

継続追尾実施時の最大所要ブイ数の算定方法

01110110 防衛大学校 *小宮 享 KOMIYA Toru
02602530 海上自衛隊 牧田哲治 MAKITA Tetsuji
01504810 防衛大学校 宝崎隆祐 HOHZAKI Ryusuke

1. 研究の目的

日本の周辺海域では、情報収集や海洋観測を目的とした他国艦船による調査活動が近年、多発・増大傾向にある。このような活動を続ける艦船を発見した際には、不測の事態を回避する目的で発見時より継続的に追尾して監視を行うのが一般的である。水上艦艇の場合は目視やレーダなどにより容易に継続監視が可能である。一方、潜水艦は潜没して航行する可能性が高く、また、水中での確認手段としては音波によらざるをえないので、音響ブイを投入しながら継続追尾を行うのが一般的である。

本研究では潜水艦を捜索・探知し継続監視を行う哨戒機が任務飛行時間が終了するまでに要する音響ブイの最大所要数を算定する方法を提案し、簡単な数値例により所要量を見積もる。

2. モデル化の前提

モデル化に際し、次の各項を仮定する。

1. 任務海域を割り当てられた哨戒機 1 機 (以下、捜索者) はその海域内に存在する 1 隻の潜水艦 (以下、目標) の探知に努め、探知した際には継続的に音響ブイを投入し監視を継続する。
2. 捜索者の任務時間は有限とし 捜索開始時点 を $t = T$ 捜索終了時点 を $t = 0$ とする。また時間を離散化して扱う。すなわち、 $t = 0, 1, \dots, T$ とする。
3. 目標の探知 (コンタクト)・失探 (ロスト) は微小時間 $[t, t+1]$ の境界時点で発生する。各微小時間内では探知状況 (探知, 失探, 未探知) は継続している。
4. 音響ブイは瞬時に投入できる。
5. 捜索開始時点で広域捜索用ブイ (継続作動時間 t_a) を V_a 本投入し探知に務める。未探知の状況が続くとき、あるいは目標追尾中に失探したとき広域捜索ブイが作動中でなければ、同数を再投入する。
6. 初探知を得るまでの時間はパラメータ λ_f の指数分布に従うとし、過去のデータ等より既知とする。
7. 探知発生時点で V_c 本のブイを目標近傍に瞬時に投入する。また、目標確認も瞬時にできるとし、確認・追尾用ブイの作動時間を t_c とする。追尾中は周期 t_{lo} ごとに V_{lo} 本ずつ投入する。追尾は t_{tr} 時間継続し、その後ロストする。
8. 追尾中に目標をロストする確率は既知のパラメータ λ_L の指数分布に従う。
9. 目標を見失うと、最後に確認された位置 (データム点) から等方向に逃避可能とする。これより目標の存在確率は、音響ブイの一定の捜索範囲と拡大する円との比によるレーリー分布に従う。再探知率はこの存在確率とランダム捜索による探知率 $1 - \exp(-\lambda_s t)$

との積になる。ここで $\lambda_s \geq \lambda_f$ とする。

10. 1 任務飛行あたりで発生しうるコンタクト回数 C に対し 捜索者が必要とするブイ数の期待値を求める。

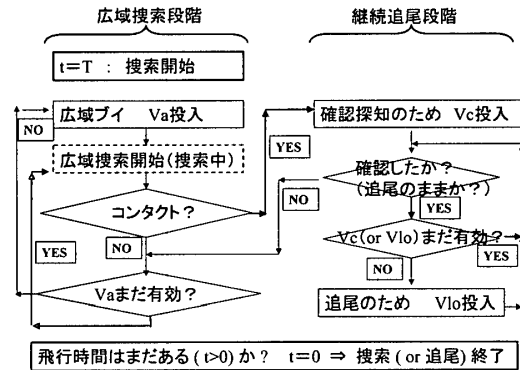


図 1 広域捜索・継続追尾での運用状況と投入ブイ数

3. 初探知・追尾・再探知の発生状況とその確率

図 2 に時間経過に従った目標の探知・ロスト・再探知時の一連のブイ投入の様子を示す。初探知が発生するまでは広域捜索が継続され、 $t = T$ の時点から t_a ごとに広域捜索ブイが投入される。ある時点 t でコンタクトが発生した後は $0 \leq t_{tr} \leq t$ 間追尾が継続する。その間、 t_{lo} ごとに継続追尾ブイを投入する。時点 t_l でロストすると微小時間 $[t_l - 1, t_l]$ ではロスト状態が継続するとし、広域捜索により再探知が発生しうるのは次の微小時間 $[t_l - 2, t_l - 1]$ との境界時点 $t_l - 1$ 以降とする。

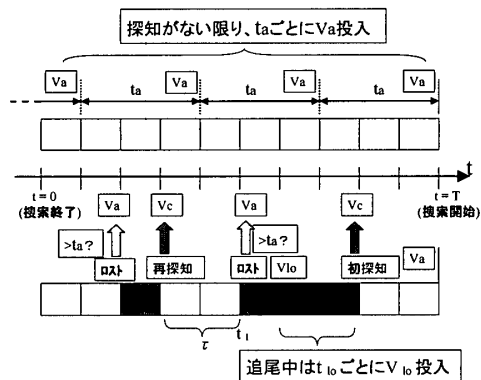


図 2 時間経過と投入ブイの様子

初探知が発生する確率 P_{fc} は初探知発生までの時間が指数分布に従うことから時点 t によらず各単位時間あたり $P_{fc} = 1 - \exp(-\lambda_f)$ である。また、追尾中に目標をロストする確率は $P_L = 1 - \exp(-\lambda_L u)$ (u は目標確認後の経過時間) である。よって t_{tr} 間追尾が継続するならば継続追尾率 $P_{tr} = \exp(-\lambda_L t_{tr})$ で与えられる。見失う

た目標を再探知する確率 P_{sc} は、目標の存在確率とランダム検索による探知率との積として計算され、目標速度を v 、ロスト時点 t_l からのロスト継続時間を $\tau (> 0)$ とすると $P_{sc} = \{1 - \exp(-\frac{R^2}{(v\tau)^2})\} \{1 - \exp(-\lambda_s \tau)\}$ で与えられる。

4. 所要バイ数の算定方法

所要バイ数を見積もるために以下の関数を定義する。

$V_C(t)$: t にコンタクトが発生してコンタクト時の投入

バイを含まずそれ以降に要するバイ数とし、時

点 $t_l (< t)$ で失探するとき $V_C(t, t_l)$ と表記する。

$V_A(t)$: t に初コンタクトが発生するまでに要する広域

捜索用のバイ数

以下の 4.1. ~ 4.2. に従い所要バイ数を計算する。

4.1. 1 回のみ探知に対する所要バイ数 $V_1(t_1)$

全検索期間で 1 回のみ探知が時点 t_1 で発生するとする。このとき $t > t_1$ では広域捜索に従事し、 $t < t_1$ では継続追尾するか途中でロストしてしまい広域捜索に復帰するのみである。ロスト時点 $t_l (< t_1)$ に応じて所要バイ数が増加する。 $[t_l, t_1]$ では継続追尾バイを周期 t_{lo} で投入し、 $[0, t_l]$ では再探知を期待して広域捜索バイを投入する。 t_1 に依存するこれらのバイ数の期待値の和を最大化することで $V_C^*(t_1)$ が求められる。すなわち $V_1(t_1)$ は次式で求められる。

$$V_1(t_1) = \max_{0 < t_l < t_1} V_C(t_1, t_l) + V_c P_{fc} + V_A(t_1) \\ = V_C^*(t_1) + V_c P_{fc} + V_A(t_1) \quad (0 < t_1 \leq T) \quad (1)$$

ここで第 3 項は次式により決定される。

$$V_A(t_1) = V_a \{ \exp(-\lambda_f \cdot 0) + \exp(-\lambda_f t_a) + \dots \\ + \exp(-\lambda_f t_a \lceil \frac{T - t_1}{t_a} \rceil) \} \quad (2)$$

また第 2 項は初探知に対する所要バイ数を示す。

4.2. 複数回探知での所要バイ数 $V_n(t_1, \dots, t_n)$ ($n \geq 2$)

時点 t_n ($t_{n-1} < t_n \leq T$) で初探知が発生し、 $t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1}$ で再探知が発生するとする。このとき次式が成り立つ。

$$V_n(t_1, \dots, t_n) = V_C^*(t_1, \dots, t_{n-1}) + V_c P_{sc} \\ + \max_{t_{n-1} < t_l < t_n} V_C(t_n, t_l) + V_c P_{fc} + V_A(t_n) \quad (3)$$

ここで $n-1$ 回コンタクトが発生するとき、一般に次式が成り立つ。

$$V_{n-1}(t_1, \dots, t_{n-1}) = V_C^*(t_1, \dots, t_{n-1}) + V_c P_{fc} + V_A(t_{n-1}) \\ (0 < t_1 \leq T) \quad (4)$$

これらより

$$V_n(t_1, \dots, t_n) = V_{n-1}(t_1, \dots, t_{n-1}) - V_A(t_{n-1}) + V_A(t_n) \\ + \max_{t_{n-1} < t_l < t_n} V_C(t_n, t_l) + V_c P_{sc} \quad (5)$$

により所要バイ数を求める。 P_{sc} では $\tau = t_l - t_{n-1}$ とする。

ロストした時点から再コンタクトが発生する時点まで最低でも 1 単位時間を要することから、初探知・再コンタクトを含めた全コンタクト発生回数は高々 $n \leq \lceil T/2 \rceil$ でありコンタクト回数が有限となることから所要バイ数 $V_n(t_1, t_2, \dots, t_n)$ も有限値として求められる。

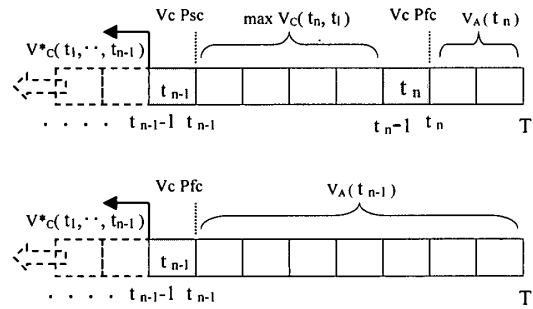


図 3 t_n でのコンタクト発生に伴う所要バイ数の変化

5. 数値例

$t = 0, 1, \dots, 9, 10$ とし、以下の各パラメータ値によりコンタクト発生回数別に最大所要バイ数を求めた結果を図 4 に示す。

$$\lambda_f = 0.5 \quad \lambda_L = 0.2 \quad \lambda_s = 1.0 \\ V_a = 5 \quad V_c = 2 \quad V_{lo} = 2 \\ t_a = 3 \quad t_c = 2 \quad t_{lo} = 2 \\ R = 500 \quad v = 170$$

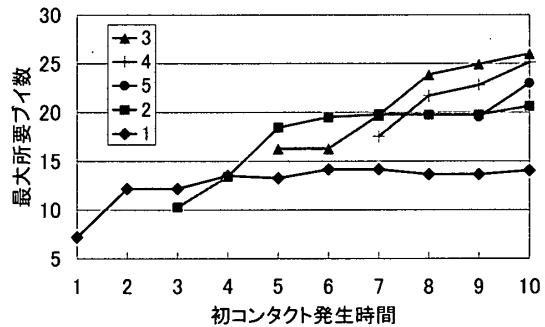


図 4 最大所要バイ数の変化 (コンタクト発生回数別)

初コンタクト発生時点と最大所要バイ数とは概ね比例することがわかる。この例では $C = 3$ のときに最大所要バイ数 26.0 が得られる。 $C = 4, 5$ では追尾が継続せず再探知の可能性も高まるため V_a, V_{lo} の投入数が少なくなるため $C = 3$ に比べ所要バイ数は少ない。他の計算例については発表当日報告する。

6. まとめ

本研究では、1 任務飛行での最大所要バイ数の算定方法を提案したが、今後は追尾期間が長期化することを想定した航空基地からの進出距離やリードタイムを考えた継続的な計画立案方法を検討したい。