広がる $d(x, y)$ に対し, Newton 法による各端点の局所最適化を反復的に行っていたために, 端点が次第に船舶高密度領域に集中する等の問題が生じていたと考えられる. 以下ではそれら問題の発生を防ぐために, 端点の移動に関し, 平面内での移動施設の最適配置の考え方を踏襲して, 対象海域の船舶を分割し, 各分割領域内での端点位置の最適化を図り, より期待発見船舶数の大きな基準経路を反復的に構成していく方法を順を追って説明する.

1 対象となる海域に n 端点で構成される初期経路を与え, 各端点の移動を反復的に実施し, これまでに ν 回の反復が終了している状況を考える. このとき, 図1のような連続する4端点 $(x_{i-2}^\nu, y_{i-2}^\nu), (x_{i-1}^\nu, y_{i-1}^\nu), (x_i^\nu, y_i^\nu), (x_{i+1}^\nu, y_{i+1}^\nu)$ で構成される部分経路と, その近傍の船舶に関し, 新たな端点位置 $(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1})$ を決定するための船舶の分割及びそれら船舶による目的関数値・偏導関数値の計算方法を説明する. $(x_{i-1}^\nu, y_{i-1}^\nu), (x_i^\nu, y_i^\nu)$ を2端点とする線分を中心線に含み両側に R で広がる矩形領域を V_{i-1}^ν , $(x_i^\nu, y_i^\nu), (x_{i+1}^\nu, y_{i+1}^\nu)$ を2端点とする矩形領域を V_i^ν とする.

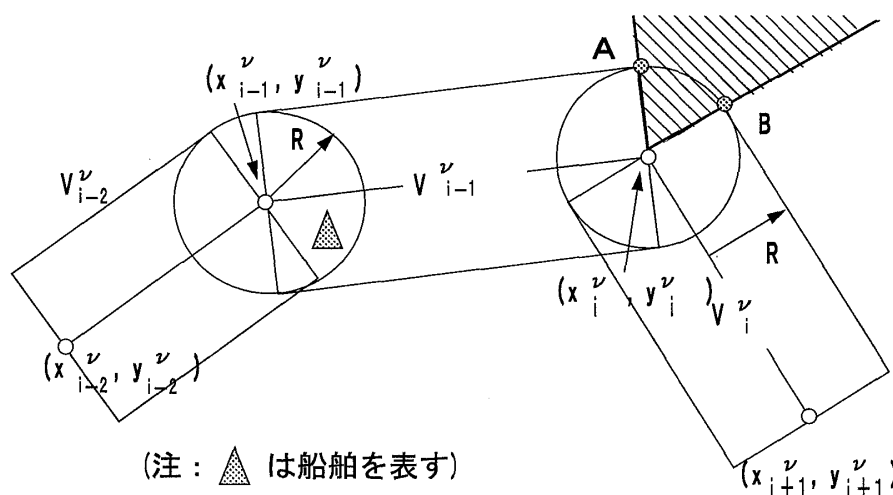


図1 : 目的関数値・導関数値を計算する領域

2 まず, 近傍の船舶を基準経路を構成する各線分の Voronoi 領域に分割する. (領域 i に対し船舶番号 j を記憶する.) このとき, 各端点に接する, 前後の線分経路から見て凸となる領域 (図1の (x_i^ν, y_i^ν) に関しては折れ線 $A(x_{i-1}^\nu, y_{i-1}^\nu)B$ で区切られる斜線部分) 内の点は, 前後の線分が交差する端点から等距離になるために, 前後いずれの線分 Voronoi 領域に属するか定義の仕方により判断が分かれるが, このような領域に位置する船舶も前後いずれかの領域に記憶させる. こうした, 各領域への個々の船舶の分割は, 反復ごとに更新される.

3 次に, ある1つの線分 (例えば線分 $(x_{i-1}^\nu, y_{i-1}^\nu)(x_i^\nu, y_i^\nu)$) と各船舶中心位置 (α_j, β_j) との距離を測り, その値が R 以下であるとき, その線分を飛行する際に発見事象が生起すると考えて, その線分を中心線として含む矩形領域 (V_{i-1}^ν) で期待発見船舶数

$$\int \int_{V_{i-1}^\nu} h_j(x, y) g(l(x, y, x_{i-1}^\nu, y_{i-1}^\nu, x_i^\nu, y_i^\nu)) dx dy \quad (2.5)$$

を数値計算により求める. ここで数値計算を実行する際, 参考文献 [1] の近似式を採用する都合により, 端点の外側の半円形領域での計算は参考文献 [2] 同様に省略した. こうした, 個々の船舶に対する期待発見船舶数の計算を, 各線分経路で順次行うことにより, 1 飛行あたりの期待発見船舶数が求まる.

従来の研究では、目的関数値の計算に $d(x, y)$ を採用していたことで、各領域で全船舶の密度関数で期待発見船舶数を計算していたことになる。すなわち、1隻あたり n 領域で“発見”隻数を累計していたことになり、これが目的関数値の過剰見積りの一因になっていたと考えられる。目的関数値の計算基準を上記のように改訂することで、目的関数値を計算する領域 V_i の数が大幅に削減され、適切な目的関数値の計上がなされることが考えられる。(図1の位置の船舶に対しては、領域 V_{i-1}^{ν} で目的関数値を計算するとともに V_{i-2}^{ν} からも R 以内の距離ゆえ、 V_{i-2}^{ν} でも目的関数値を計上する。)

さらに、船舶位置偏差 (σ_x, σ_y) が小さい場合は、1つの船舶に対し各矩形領域で計算される期待発見隻数が大きくなり、複数の矩形領域からの期待発見船舶数の和が1を超えてしまうような現象も発生しうる。この場合は、その船舶の期待発見隻数の上限を1として期待発見船舶数の適正化を図った。

4 端点 (x_i^{ν}, y_i^{ν}) の新たな位置 $(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1})$ を決定するために局所的な Newton 法を採用する。 (x_i^{ν}, y_i^{ν}) を移動させるために、その前後の矩形領域 V_{i-1}^{ν}, V_i^{ν} での1階・2階偏導関数値をそれぞれ計算し、それらの合計値を端点 (x_i^{ν}, y_i^{ν}) の導関数値とする。このとき、各矩形領域で計算する際の対象となる船舶は、最初に線分 Voronoi 領域に分割された船舶であり、船舶中心位置 (α_j, β_j) が前後いずれかの矩形領域内に存在しなくとも、その密度関数のその部分が矩形領域に寄与しているとして、矩形領域で導関数値を求めた。

目的関数値を矩形領域内と端点から R 以内に中心位置がある船舶に対し計算しているのに対し、導関数値は、線分 Voronoi 領域に分割された船舶を対象としていることから、導関数値は近傍の船舶に対し広く計算することで移動可能な領域を広く見ているのに対し、目的関数値は、線分経路から R 以内の領域に限定して計算しているといえる。

5 偏導関数値が求まり移動方向が決定した後は、端点の前後の2線分の Voronoi 領域に割り当てられた船舶に対し、黄金比によるラインサーチを行い、新たな位置 $(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1})$ を決定する。

6 このような操作を反復し、各分割領域で求まる期待発見船舶数の合計値を増大させるように基準経路を構成する端点を順次移動させるが、船舶の分割が反復の都度発生するために、端点の安定な配置に至るまで多数の反復を要することが予想される。そこで適当な反復回数、あるいは反復ごとの各端点の移動量が小さくなったと判断されるときをアルゴリズムの終了条件とする。

上述の説明をまとめた局所 Newton 法アルゴリズムを以下に示す。

[アルゴリズム]

step1 : 初期設定

対象領域に n 端点で構成される初期経路を設定する。

step2 : 船舶の分割

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

step3 : 目的関数値の計算

$i = 1, \dots, n$; 線分 $(x_i^{\nu}, y_i^{\nu})(x_{i+1}^{\nu}, y_{i+1}^{\nu})$ と船舶中心座標 (α_j, β_j) ; $j = 1, \dots, m$ との距離を測り R 以下なら V_i^{ν} ごとに目的関数値を計算し、各矩形領域からの期待発見船舶数の合計を1を上限として求める。

step4 : 偏導関数値の計算

$i = 1, \dots, n$; step2 で線分 Voronoi 領域に分割された船舶に対する矩形領域での偏導関数

値を計算する．端点 (x_i^ν, y_i^ν) を移動させるためには V_{i-1}^ν, V_i^ν での 1 階・2 階偏導関数値が必要である．

step5 : ラインサーチによる端点の更新

$i = 1, \dots, n$; step4 で求めた各導関数値により移動方向を決定し，端点の前後の線分 Voronoi 領域に分割された船舶に対し黄金比によるラインサーチを行い，新しい端点位置を決定する．

step6 : 終了判定

終了判定基準と比較し，条件を満たす場合はアルゴリズムを停止し，それまでに得られている端点列 $X^{\nu+1}$ を出力する．条件が満たされない場合は， $\nu = \nu + 1$ とし step2 に戻る．

従来の距離制約がない Newton 法アルゴリズムと異なるポイントは，step2 で対象船舶を線分 Voronoi 領域に分割し各端点の局所最適化に寄与する船舶を絞り込んだ点と，step3 で距離を測ることで期待発見船舶数の適正化を図ったこと及び step5 でラインサーチの際の移動に関与する船舶を制限し，端点が移動しすぎることによって発生しがちな経路の交錯を極力抑えたことである．

3. ヒューリスティックスによる基準経路決定方法の提案

3.1. 船舶の線分 Voronoi 領域分割によるヒューリスティックス

経路からの特定の位置に対する発見確率の特徴から基準経路をヒューリスティックに決定する方策も考えられる．以下では，基準経路長が長くなることを抑制しつつ期待発見船舶数を増大させるように与えられた初期経路を反復的に更新していくヒューリスティックスを提案する．

前節と同様に目的関数値を計算する領域として各線分を中心線に含む矩形領域を仮定する．このとき 1 つの矩形領域とその中の個々の船舶位置に対応した目的関数値 (1 隻あたりの期待発見船舶数) との関係について以下の性質がある．

- 発見確率が (2.4) 式のように l のみに依存した形で表現され，各矩形領域 V_i ごとの目的関数値 (=期待発見隻数) は (2.2) 式で求められることから，個々の船舶の位置分布関数として方向性のない分布関数を仮定した場合，1 隻あたりの目的関数値 (=期待発見隻数) は，矩形領域の中心線に関し対称である．(従来の検討では $h_j(x, y)$ で $\sigma_x = \sigma_y$ とした場合に相当する．)
- 矩形領域の中心線に近いほど 1 隻あたりの期待発見隻数は大きくなる．

こうした性質を利用し，目的関数値を計上するための矩形領域を適切に再配置し，個々の矩形領域で計算される期待発見船舶数を局所的に大きくする方策として，矩形領域の中心線からその領域に割り振られた船舶までの距離 l の和を最小にするように線分経路の方向を決定する方策が考えられる．

平面内の複数の需要点に対し，直線状の施設を配置する既往の研究として，各需要点までの距離 (絶対距離) の和を最小にするように，予め端点が固定された半直線の方法を決定するという問題が検討されている [4]．しかし，本検討で最小化すべきは，発見確率が (2.4) 式のように l^2 の関数として表現されていることから，むしろ 2 乗距離 l^2 の和を最小にすることが妥当であり，その場合は，直交回帰直線を求めるような最小 2 乗法によるのが普通である [3]．これらはいずれも 1 つの固定点から最適な半直線の方法を決定する研究である．

今、図2のような、 ν 回の反復が終了し、端点 (x_i^ν, y_i^ν) の新たな配置位置 $(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1})$ を決定する状況を考える。このとき、 (x_i^ν, y_i^ν) の前後の2端点 $(x_{i-1}^\nu, y_{i-1}^\nu), (x_{i+1}^\nu, y_{i+1}^\nu)$ は固定されている。

既存の手法の利用を考えた場合、線分 $(x_{i-1}^\nu, y_{i-1}^\nu)(x_i^\nu, y_i^\nu)$ Voronoi 領域に割りあてられた船舶と線分 $(x_i^\nu, y_i^\nu)(x_{i+1}^\nu, y_{i+1}^\nu)$ Voronoi 領域に割りあてられた船舶に対し、最小2乗法により、各領域での線分経路から各船舶までの2乗距離 l^2 の和を最小化するような半直線の方が決定され、その交点座標として新たな配置 $(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1})$ が求まるが、場合によっては、 $(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1})$ を前後の端点を結ぶ線分 $(x_{i-1}^\nu, y_{i-1}^\nu)(x_{i+1}^\nu, y_{i+1}^\nu)$ からかなり離れた位置に配置されることになり、部分経路での期待発見船舶数は増大しても長い距離を飛行することになってしまう。この点から、最小2乗法を用いた、半直線の交点により端点を決定する手段は、実運用に即した基準経路を決定する手段としては適当でない。

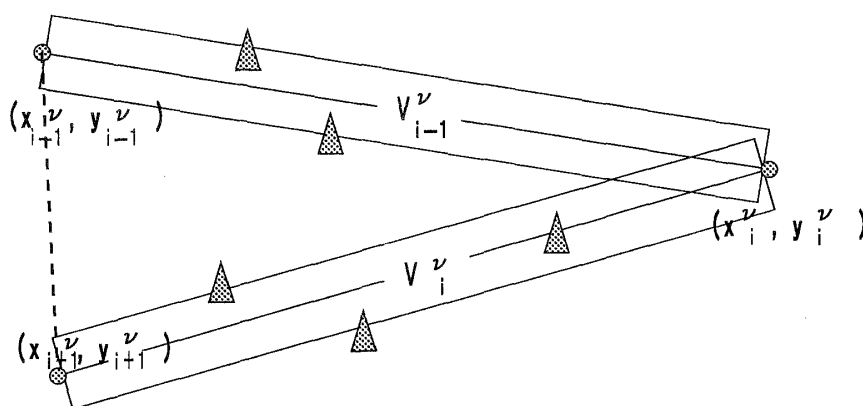


図2：2方向からの端点位置の決定の様子

以下では基準経路長が長くなることを抑制しつつ、期待発見船舶数を増大させるように端点を配置するヒューリスティックな方法として、決定すべき端点を前後の線分 Voronoi 領域に割り振られた船舶の重心位置に移動する方法があることを示す。

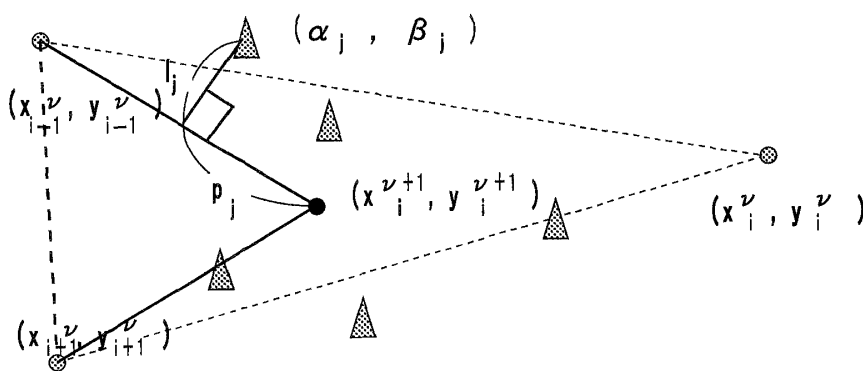


図3：ヒューリスティックな端点位置の決定

2端点 $(x_{i-1}^\nu, y_{i-1}^\nu), (x_{i+1}^\nu, y_{i+1}^\nu)$ を固定して、端点 (x_i^ν, y_i^ν) の前後の線分 Voronoi 領域に割り当てられた船舶に対し、局所経路長を増大させないようにしつつ、目的関数値を増加させるような位置に $(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1})$ を再配置するためには、図3のように、各船舶から経路までの距離のみでなく、経路までの垂線の足位置から (x_i, y_i) までの線分経路に沿った方向の距離も考

えるとよいと思われる．線分 $(x_{i-1}^{\nu}, y_{i-1}^{\nu})(x_i^{\nu}, y_i^{\nu})$ の Voronoi 領域及び線分 $(x_i^{\nu}, y_i^{\nu})(x_{i+1}^{\nu}, y_{i+1}^{\nu})$ の Voronoi 領域に分割された船舶 j の中心位置 (α_j, β_j) から2つの線分経路の近い方までの距離を l_j , j の中心位置から線分経路に下ろした垂線の足位置から (x_i, y_i) までの距離を p_j とすると,

$$\min \left\{ \sum_j^{m_{i-1}+m_i} l_j^2 + \sum_j^{m_{i-1}+m_i} p_j^2 \right\} \quad (3.1)$$

となるように $(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1})$ を配置することを考える．(m_{i-1}, m_i を前後の線分 Voronoi 領域それぞれに割り当てられた船舶数とする．)

第1項は, まさに各船舶から経路までの2乗距離の和を小さくすることを目指す項である．一方, 第2項は, 各船舶に対し, 各船舶位置から折れ線経路 $(x_{i-1}^{\nu}, y_{i-1}^{\nu})(x_i^{\nu}, y_i^{\nu})(x_{i+1}^{\nu}, y_{i+1}^{\nu})$ に垂線を下ろした位置に $(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1})$ があるときにそれぞれの p_j^2 が最小となり, その位置まで飛行したら, 次の端点 (x_{i+1}, y_{i+1}) に向かうべく折り返すことを意味している．

この項は, 第1項, すなわち, 本来求めたい l_j^2 の和の減少 (=目的関数値の増大) には直接寄与しないが, 各船舶中心から折れ線経路に下ろした垂線の足位置から遠くなるほど増大する量であり, 端点 $(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1})$ をその前後の端点を結んだ線分から遠ざけないことに寄与する項である．また, (3.1) 式の第2項を小さくすることで, $p_j < 0$ の場合には船舶中心 (α_j, β_j) の垂線の足位置まで部分経路を延ばすように作用し, 矩形領域が長くなる分, 局所的な目的関数値の増大に間接的に寄与しているともいえる．

特に $m_i = 1$ の場合には, まさにその船舶位置 (α_1, β_1) に $(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1})$ を配置することで最適な部分経路が得られる．

(3.1) 式において, 各 j に関し, l_j と p_j が直交することから, (3.1) を達成する位置 $(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1})$ は, 重心位置

$$(x_i^{\nu+1}, y_i^{\nu+1}) = \left(\frac{1}{m_{i-1} + m_i} \sum_j^{m_{i-1}+m_i} \alpha_j, \frac{1}{m_{i-1} + m_i} \sum_j^{m_{i-1}+m_i} \beta_j \right) \quad (3.2)$$

に他ならない．

重心位置に端点を移動することで, 存在している船舶の平均的な部分を前後からの経路が通過することとなり, 船舶位置に沿った直感的に分かりやすくなめらかな経路が構成されるというメリットが生じる．また, 対象領域全体の船舶を分割して部分ごとに近傍船舶群を構成していることから, 端点を重心座標に移動することは, 分割された船舶ごとの代表点に端点が配置されることとなり, 端点の重なりを防ぐために有効であると考えられる．こうした点から, 分割された船舶の重心座標に端点を配置するヒューリスティックな経路に興味を持たれる．なお, 端点が重心位置に配置されるたびに, 新たな線分経路が構成され, それに応じて新たな船舶分割がなされるので, それら一連の操作を反復的に実施し, ある程度収束した経路となったときを, このヒューリスティックスによる経路とする．

3.2. 船舶の角度分割によるヒューリスティックス

3.1 節で分割された船舶群の重心位置に端点を配置することで経路長の延伸を抑制する経路が得られることが示され, さらに, 基準経路として周回路を想定していることから, 他のヒューリスティックスとして, 初期経路を構成する端点を与えずに, 周回路内の適当な点を原点と定めて, 各船舶位置に対する原点からの角度情報に基づいて船舶を分割し, それら

の重心位置に端点を配置するというヒューリスティックな構成方法も考えられる。この方法では、原点位置の決定に選択の余地があるが、初期経路の設定が必要でなく、また、船舶を線分 Voronoi 領域に分割するという手間が省けることから計算の簡素化が期待できる。さらに、原点位置を決定してしまえば、線分 Voronoi 領域分割方式のように、分割される船舶が反復ごとに変化することがないために、反復計算が不要となる。次節では、このヒューリスティックも経路を構成する手段として検討を試みる。

4. 実験

前節までに示した局所最適化手法及びヒューリスティックにより構成される基準経路を比較し、本研究で提案する経路設定方法の有効性について、これまでに得られている結果と比較しながら考察する。

4.1. モデル経路例での比較

図 4(a) のように初期端点数 $n = 13$ の直線分から成るモデル初期経路 (初期経路長 $L^0 = 13240.2$) を設定する (端点を○で表現する)。さらに各線分を 2 分割, 4 分割する位置に端点を取り, $n = 26, 52$ の端点からなるモデル経路を設定した。対象海域には $m = 54$ 隻の船舶を実際のデータを参考に点在させた。各船舶の密度関数は $\sigma_x = \sigma_y = 150$ とする同一の 2 次元正規分布である。発見確率 g の各パラメータの値は, $k = 10000, R = 300$ とした。反復計算の終了条件として反復毎の端点位置の移動量の合計が

$$\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i^{\nu+1} - x_i^{\nu})^2 + (y_i^{\nu+1} - y_i^{\nu})^2} \leq 500$$

となるか反復回数が 8 回となるかのいずれかとした。船舶の角度分割によるヒューリスティックでは、角度を計測する基準点を (1800, 1800) とした。

数値実験は NEC PC-9821 Cx13 (CPU:133MHz) 上で実施し、プログラムは MS-Fortran5.1 により記述した。

$n = 13, 26, 52$ の各場合に [2] の Newton 法により得られる経路を、図 4(b-1), (c-1), (d-1) に、今回提案する方法により得られる経路を 図 4(b-2), (c-2), (d-2) に示す。従来経路 (($* - 1$); $* = b, c, d$) と新経路 (($* - 2$); $* = b, c, d$) とを見比べた場合、(b) の場合はほぼ同等な経路が得られているが、(c), (d) の場合は、従来方法による経路では、端点が船舶密度の高い領域に集中し、一方、今回提案する方法では、端点が各船舶位置に分散している様子がうかがえる。従来の目的関数値の計算方法では、目的関数値が過剰に見積もられ、特に (d-1) では、対象海域に存在する船舶数以上の船舶を“発見”している。

今回提案する方法により得られる経路では、一般に局所 Newton 法による経路よりもヒューリスティックな方法による経路の方が滑らかになる傾向がある。これは、分割された船舶群の代表的な位置に端点が配置された結果であると考えられる。局所的な Newton 法による経路は、分割された船舶に対し少しでも端点を接近させようとするために、全経路長は長くなる傾向にあり、期待発見船舶数もその分増大するが、滑らかさではやや劣る結果となる。

(d-2) の角度分割ヒューリスティックによる経路は、 n, m がほぼ同じ値の条件で得られるために、個々の端点が分散する船舶上に配置されることとなり、個々の船舶位置を訪問するような細々とした経路となる。また、ほとんどの船舶に対する期待発見隻数が 1 (隻) となるため、50 隻以上の期待発見船舶数となった。このような例を除けば、一般に、目的関数値は、局所 Newton 法による経路の方がヒューリスティックによる経路に比べ大きくなる

べきであるが、(c), (d) の場合は、ほぼ互角な値を得ている。こうしたことから、ヒューリスティックスでも局所 Newton 法と比較し、それほど悪くない結果が得られると考えられる。

しかし、(b) のヒューリスティックな経路構成では、比較的多数の船舶が分割された個々の船舶群の重心位置に端点が配置されるため、端点の配置間隔が広がり、分割された各対象船舶群を十分に発見できるまで細やかに経路長を伸ばすことができなく、目的関数値の増加が抑制される結果となった。この例のような分布する船舶に対し端点数が少ない経路では、目的関数値の増加が抑制される現象が一般的であると予想されることから、ヒューリスティックスを利用し経路を得る際には領域に存在する船舶数と端点数との間のバランスに注意する必要がある。

計算時間に関しては、線分 Voronoi 分割ヒューリスティックスの 1 反復あたりの所要時間が 0.3 ~ 1.1 秒程度、局所 Newton 法の場合が 1 反復あたり 2.3 ~ 3.3 秒程度となった。角度分割によるヒューリスティックでも線分 Voronoi 分割ヒューリスティックとほぼ等しい計算時間となるために、分割様式の差は、特に計算時間には反映されていない。従来の Newton 法を適用した場合には、1 反復あたりでも 10 ~ 25 秒程度要していたことから、今回提案する方法では、1 桁程度処理時間が短縮している。

図 5(a), (b) は、 $m = 108, 162$ 隻が分布する領域で、それぞれ図 4(a) の $n = 52$ の場合の初期経路から始めて、従来の方法 ($(*) - 1; * = a, b$) 及び今回提案する局所 Newton 法 ($(*) - 2; * = a, b$)、線分 Voronoi 領域への船舶分割を利用したヒューリスティック ($(*) - 3; * = a, b$)、船舶の角度分割を利用したヒューリスティック ($(*) - 4; * = a, b$) により得られる経路である。両ケースとも、得られる基準経路の形状、目的関数値に関して図 4 の場合と同様な傾向が見られる。

図 6 は船舶が直線状に分布する ($m = 54$) 海域で、(a) の初期経路 ($n = 16$, 経路長 $L^0 = 18106.1$, 発見船舶数 $obj^0 = 7.52$) から始めて、(b) 従来の方法により得られた経路、及び (c), (d) 今回提案する方法により得られた経路を表す。(b) から明らかのように、従来の方法では、直線状に分布する船舶位置に端点が引きつけられて平たくつぶれた経路が構成され、実用的な基準経路が得られない。しかし、線分経路により船舶を分割した局所 Newton 法及びヒューリスティックによる構成法では、図 6 (c) のように分散する船舶位置に沿って周回する実用的な基準経路が得られている。一方、(3600, 3000) を原点とした、船舶の角度分割により得られるヒューリスティック経路 (図 6(d)) では、各船舶の分布が原点からの方向により大きく異なるために局所的な端点の集中が発生し、実用的な経路が得られない。このように局所的な船舶分布の方向差が激しい船舶分布に対し、角度分割ヒューリスティックでは、原点位置の選び方によらず (c) のような端点が分散する周回路を得ることは難しいと思われる。

このような船舶分布に対し角度分割ヒューリスティックの適用を試みる場合、分布する船舶位置の傾向線 (回帰直線) をまず求め、その直線の上下で船舶を分割し、それぞれの側で端点位置を最適化した後に、上下の半周回路の両端を接続するような工夫が必要であろう。

これまでで紹介した例のように、分割船舶による基準経路構成方法を採用することで、これまでの方法での端点の集中がほぼ除かれ、実際の運用により適した基準経路が得られるようになったことから、今回提案する方法の有効性が示されると考える。

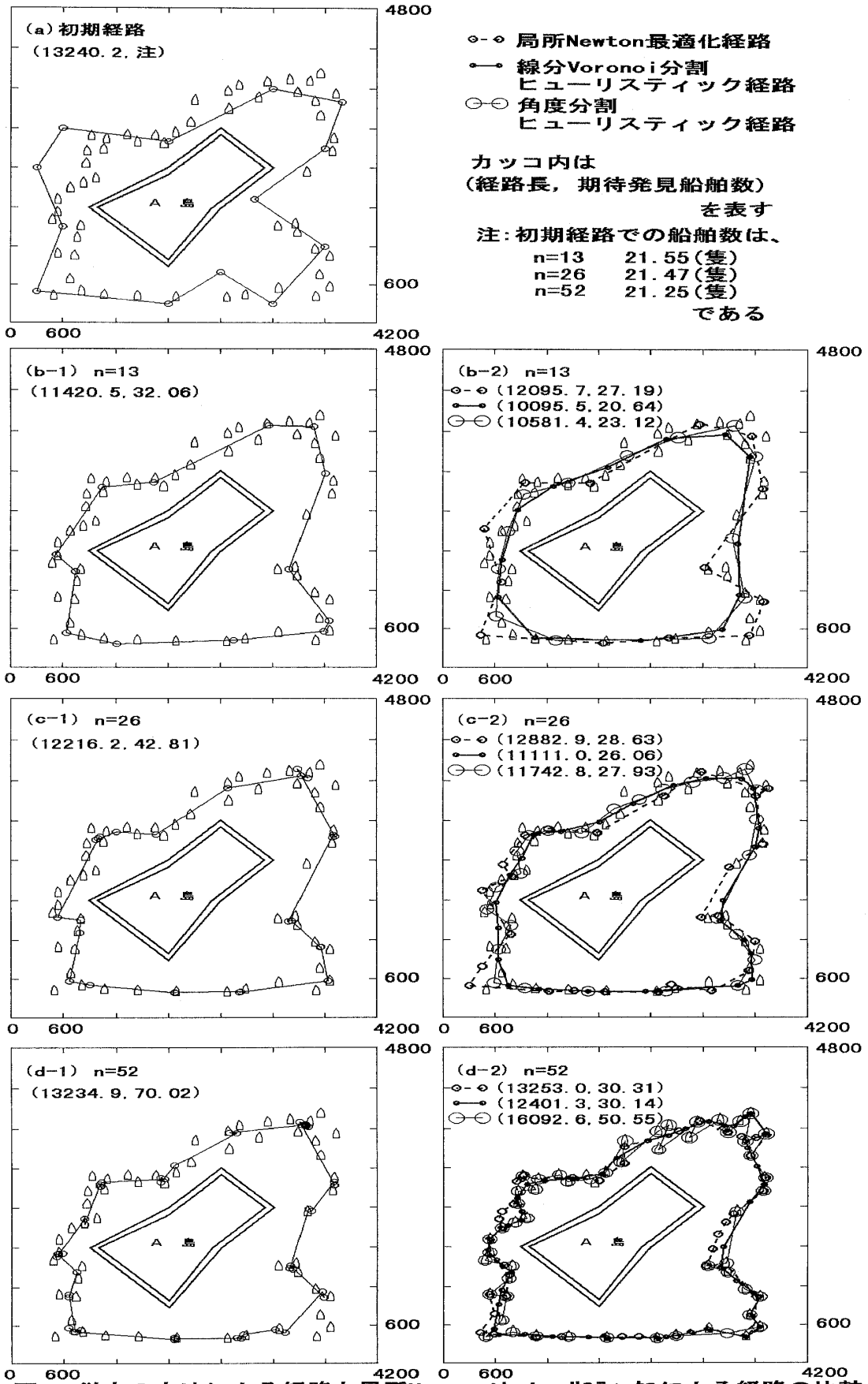


図4: 従来の方法による経路と局所Newton法, ヒューリスティクスによる経路の比較

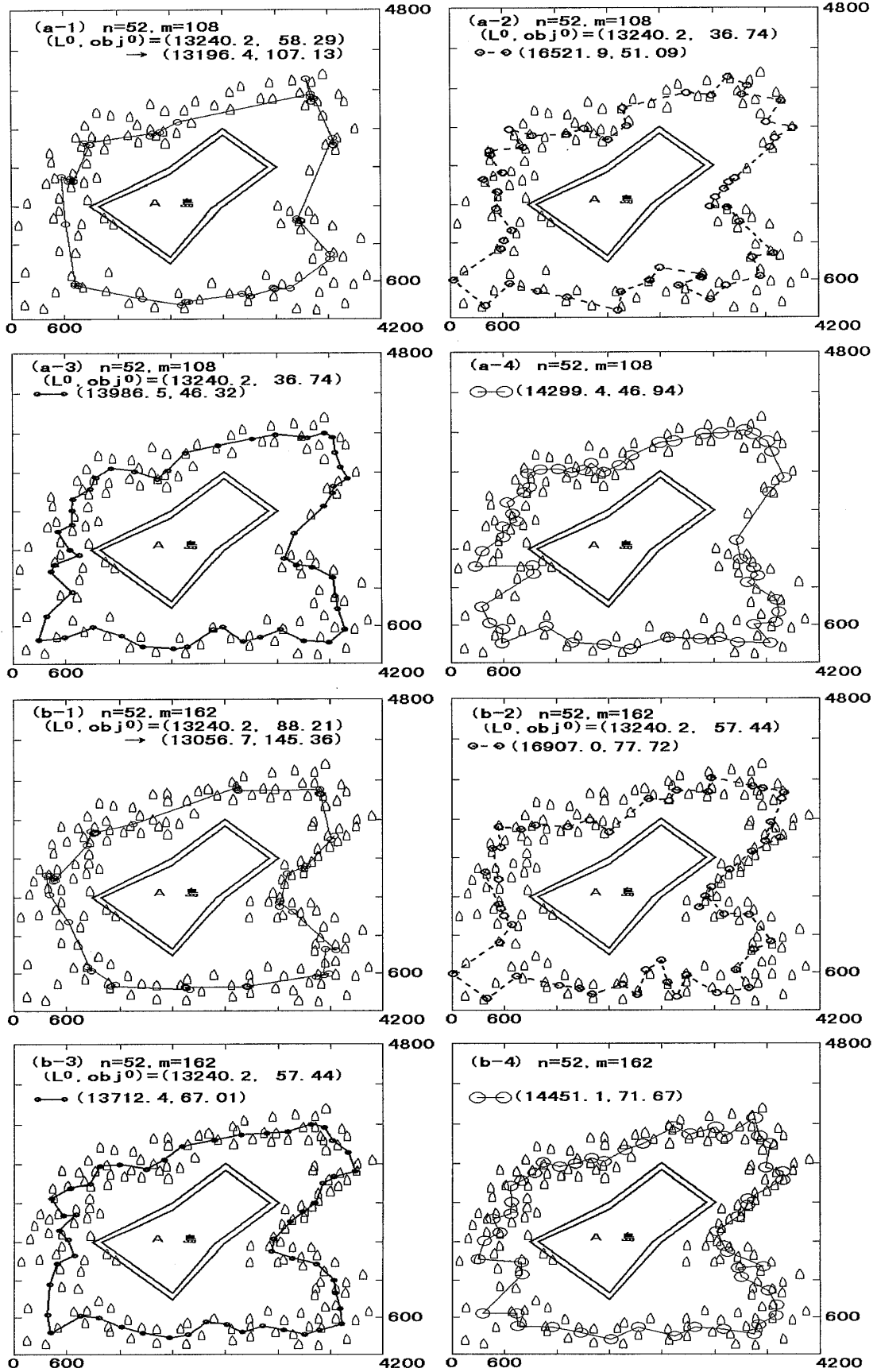


図5：船舶数が増加した場合の各方法により得られる経路の比較

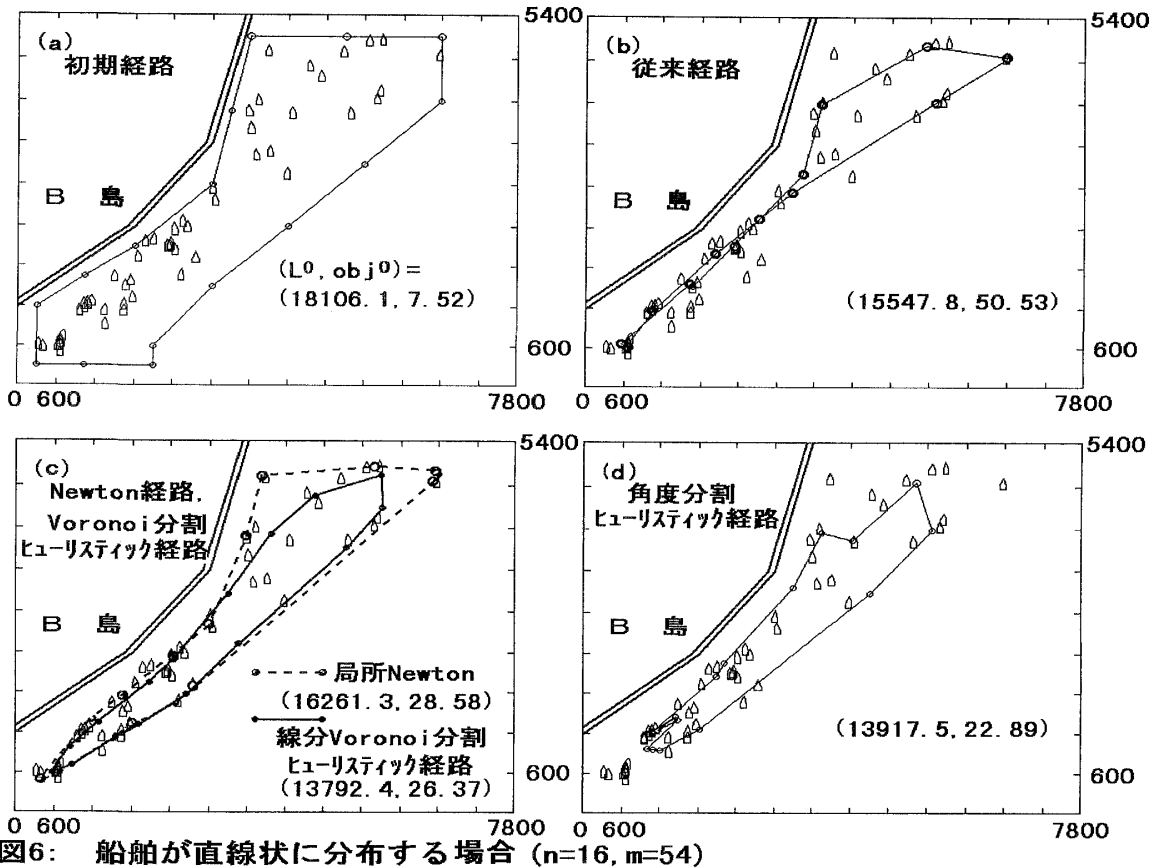


図6: 船舶が直線状に分布する場合 ($n=16, m=54$)

4.2. 実運用経路での試算

さらに、局所的な Newton 法及びヒューリスティックな方法により、海上自衛隊で実施しているケースのうち、いくつかで計算した結果を表1に示す。($l-New, V-heu, a-heu$ はそれぞれ局所 Newton 法, 線分 Voronoi 分割ヒューリスティックス, 角度分割ヒューリスティックスを表す. 計算時間の単位は $l-New, V-heu$ は, 秒/反復, $a-heu$ は秒である.) 初期経路としては、従来の運用で用いられている経路を採用した. ケース1では、矩形の領域全体に船舶が分散して分布しているような状況に対し、初期経路がそれらの船舶配置をジグザグに進むように設定されている場合の結果である ($n=21, m=50$). このようなケースに対しては、ヒューリスティックな手段では、図4(b-2)と同様に経路が緊縮する傾向が観測され、初期発見船舶数に比べ、かえって発見隻数を減少させてしまうという結果を得た. このことは、所与の船舶配置に対し、初期経路が比較的妥当に配置されているために生じたと考えられ、目的関数値を改善するためには、局所的な Newton 法によるか、初期端点数を増加させるなどの方策が考えられる. 一般に船舶が特定の航路帯に沿った分布をしていないような場合は、目的関数値の改善幅が小さいか、かえって減少させる結果となることが予想され、そのような場合は、局所 Newton 法を用いるのが妥当であることがうかがえる.

ケース2は、矩形領域の周辺部に船舶が存在する場合であり ($n=22, m=54$), ケース3は、船舶が直線状に分布する場合 ($n=18, m=78$) で、いずれも船舶位置に沿うような初期経路が与えられている場合である. これらのケースはいずれも 4.1 節での結果と同様の傾向を示している. ケース3の角度分割ヒューリスティックスでは、船舶密度が大きな領域で端点の集中が発生している. 他の各ケースでの試算では、船舶位置に近接し期待発見船

船数を増加させつつ、交差がない経路を構成し、ヒューリスティックな場合で20～25%程度、局所Newton法によっても8～20%程度経路長を削減し、実用的な経路を得ている。

表 1: 実経路例での試算 (L^0, obj^0 は初期経路長・発見隻数)

	ケース 1			ケース 2			ケース 3		
	$L^0 : 38701.1 \quad obj^0 : 16.25$			$L^0 : 36380.8 \quad obj^0 : 19.27$			$L^0 : 36212.2 \quad obj^0 : 9.94$		
	$l - New V - heu a - heu$			$l - New V - heu a - heu$			$l - New V - heu a - heu$		
発見隻数	18.75	11.38	10.14	26.29	24.36	26.05	45.78	41.05	37.02
経路長	39358.4	26106.6	24674.4	28712.0	26813.4	27756.9	33141.2	28501.2	30924.3
計算時間	3.53	0.42	0.32	2.81	0.56	0.44	4.57	0.63	0.77

5. まとめと今後の課題

これまでの監視経路設定問題において、船舶の分割を利用した、局所最適化の改良手法及び最適化手法を用いないヒューリスティックに経路を得る方法を提案し、それぞれの手法により基準経路を構成した。いずれの手法とも、基本的にはこれまでの手法と同様、局所最適解を求めているにすぎないが、これまでの基準経路構成方法で問題となっていた端点の集中とそれに伴い発生しがちな局所的な経路の交差がほぼ除かれた、運用しやすい経路が構成されるように改善された。特に、ヒューリスティックに経路を得る手法は、簡単な割には、今回の検討で用いたような発見確率が逆3乗法則に従わないような場合でも、経路からの横距離方向への減少関数であれば応用できる一般的な手法であり、様々なセンサ(の発見確率)に共通に利用できる。しかし、ヒューリスティックな手段では、端点数が分布する船舶数に比し少ない場合は、端点間隔が広がり、きめ細やかな経路構築ができないので、そのような場合は端点数を変化させて、得られる基準経路とその経路での目的関数値を確認しつつ、適切な端点数を決定していくべきであろう。これらの手法を様々な基準経路を求める条件下で使い分けることにより、従来の構成法で得られる経路での問題点がほぼ解消された経路を得ることが可能となった。実際の経路で試算した結果も、実用的な経路を得ている。

今後は、これまでのような単純な目的関数(期待発見船舶数)の増大を目指すだけでなく、[6]にあるような経路長の増分と目的関数値の増分とを関連づけた新たな評価尺度を考えて、得られる経路の質の評価も試みたい。経路長を評価尺度に関連づけることで目的関数値の増分を維持したまま、局所的な経路長を削減できる可能性が見込め、これによりさらに効率的な運用が行える基準経路が構成できるだろう。この際、今回提案する手法を大いに活用することで改善をはかりたい。

謝辞

本論文の執筆にあたり、有益な御意見をいただきました慶應義塾大学の柳井浩先生、栗田治先生、筑波大学の鈴木久敏先生、および有益な御助言、御指導頂いた審査員に深く感謝致します。

参考文献

- [1] M.Abramowitz and I.A.Stegun(eds.): *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables* (Dover, New York, 1964).

- [2] 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) 455-469.
- [3] N.M.Korneenko and H.Martini: Hyperplane approximation and related topics. In J.Pach(ed.): *New Trends in Discrete and Computational Geometry* (Springer, Berlin,1993), 135-161.
- [4] J.G.Morris and J.P.Norback: Linear facility location - solving extensions of the basic problem. *European Journal of Operational Research*, **12** (1983) 90-94.
- [5] 岡部篤行, 鈴木敦夫: 最適配置の数理 (朝倉書店,1992).
- [6] H.Sherali and S.Kim: Variational problems for determining optimal paths of a moving facility. *Transportation Science*, **26** (1992) 330-345.

小宮 享
東京工業大学
社会理工学研究科
経営工学専攻
〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1
E-mail : komiya@me.titech.ac.jp

ABSTRACT

LOCAL SOLUTIONS OF SURVEILLANCE ROUTING PROBLEM BY PARTITIONING THE OBJECTIVE SHIPS

Toru Komiya Masao Mori
Tokyo Institute of Technology

Surveillance operation is performed, along a given standard route, in order to confirm sea lane security and to detect/counter the suspicious ships. The route is composed of connecting 2-dimensional points on the surface by straight lines sequentially. In our previous paper a model for surveillance routing problem and an efficient algorithm constructing a suboptimal standard route are proposed. Starting from a given initial route, each 2-dimensional point is moved iteratively to maximize locally the expected value of detected ships estimated from total sum of densities of all ships in the whole area. There, some difficulties are remained such as over estimation of the objective value by repeating visits in an area where many ships are concentrated locally.

In this paper, in order to avoid such conflicts, we first partition the region systematically into line Voronoi regions along the route obtained in each iteration and only use densities derived from each Voronoi region to calculate the local objective values. The improvement brings about the algorithm speeding-up and avoiding over estimation caused by repeated visits.

Further, taking notice of the symmetric shape of the detective probability function from a standard route, we also propose efficient heuristic methods to obtain a suboptimal route. Finally numerical examples are illustrated for understandings.