

AI画像解析を用いた洋上搜索の効率化に関する検討

海上保安大学校海上安全学講座 齋藤 靖洋 (Yasuhiro Saito) [†]

[†] Department of Maritime Safety Technology, Japan Coast Guard Academy

海上保安大学校 秋田 時雄 (Tokio Akita) ^{††}

海上保安大学校 伊東 千穂 (Chiho Ito) ^{††}

海上保安大学校 上野 隆一郎 (Ryuichiro Ueno) ^{††}

^{††} Japan Coast Guard Academy

1 はじめに

運送や漁業、マリレジャーなどの様々な活動が行われる海洋は、日本に住む私たちにとって非常に身近な存在である。しかしながら、生活を営む上で必要不可欠なものである一方で、大いに危険をはらんだものでもある。例えばフェリーなどでの移動中に船舶衝突や機関故障といった事故に巻き込まれ、一度海中転落者や漂流者となってしまえば、波浪や海潮流の影響により流されてしまい容易に命を落とすことがある。海上保安庁の発表 [4] によれば、令和5年度の海洋における人身事故者数は2378人であり、そのうち死亡・行方不明者数は939人となっている。人身事故者数全体のうちで、海中転落者数（自殺者を除く）及び帰還不能者数を合わせると952人に上り、これは人身事故者数全体の40%を占めている。つまり海洋における人身事故のうち約4割で、人が海に投げ出される状況となることを意味する。更に海中転落者のみに着目してみると、海中転落者の総数670人に対して死亡・行方不明者数は350人となり、海中転落者の2人に1人以上は帰らぬ人となっていることが大きな特徴として挙げられる。これらのデータから見れば、海洋での事故においてはいかに早く海中転落者や漂流者等を見つけて救助するかが人命に大きく関わる重大な問題であり、搜索救助を成功させるためには搜索効率の向上が不可欠な課題となると考えられる。

現在世界中の多くの国では、世界標準の搜索救助マニュアルであるIAMSAR マニュアル [3] に基づいた搜索活動が広く実施されている。IAMSAR マニュアルにおいては、搜索目標を発見するための手段として主に目視による搜索を想定している。科学技術が大いに発展した現在であっても、洋上の搜索においては最終的に人の目に頼らざるを得ない状況が多く存在する。IAMSAR マニュアルに基づく現行の搜索手法が人間の目に頼るものであるため、搜索効率が搜索者の視力や疲労度に左右されるほか、効率的な搜索のためには多くの人員を必要とするという欠点からは逃れられない。

目視のよる探知モデルは第二次世界大戦後にKoopman[5] がとりまとめた著書において提案され、IAMSAR マニュアルの基礎となる搜索理論の発展はここから始まったとされる。現行のIAMSAR マニュアルが取り入れられ、世界中のどの海域においても一定基準の搜索救助サービスが提供される下地が整った後も、搜索理論は各国において様々に発展していった。Sulaiman and Pierce[6] は、IAMSAR マニュアルには未だ用意されていないドローンの探知能力を推定することを目的に、ウィーン開手法を用いて既知であるヘリコプターの有効搜索幅を予測することで、提案手法の精度検証を実施した。また、Dachev and Zlatev[1] は、IAMSAR マニュアルが提供する搜索手法の一つである拡大方形搜索を改良し、搜索区域が広くなりやすい特徴を持つ従来の手法に対して、より小さな搜索区域を設定することで発見確率を高めるような搜索手法を提案した。更に、Xiong ら [7] は、IAMSAR マニュアルでは考慮されていない搜索中の搜索目標の動きが搜索効果に与える影響を最小化するために、反復計画法に基づいたヘリコプターの搜索区域設定手法を開発した。

こうした様々な改良案が日々考案される現在にあっても、IAMSAR マニュアル記載の搜索理論が大きく変更されるまでには至っていない。上記のような研究成果を取り入れて世界標準の手法として実運用するには、先進国であっても多大な時間と費用を要することが主な要因と考えられる。つまり、実行可能性を考慮した場合、発展途上国を含む世界中のスタンダードとなるべきIAMSAR マニュアルに、そのまま組み込む

ことが困難な現状があると言える。これを踏まえ本稿では、IAMSAR マニュアルが提供する搜索手法の大枠を崩すことなく、新技術を利用してより搜索効率を高める方法を模索する。具体的には、現在大きな注目を集めているドローンや無人航空機と、人工知能（AI）による画像解析技術を用いた搜索手法を提案する。ドローンや無人航空機による搜索は現状の搜索よりもはるかに少ない人数で実現できると期待され、また、AI 画像解析技術を用いることで目視による搜索よりもはるかに効率的に目標を発見できる可能性を秘めている。本稿では、新たなセンサーに頼る場合の探知能力をモデル化した上で、IAMSAR マニュアルの目的である最適搜索区域及び最適搜索経路間隔を導出する。また数値実験を通じて、現行手法と比べて提案手法が優れた成果を発揮するための条件を明らかにし、特に提案手法の優位性が際立つ状況を明確に示す。

2 搜索理論の概要 [3]

2.1 デイタム

搜索活動を実施するにあたって最も難しい問題は、搜索開始時刻における搜索目標の位置を如何に特定するかである。洋上において搜索目標が遭難する場合、基本的には自力で移動することが困難な状況にあり、目標は漂流のみによって移動すると考えられる。また洋上における搜索活動実施時には通常、入手可能な情報も限定的であることが多く、搜索目標の正確な位置を知ることがほとんど不可能である。したがって、搜索を開始するにあたっては、一般的にまず搜索目標の漂流開始地点を特定することから始める。漂流開始地点の特定後、搜索目標の漂流による移動経路を予測して、最終的に搜索開始時刻における目標位置を推定する。ここで、搜索開始時刻における搜索目標の推定位置はデイタムと呼ばれ、搜索者はデイタムを中心として搜索海域を設定することを考える。IAMSAR マニュアル上では複数のデイタムが用意されており、それぞれ搜索目標の漂流開始地点をどの程度正確に見積もることが出来るかによって使い分けられる。搜索活動が容易となるケースから並べると、最も取り扱い易いのは搜索目標の漂流開始時刻や位置がある程度の精度で1つに絞ることが出来る場合である。この場合、漂流開始地点は地図上のただ一つの点で与えられ、漂流後に辿り着くデイタムも地図上のある一点として表現される。IAMSAR マニュアルでは、これをポイントデイタムと呼ぶ。次いで容易となるのは、搜索目標の漂流開始位置がある特定の航路（ライン）上であるとしか分からない場合である。これは例えば、旅客船入港後に乗客の海中転落が判明した場合などが挙げられる。この場合、各地点からの漂流を考慮した後の搜索目標の位置もある特定のラインとして表現されることから、これをラインデイタムと呼ぶ。最後に最も困難度合いが高いのは、漂流開始位置自体が広範な範囲（エリア）の中にあるとしか分からない場合である。これは例えば、操業区域の決まっている漁船からの連絡が突然途絶えた場合などが挙げられる。この場合、漂流考慮後の搜索目標の推定位置もある特定のエリアとして表現され、これをエリアデイタムと呼ぶ。本稿では紙面の制約上、漂流開始位置の推定方法や漂流の細かい計算方法等については簡単な紹介に留め、ポイントデイタムが適用される場合に主眼を置き、議論を進める。

2.2 漂流要素

IAMSAR マニュアル上、漂流は主に海水の移動によるものと風の作用によるものに大別される。このうち、海水の移動による漂流は更に、海流、潮流、吹送流及びその他の流れの4つに分解される。最初の要素である海流は、沿岸よりある程度離れた距離に存在する地球規模の大きな海の流れを意味する。日本近海で言うと、北流である黒潮や対馬暖流、南流である親潮などが有名であり、これに付随する流れも含まれる。海流は時々刻々変化するような性質のものではなく、ある程度の期間、各地点においてほぼ一定の向きや速さを持つという特徴を持つ。この場合、海流による搜索目標の移動速度及び方向は、海流の移動速度及び方向と一致する傾向にある。2つ目の要素である潮流は、沿岸付近の潮汐変化によって生まれた海面の高

低差により、海水が低い方に流れていこうとすることにより生じる。潮流は比較的沿岸近くに発生する流れであり、概ね毎日2回ずつ発生する干潮及び満潮に影響される流れとなる。そのため、方向については離岸方向と向岸方向が交互に現れるのに加え、速さについても時々刻々変化する特徴を持つ。潮流に関しても、搜索目標の移送速度及び方向は、潮流の移動速度及び方向と一致する傾向にある。3つ目の要素である吹送流については、洋上を吹く風が海面上の海水を運ぶことにより発生する流れのことを指し、海水の流れに乗った物体が移動するものを指す。風が強いほど海水の流れが速くなることから、目標の移動速度は平均風速に比例する。また、その移動方向はコリオリの力が働くことによって、日本近海では風下方向から右に約30度の偏角を持つことが知られている。したがって、吹送流による搜索目標の移動は、その海域に吹く風に依存するという特徴を持つ。最後にその他の流れには、例えば河口付近における川の流れなどが含まれる。これら海水の個々の流れを合算した全海面流は、各要素の速度ベクトルを合成することにより、その速度と方向を求めることとなる。

一方、風の作用による漂流は風圧流と呼ばれ、搜索目標の海上露出部分が風圧を受けることで引き起こされる搜索目標の移動を指す。その速度は搜索目標の海上部分の風圧面積と、移動方向に対する水面下の投影面積の比によって決まり、また、風の速度に、更に、風圧流の方向については、搜索目標の水面下形状が一様でないことから風下方向から一定程度の偏角を持つことが知られており、これを風圧流偏角と呼ぶ。IAMSAR マニュアルには、搜索目標の種類及び平均風速に応じた風圧流の速度グラフが用意されている上、同グラフ上で風圧流偏角についても確認することが出来る。このことから、搜索目標の種類と海域に吹く風の情報があれば、風圧流の速度及び方向を知ることと比較的に達成可能である。

上記の様に全海面流及び風圧流の速度ベクトルが分かれば、それを合成することにより、全漂流の速度ベクトルを得ることが出来る。加えて、搜索者の搜索海域への移動時間を考慮して、搜索開始時刻を設定すれば、搜索目標の漂流開始時刻から搜索開始時刻までの漂流時間も求めることが出来る。最終的に、漂流開始位置を中心に漂流ベクトルを描くことで、漂流後の推定位置であるデイトムを求めることが出来る。このように地図上に一つの点として示されたデイトムのことを、デイトムポイントと呼ぶ。

2.3 総合確率誤差及び成功確率

デイトムポイントが正確に予測できるとすれば、搜索目標は必ずデイトム上に存在するはずであるが、実際には様々な要因によりデイトムポイントの位置には必ず誤差が含まれる。IAMSAR マニュアルでは、デイトムポイントの位置の誤差のことを総合確率誤差と呼ぶ。総合確率誤差は、デイトムポイントを中心として円を描いた場合、搜索目標がその円内に含まれる確率が50%となるような半径の大きさとして定義され、具体的には

$$E = \sqrt{X^2 + D_e^2 + Y^2} \quad (1)$$

で計算される。ここで、 X は漂流開始位置をピンポイントに特定出来ずに生じる漂流開始位置の確率誤差を表し、 D_e は漂流速度や方向を正確に推測出来ずに生じる漂流による確率誤差を表す。また Y については、搜索者自身が搜索中の自身の位置を寸分たがわず正確に測れることは困難なことから生じてしまう搜索者の位置の確率誤差を表す。 X 及び Y については、漂流開始位置及び搜索者の位置を特定する手段に応じて、値が決められる。船の設備が高度化している現在においては、多くの場合 GPS に頼って位置が測定されることがほとんどであり、その場合の誤差は $X = Y = 0.1[NM]$ となることから、比較的小さな値と言える。一方、 D_e については、2.2 節で述べた各漂流要素の速度を推測した際に生じる漂流速度の確率誤差と漂流時間の積として与えられ、総合確率誤差の多くを占める要素となる。これより、漂流時間が長くなるほど総合確率誤差も大きくなり、搜索活動が困難となることが分かる。

デイトムポイントの位置に必ず誤差が含まれる以上、デイトムポイントのみを搜索することで搜索目標の発見を期待することは現実的ではない。そのため、デイトムポイントを中心としてある程度の広さを持

つ搜索区域を決定し、効率的に搜索を実施する必要がある。IAMSAR マニュアルにおける搜索理論では最終的に、次の式で表される搜索目標の発見に成功する確率 (成功確率 POS) を最大化するような搜索区域及び搜索経路間隔を搜索実施者に提供することを目的とする。

$$POS = POC \times POD. \quad (2)$$

ここで、 POC は搜索目標が設定した搜索区域内に存在する確率 (存在確率) を表し、 POD は搜索目標が搜索区域内に存在するという条件の下で、搜索者が搜索目標を探知する確率 (探知確率) を意味する。

2.4 存在確率 POC の算出

漂流による推定結果に必ず誤差が含まれるとは言え、搜索目標の居る可能性はデイトムポイントで最も高く、そこから離れる程低くなると考えられる。このため、搜索目標の存在確率密度は、デイトムポイントを中心として等高線が真円となるような二次元正規分布で表現され则认为するのが自然である。

デイトムポイントを通るような垂直な平面で二次元正規分布を切断した場合、その断面は必ず正規分布となる。2.3 節で紹介した総合確率誤差の定義から、この正規分布の標準偏差 σ と総合確率誤差 E の間には $E = 1.1774\sigma$ の関係が成り立つ。今、デイトムポイントを中心に正方形の搜索区域を設定することを考え、デイトムポイントから搜索区域の端までの距離を αE とおく。こうすることで、 α の大きさを任意に変更することにより、搜索区域の大きさを変更することができ、本稿ではこれを搜索係数と呼ぶ。ここで、二次元正規分布及び総合確率誤差 E の性質から、 $\alpha = 3$ とした搜索区域を考えた場合、その中の POC はほぼ 100% となることが知られている。つまり、現実の搜索活動を考える場合、設定する搜索区域の一辺の長さは大きく見積もっても $6E$ に留めることが出来る。

この場合、デイトムポイントを中心にした二次元正規分布を考えた際の存在確率 POC は

$$POC = \left\{ \int_{-\alpha E}^{\alpha E} f(t) dt \right\}^2 \quad (3)$$

で計算出来る。ここで、 $f(\cdot)$ は期待値 0、標準偏差 σ の正規分布の確率密度関数を表し、 $E = 1.1774\sigma$ である。式 (3) から、 POC が搜索係数 α の大きさに応じて値が求められることは明らかである。また、この場合の搜索区域の大きさ (搜索面積) A は

$$A = 4\alpha^2 E^2 \quad (4)$$

で与えられる。

3 現行手法における最適搜索計画の策定

2 節の内容を踏まえ、現行の搜索計画手法における搜索区域及び搜索経路間隔の決定方法について整理する。現在の洋上搜索では主に、人間の目をセンサーとした搜索が行われることが一般的である。特に搜索目標が人などの比較的小さい目標である場合、レーダーにて目標を探知することは容易ではなく、人が双眼鏡を用いて目標発見に注力する必要がある。したがって現行手法では人の目の能力を定量的に評価することにより、探知確率 POD を求めている。

3.1 横距離探知確率曲線及び有効搜索幅

船舶等により自由に移動可能な搜索者と漂流のみで移動する目標との相対経路は、近似的に直線と捉えることが出来る。したがって、搜索理論では搜索者の発見能力は目標と搜索者との最接近距離である横距離 x の関数と考える。横距離 x の相対経路を通過する目標に対する探知確率を横距離探知確率 $P(x)$ と呼び、一般に以下の式で表すことが出来る。

$$P(x) = 1 - \exp(-F(x)). \quad (5)$$

人が目視で探知する場合の $F(x)$ は

$$F(x) = \frac{2ch}{\omega x^2} \quad (6)$$

によって与えられる。ここで、 c は搜索目標の大きさや見つけやすさに依存する比例定数であり、 h は搜索者の眼高を表す。また、 ω は搜索者と目標との相対速度である。人が目視で目標を探す場合の横距離探知確率 $P(x)$ は式 (5) に式 (6) を代入することで、求めることが出来る。

更に、横距離 x と横距離探知確率 $P(x)$ の関係を表した曲線を横距離探知確率曲線と呼ぶ。人の目に頼って搜索を行う場合、目標との横距離 x が 0 となる場合は $P(x) = 1$ となり、横距離 x が増加するにつれて $P(x)$ も漸次減少し、0 に近づいていくことは容易に想像出来る。今、ある搜索空間に搜索目標が一様に存在している状況を考える。この場合、任意の横距離探知確率曲線を持つ搜索者が搜索空間を一度だけ移動したときの期待目標探知数は有効搜索幅 W と呼ばれ、

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} P(x) dx \quad (7)$$

で計算される。有効搜索幅は搜索実施時のセンサーが持つ能力を示しており、大きい方がより優れたセンサーであると言える。各センサーに対して有効搜索幅を求めるためには多くの実験が必要とされるため、実用上は IAMSAR マニュアルに用意された一覧表に頼って求められる。IAMSAR マニュアルによれば、有効搜索幅は搜索時の気象海象や搜索目標の種類、航空機の高度等に応じて値が決定される。

3.2 現行手法における探知確率 POD の算出

搜索活動を実施する際、搜索勢力としては出来る限り効率的に搜索区域を回りたいと考える。そのため、搜索理論では最も効率的に搜索を実施する方法として並行搜索が推奨されている。並行搜索とは、長方形の搜索区域が与えられた場合に、搜索区域の長辺と並行な搜索経路を一定の間隔ごとに配置し、それらの経路間隔を保つ様に搜索を実施する方法である。3.1 節で示した横距離探知確率曲線を持つセンサーで、並行搜索を行った場合の探知確率 POD は

$$POD = \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{Z}{A} \right) \quad (8)$$

と表される。ここで、 Z は搜索努力量と呼ばれ、

$$Z = W \times V \times T \quad (9)$$

で表される。 V 及び T はそれぞれ搜索時の速度及び搜索に費やせる時間を表わすことから、 Z は搜索者が移動しながら搜索を行う際の搜索能力を表す指標である。搜索海域に派遣される勢力に関して、予めこれらの情報を集めていくことで、搜索努力量 Z は一意の値として計算することが出来る。

搜索実務の世界で並行搜索が最も効率的であることが知られているとはいえ、実際の活動は荒天下で行われることも多く、搜索者が必ずしも搜索経路の間隔を適切に保って搜索を実施できるとは限らない。その

ため、このような状況の評価するにあたっては、ランダム搜索と呼ばれる搜索手法も用いられる。ランダム搜索は、実際には実行不可能な搜索方法だが、搜索区域内の各地点を完全にランダムに搜索する方法を意味し、 POD の下限を与える性質を持つ。ランダム搜索を行う場合の POD は

$$POD = 1 - \exp\left(-\frac{Z}{A}\right) \quad (10)$$

と表される。式 (8) 及び式 (10) より、 POD はいずれも搜索努力量 Z と搜索面積 A の比に依存することが分かる。

これらの式は実務上、搜索環境によって使い分けることとされており、搜索環境が良好な場合には式 (8) を、通常の場合には式 (10) を利用することとなる。一般的に、搜索を実施するにあたって搜索者が用意出来る搜索努力量 Z には限りがある。一定の搜索努力量 Z を仮定した場合、探知確率 POD は存在確率 POC と同様に、搜索面積 A に応じて値が決まる。このことから、 POD も搜索係数 α の関数とみることが出来る。

3.3 最適搜索面積及び最適搜索経路間隔

2.4 節及び 3.2 節で説明した通り、 POC 及び POD は共に搜索係数 α の関数とみなせるため、一定の搜索努力量 Z の下で

$$\alpha^* = \arg \max_{\alpha} POS(\alpha) = \arg \max_{\alpha} \{POC(\alpha) \times POD(\alpha)\} \quad (11)$$

を解くことで、成功確率 POS を最大化する最適搜索係数 α^* を求めることが出来る。これより、式 (4) を用いて最適搜索区域の大きさ（最適搜索面積） A^* を容易に求めることが出来る。

また、実際に搜索活動を実施するにあたっては、搜索環境の良し悪しに関わらず、出来る限り効率的な搜索となる様に搜索経路間隔を維持することが重要となる。並行搜索を実施する場合にあっては、搜索面積 A 及び搜索経路間隔 S に $A = SVT$ の関係が成り立つことから、

$$\frac{Z}{A} = \frac{WVT}{SVT} = \frac{W}{S} \quad (12)$$

となる。このことから、最適搜索経路間隔 S^* は最適搜索面積 A^* 及び有効搜索幅 W を用いて、 $S^* = W \cdot A^* / Z$ で求めることが出来る。搜索者はデイトムを中心に一辺 $2\alpha^*E$ の正方形を設定し、その中を経路間隔 S^* を保ちつつ並行搜索することが好ましい。

4 提案手法における最適搜索計画の策定

4.1 横距離探知確率曲線及び有効搜索幅

3 節で述べた様に、現在の洋上搜索では主に、人間の目に頼った搜索が行われることが一般的である。したがって、その効率は搜索者の疲労度にも大きく影響を受けることとなる上、見落としを発生させない様にするためには多くの乗組員を搜索に従事させる必要がある。一定の搜索効率を常に担保することを目指す場合、人の目に頼った搜索には限界があることが明らかである。これに対し、本稿では近年技術革新の目覚ましい AI を搜索活動に組み込む状況を考える。具体的には、ドローンや無人航空機等に取り付けたカメラで洋上を撮影し、撮影された画像を AI に解析させることにより画像内にある目標を探知させることとする。カメラが真下を向いているとした場合、搜索目標がカメラの画角内に収まらない限り探知される確率は常に 0 である。一方、カメラの画角内に収まった目標に関しては、ある一定の確率で AI が探知可能であると仮定すると、この場合の横距離探知確率 $P(x)$ は次の様に表される。

$$P(x) = \begin{cases} p_0 & (x \leq r_0) \\ 0 & (x > r_0) \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 r_0 はカメラを中心とした撮影可能範囲を表す。本稿では、カメラに映った目標が探知される確率 p_0 をスキャン確率と呼ぶ。また、式 (7) の有効搜索幅の定義から、式 (13) の横距離探知確率を持つセンサーの有効搜索幅は $W = 2r_0p_0$ と容易に計算できる。

4.2 提案手法における探知確率 POD の導出

4.1 節で示した横距離探知確率曲線を持つセンサーで、並行搜索を行った場合の探知確率 POD を考える。この場合、 r_0 と経路間隔 S の大小によって、次の 2 つの場合が考えられる [2]。

(1) $kS \leq r_0 < (2k+1)S/2$ の場合

横距離 x が $0 \leq x \leq r_0 - kS$ あるいは $(k+1)S - r_0 \leq x \leq S$ の目標に対する探知の機会は $2k+1$ 回訪れるため、探知確率は以下の通りである。

$$P_1(x) = 1 - (1 - p_0)^{2k+1}. \quad (14)$$

一方、 $r_0 - kS < x < (k+1)S - r_0$ の目標に対する探知の機会は $2k$ 回訪れるため、探知確率は以下の通りである。

$$P_2(x) = 1 - (1 - p_0)^{2k}. \quad (15)$$

以上から、式 (14) 及び式 (15) の期待値を取ることで、探知確率 POD は

$$\begin{aligned} POD &= \frac{1}{S} \left[\int_0^{r_0 - kS} P_1(x) dx + \int_{r_0 - kS}^{(k+1)S - r_0} P_2(x) dx + \int_{(k+1)S - r_0}^S P_1(x) dx \right] \\ &= 1 - (1 - p_0)^{2k} \left\{ 1 - p_0 \left(\frac{W}{p_0 S} - 2k \right) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

となる。

(2) $(2k+1)S/2 \leq r_0 < (k+1)S$ の場合

(1) と同様に、横距離 x が $0 \leq x \leq (k+1)S - r_0$ あるいは $r_0 - kS \leq x \leq S$ の目標に対しては、探知の機회가 $2k+1$ 回訪れることから、探知確率は式 (14) で与えられる。一方で、 $(k+1)S - r_0 < x < r_0 - kS$ の目標に対する探知の機会は $2(k+1)$ 回訪れるため、探知確率は以下の通りである。

$$P_3(x) = 1 - (1 - p_0)^{2(k+1)}. \quad (17)$$

以上から、式 (14) 及び式 (17) の期待値を取ることで、探知確率 POD は

$$\begin{aligned} POD &= \frac{1}{S} \left[\int_0^{(k+1)S - r_0} P_1(x) dx + \int_{(k+1)S - r_0}^{r_0 - kS} P_3(x) dx + \int_{r_0 - kS}^S P_1(x) dx \right] \\ &= 1 - (1 - p_0)^{2k+1} \left\{ 1 - p_0 \left(\frac{W}{p_0 S} - (2k+1) \right) \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

となる。

式 (16) 及び式 (18) によって表される探知確率は次のように表現することが出来る。

$$POD = 1 - (1 - p_0)^\beta (1 - p_0^\gamma), \quad (19)$$

ここで、 β 及び γ はそれぞれ

$$\beta = \left\lfloor \frac{W}{p_0 S} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{Z}{p_0 A} \right\rfloor \quad (20)$$

$$\gamma = \frac{Z}{p_0 A} - \beta \quad (21)$$

である。

搜索に用いるセンサーが決まった時点でスキャン確率 p_0 は一意に定まると考えられることから、式 (19) の POD についても、搜索係数 α の関数となる。そのため、式 (11) の POD に式 (19) を代入することで、提案手法についても成功確率 POS を最大化する最適搜索係数 α^* を求めることが出来る。同様に、求めた最適搜索面積 A^* から式 (12) を満たす最適搜索経路間隔 S^* を得ることで、提案手法においても IAMSAR マニュアルの大枠を崩すことなく、効率の良い搜索活動を実施することが可能であると考えられる。

5 数値例

本節では、様々な条件下での提案手法の性質を確認すると共に、その優位性を測るための数値例を示す。現行手法と提案手法では本来、想定する勢力が異なるため搜索努力量にも大きな差が出来る可能性が高く、同じ条件を与えた上での単純比較は適切ではないと考えられる。しかしながら、本稿においては提案手法のセンサーがどのような搜索環境においてより効果的となり得るのかを把握するため、現行手法との比較結果についても考察する。

5.1 探知確率 POD 及び成功確率 POS の比較

搜索努力量及び総合確率誤差をそれぞれ $Z = 10$ 及び $E = 1$ と想定した場合の探知確率 POD 及び成功確率 POS の違いを図 1 及び図 2 に示す。搜索努力量 Z は投入される搜索努力量の大きさを表し、総合確率誤差 E は搜索における位置の誤差の大きさ（搜索目標の位置の不確かさ）を表す。図 1 及び図 2 は共に横軸に搜索面積 A を取り、縦軸はそれぞれ探知確率 POD 及び成功確率 POS を表す。また、提案手法についてはスキャン確率を $p_0 = 0.4, 0.6, 0.8$ と変化させた場合の三種類の結果を表示する。図 1 では、現行手法と提案手法について互いの POD を上回る搜索面積 A の区間がどれほど大きいかに着目する。 POD は POS を構成する要素の一つにすぎず、その値の大小のみでは POS の優劣を測る事が出来ない点には留意が必要である。一方、存在確率 POC については搜索面積 A のみに依存することから、同じ E を想定する場合は両手法の間で変化がないため、ここでは考察対象としない。

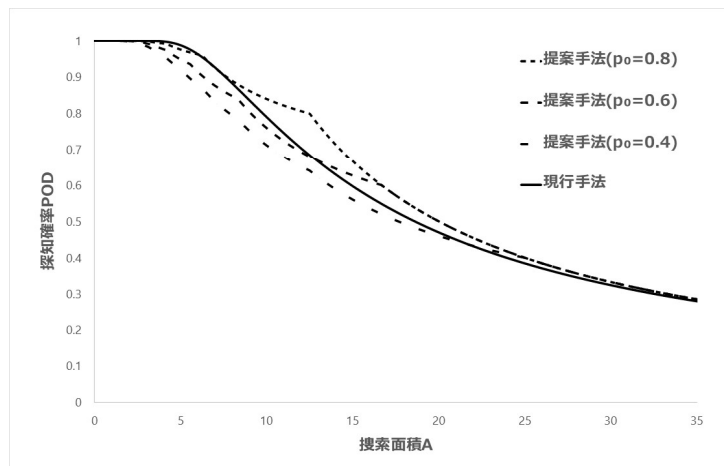


図 1: 探知確率 POD の比較。

図 1 から分かる通り、搜索面積 A が増加するにつれて、現行手法では POD がなだらかに減少するのに対して、提案手法ではある値を境に減少度合いが急激に変化する点が存在することが読み取れる。つまり、

提案手法の POD は一部の搜索面積 A において下から突き出す様な形状に見える．この性質により，いずれのスキャン確率 p_0 の場合についても，提案手法には現行手法を上回る POD となる搜索面積 A の範囲が存在する．提案手法の POD 曲線が角を持つ時の搜索面積 A の値を確認すると，式 (20) の β がちょうど $W/(p_0 S)$ と一致する場合であることが分かった．つまり式 (21) において $\gamma = 0$ となる場合に提案手法の POD は大きな値を取りやすく，その様な搜索面積 A の近辺において，現行手法より優れた POD を示しやすいことが確認された．また，いずれのスキャン確率 p_0 を持つ提案手法であっても，搜索面積 A が大きな範囲においては任意の搜索面積 A に対して同じ値の POD を取るようになることが分かる．これは，式 (19) より $\beta = 0$ となる範囲については，探知確率 $POD = S/W = Z/A$ となることから，提案手法の POD がスキャン確率 p_0 に依存しなくなるためと考えられる．

図 2 では，図 1 と同じ条件の下で，現行手法と提案手法の成功確率 POS を比較した．同一条件下における現行手法及び提案手法の優劣を測るため，どちらの手法がより大きな POS の最大値を示すかについて着目する．

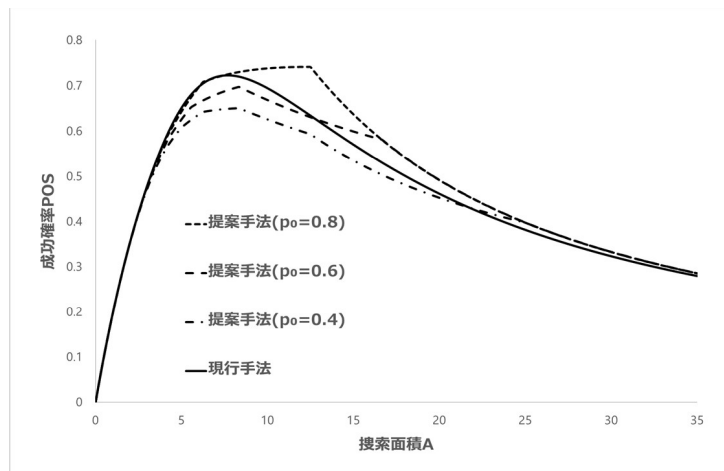


図 2: 成功確率 POS の比較．

図 2 を見ると，スキャン確率 $p_0 = 0.8$ の提案手法の最大 POS が現行手法の最大 POS を上回っていることが分かる．また，他のスキャン確率においても現行手法の POS を上回るような搜索面積 A の区間を有していることが分かる．これは提案手法の POD が一部の搜索面積 A において下から突き出す様な形状を持つという性質によるものと考えられる．この性質により存在確率 POC と乗算されて算出される POS についても一部角張った形状となり，結果的に同一条件においてもスキャン確率 p_0 次第では提案手法の POS が現行手法を上回ることがあると分かった．また，提案手法が最大 POS を実現する搜索面積 A の大きさに関しては，いずれの場合も POS が角ばった形状の時，つまり， POD が角を持つ場合であることが読み取れる．このことから，提案手法において最大 POS を実現する搜索面積 A についても， $\beta = W/p_0 S$ ($\gamma = 0$) が成り立つ場合であることが確認出来る．

5.2 搜索条件の変化に応じた優位性の比較

続いて，様々な条件下において，現行手法と提案手法の比較を行い，提案手法が優位となる条件を確認する．図 3 は総合確率誤差を $E = 3$ と固定した上で，搜索努力量 Z 及びスキャン確率 p_0 を変化させた場合に，より大きい最大 POS を示した手法を色別に表示したものである．横軸の搜索努力量及び縦軸のスキャン確率がそれぞれ任意に与えられたとして，提案手法の POS が上回った場合を薄い色で表示し，現行手法が上回った場合を濃い色で示している．つまり，色の薄い部分は提案手法の最大 POS が上回っている領域

を、濃い部分は現行手法の最大POSが上回っている領域を表す。図3から、搜索努力量 Z が小さくなるほど提案手法の最大POSが上回る領域 (色の薄い部分) が広がることが明らかとなった。このことから特に搜索努力量 Z が小さい場合において、より小さいスキャン確率 p_0 を持つ提案手法であっても現行手法を上回ることが出来ると分かった。

更に、総合確率誤差 E が変化した場合の両手法の優位性を確認する。搜索努力量を $Z = 10$ と固定した上で、総合確率誤差 E 及びスキャン確率 p_0 を変化させた場合に、より大きい最大POSとなる手法を示す。図4から総合確率誤差 E が大きくなるほど、提案手法の最大POSが現行手法を上回る領域が広がっており、提案手法が優位となることが確認出来た。

両手法の優位性を確認することで、提案手法は搜索努力量 Z が小さいほど、または、総合確率誤差 E が大きいほど現行手法よりも優位となることが分かった。搜索努力量 Z は投入する搜索勢力の大きさを表し、総合確率誤差 E は搜索目標の位置情報の不確かさを示すことから、提案手法は投入できる搜索勢力が小さく、搜索対象の位置誤差や漂流量が大きくなる様な厳しい搜索条件において活躍が期待できるといえる。厳しい搜索条件となる実例としては、日本遠方海域で船舶が遭難した場合の搜索等が挙げられる。遠方海域での遭難では搜索区域に即座に投入できる巡視船や航空機といった搜索勢力は限られてしまい、また遭難現場付近への到着には時間も要することから漂流量も大きくなる。このような状況では、搜索努力量 Z は小さく、総合確率誤差 E が大きくなる厳しい搜索条件が揃い易いと考えられる。

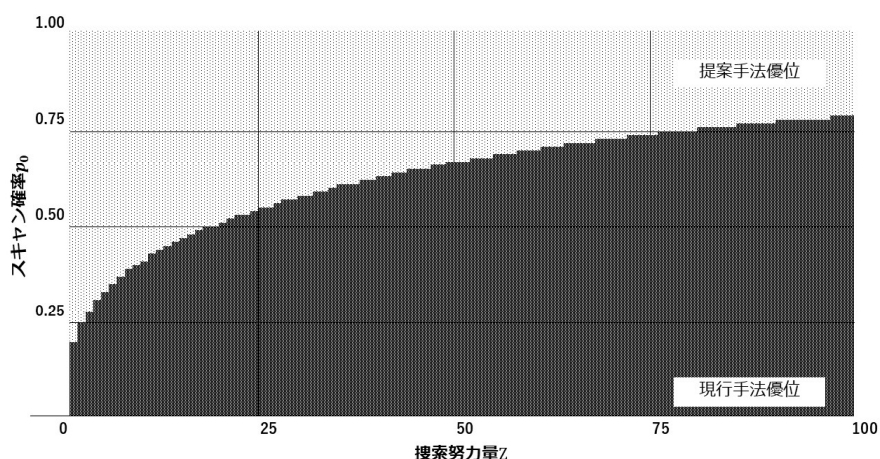


図 3: 搜索努力量 Z に関する優位性比較。

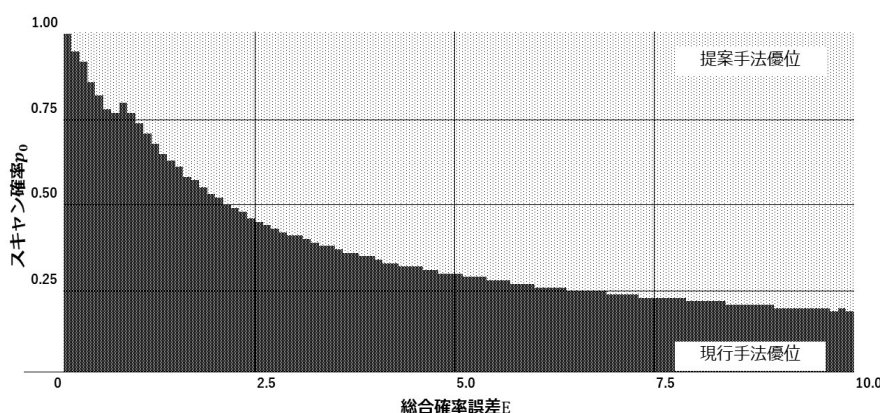


図 4: 総合確率誤差 E に関する有意性比較。

6 まとめと今後の課題

海難発生時の搜索効率は搜索救助の成功確率と密接に関わっており、搜索手法の多様化や搜索モデルの改善を行うことで、より一層向上することが期待されている。中でも特に全世界の搜索活動の基礎を築く IAMSAR マニュアルの改良は、発展途上国を含む多くの国々における搜索事案において、大きな成果を生む可能性を秘めている。日本においては近年シーガーディアンと呼ばれる大型無人航空機の導入が進み、今まで以上に長時間に亘って、詳細かつ広範囲な搜索を行うことが出来る準備が整いつつある。本稿では近年目覚ましい発展を遂げているドローンや AI といった新技術に着目し、現行の目視による搜索に捉われず、搜索効率の大幅な改善を期待できる AI 画像解析を搜索理論に組み込むことを提案した。新たなセンサーの探知能力をモデル化することにより新技術を導入した場合の探知確率 POD を算出し、得られる最適搜索面積の特徴を掴むことができた。さらに数値実験を通して、搜索勢力が十分に集まらず、また漂流時間が長いなどの搜索者にとって不利な状況において、提案手法が目視搜索よりも優れた結果を導くことを示した。これはつまり、従来の搜索手法が苦手としたケースにおいて救い切れなかった搜索目標の人命にまで、提案手法を用いることにより手が届く可能性が高まることを意味する。更に言えば、提案手法で想定する AI 画像解析技術が夜間での搜索においても一定のスキャン確率を持つとすれば、これまでの目視搜索ではほとんど歯が立たなかった夜間搜索においても、飛躍的な搜索効率向上に寄与することが期待出来る。

実際の運用においては AI が探知した目標物を船艇等を通じて確認する作業が必須となる。AI による探知に誤りが含まれる可能性がある限り、探知された物体が必ずしも真の搜索目標であると断定することは出来ない。そのため救助船艇としては、AI が目標を探知する度に、その探知地点を巡っていくことになる。そうならば、今後の課題として、従来の搜索理論では考慮されていない洋上における探知地点の効率的な周回について検討し、より搜索目標の生存可能性を引き上げる様な救助プランの策定を考案する必要がある。

参考文献

- [1] Y. Dachev and V. Zlatev, “Search for an Object in Distress by Improved Scheme of the IAMSAR Expanding Square Methodology,” *Journal Environment and Development, WSEAS*, **14**, pp.446-450, 2018.
- [2] 宝崎隆祐, 飯田耕司, 「搜索理論における確率モデル」, コロナ社, 2019.
- [3] International Maritime Organization, *International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual 2022 Edition, vol. II*, IMO Publication, London, 2022.
- [4] 海上保安庁, “令和 5 年版 海上保安統計年報 74 巻”, URL:https://www.kaiho.mlit.go.jp/doc/tokei/r5tokei/toukei2023_74.pdf (閲覧: 2024-10-2) .
- [5] B. O. Koopman, *Search and Screening, Operations Evaluations Group Report No.56*, Center for Naval Analyses, Alexandria, VA, 1946.
- [6] A. Sulaiman and K. Pierce, “Modelling Maritime SAR Effective Sweep Widths for Helicopters in VDM,” *arXiv e-prints*, arXiv: 2304.00983, 2023.
- [7] P. Xiong, H. Liu, Y. Tian, and Z. Chen, “A time domain-based iterative method for helicopter maritime search area planning and construction of the simulation environment,” *IEEE Access*, **8**, pp.191460-191471, 2020.