

# 効果的な搜索を科学する

宝崎 隆祐

キーワード：探索理論，無人航空機，数理計画法

本稿は、2013年度防衛大学校理工学研究科に提出された探索問題に関する中村 俊哉さんの修士論文をもとにしています。

中村氏の論文は、今はやりのドローン、一般的な呼び名としての無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) による搜索任務を効果的に行うために、その飛行経路を決定する問題へ探索理論を適用した研究です。

## 1. オペレーションズ・リサーチと探索理論

ここで解説するのは、オペレーションズ・リサーチ (略して、OR) という学問分野の中の探索理論という研究テーマです。OR を世界に普及させた著書として、モースとキンボールが書いた『オペレーションズ・リサーチの方法』[1] という有名な本があります。その中には、第二次世界大戦中に日本の特攻機による攻撃に悩んでいた米海軍の軍艦に向けて、アメリカの分析者が提案した対処法が載っています。高々 200 ケースばかりのデータではありますが、分析者たちはまず大型艦と小型艦で、回避運動をした・しなかったかで特攻機の軍艦に対する命中率の変化を調べ、「大型艦は回避運動をせよ。小型艦は回避運動をせずに特攻機を攻撃せよ」と提案し (理由は欄外参照<sup>1</sup>)、現場で大きな効果を得ました。現代のわれわれからすると、このような分析はビジネス界をはじめどこでもやっていることだと思ってしまう。ところが、このように客観的なデータを使い、合理的、科学的に考察し、問題の解決策を見つけるということは、当時コロンブスの卵だったのです。その証拠として、イギリスで誕生した OR は、戦時中、秘密裡に米国に譲り渡された軍事技術の一つだったことが挙げられます。

OR を米国が効果的に使ったもう一つの分野が、当時大西洋での海上輸送にとって大きな脅威であったド

イツの U ボート (潜水艦) に対する作戦でした。1939 年 9 月の第二次世界大戦勃発時から約半年間で大西洋で作戦していた U ボートは平均 6 隻でしたが、その戦果は甚大で月間 26 隻 10.6 万トンの船を沈めていました。それに対抗する英国の努力も並々ならないもので、月間では 6 隻の U ボートのうちの 2 隻を撃沈していて、ドイツ側も絶え間なく U ボートを建造せざるを得ない状況でしたが、その戦果には満足していました。U ボートに対抗するための科学的機器としては、当時の英国でアスディックと呼ばれたソナー (超音波探知機) や潜水艦を攻撃するための爆雷がありました。また、戦術的なやり方としては、第一次世界大戦からの教訓もあり、複数の商船を一同として水上艦艇で護衛する船団護衛がありました。このような U ボートへの対抗手段として、米国では OR による考え方が役立ちました。米海軍におけるこのような活動を学問的見地から纏めた著書が、クープマンの『搜索と直衛』[2] です。直衛とは船団護衛のことです。もっと大きな枠組みとして、作戦そのものを秘密裡に伝達するためには暗号が使われますが、当時のドイツ海軍が使用する暗号エニグマは決して解読できないと思われていました。ところが、その解読にイギリス人のアラン・チューリングが成功します。これにより、U ボート攻撃からの被害を大いに軽減したとされていますが、彼の解読アルゴリズムはその後のコンピュータ誕生にも大いに寄与します。戦時中のこのような絶大なる貢献にもかかわらず、残念ながら彼の後半生は不幸だったのですが、興味のある方は 2015 年に日本でリリースされた映画「イミテーション・ゲーム」の DVD を観てください。

さて今更ながらですが、探索理論とは何かと言えば、対象とする物 (目標物) を効率的に探すための学問と言えますが、その起源は、潜水艦という、隠密裡に行動しその存在を示すわずかな兆候しか残さないものを効率よく探す戦時中の実学 (実際に役立つことを狙った学問) だったのです。このような探索理論は、今では

ほうぎき りゅうすけ

防衛大学校

〒 239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

hozaki@nda.ac.jp

<sup>1</sup> 実データから実証されていますが、小型艦に搭載した対空砲が回避運動による動揺から特攻機に対する命中精度をかなり低下させるためです。

海難救助に大いに役立っていて、救難で使用する共通の評価指標が掲載された国際航空海上捜索救難マニュアルが国際機関から発行され、船舶や航空機に対する複数国による協同の捜索救難活動に使われています。

## 2. 無人航空機の経路決定法

前置きが長くなりましたが、冒頭に紹介した探索理論の応用例に関する修士論文を紹介したいと思います。使用した OR の手法は数理計画法です。この方法は、評価尺度を示す目的関数と制約条件で定式化されることの多い最適化問題を解くための一つの手法です。

中村氏の最適化問題では、複数の UAV の経路を示す変数として  $x_{uat}$  を使っています。これは  $u$  番目の UAV が時点  $t$  で地域  $a$  を飛ぶなら値 1 をとり、そうでなければ 0 をとるいわゆる 0-1 変数と呼ばれるものです。これにより、各時点での UAV の位置を表すことができます。目的関数で目標物の発見確率を、制約式で UAV の運動に対する制約を表現します。ここでは発見確率の式だけでも説明しましょう。目標物がどこを通っているかはわからないので、捜索側は得られた情報に基づきその移動シナリオをさまざまに憶測します。シナリオ  $s$  が時点  $t$  で地域  $a$  (面積を  $d_a$  とする) を通過するのに費やす時間を  $\tau_{as}(t)$  としましょう。シナリオ  $s$  を目標物がとるもつもらしさを重み、あるいは確率  $q(s)$  で表します。UAV  $u$  の速力を  $v_u$  とし、探知センサー (たとえば、UAV 搭載の CCD カメラを使った人間の目) の探知効率として、有効捜索幅と呼ばれる指標を使います。これは目標物と捜索者がすれ違ったときに (波間に漂う遭難者に対する救難活動では、このような状況がよく考えられます)、距離  $W/2$  以内だと確実に発見し、それ以遠だと決して発見できないという理想化されたセンサーに置き換えた場合の距離  $W$  のことです。有効捜索幅は、海上での多くの実験を通じて、上述した国際航空海上捜索救難マニュアルにも色々なケースについて記されています。UAV  $u$  の地域  $a$  での有効捜索幅を  $w_{ua}$  とします。ここで時点  $t$  で時間  $\Delta$  の間 UAV が捜索を実施した場合、探索理論が教える目標物の発見確率は  $1 - \exp(-\Delta \tau_{as}(t) v_u w_{ua} x_{uat} / d_a)$  です。かくして、複数の UAV による目標発見確率は、

$$1 - \sum_s q(s) \exp \left( - \sum_u \sum_a \sum_t \frac{\Delta \tau_{as}(t) v_u w_{ua} x_{uat}}{d_a} \right)$$

となります。すべての  $u, a, t$  に対し目標物を発見で



図 1 UAV から目標物を見たシミュレーション画面

きない確率を掛けたものが第 2 項で表されることから、上式は少なくとも 1 回、ある UAV が、いつか、どこかで目標物を発見する確率を表しています。この目的関数を最大にする  $x_{uat}$  を求めることで、複数 UAV による最適な経路が求まります。中村氏の定式化では、各 UAV をコントロールする地上管制局の最適な位置の決定や、目標物が見つからない場合の重み  $q(s)$  の修正法も考えられています。このような解法で求めた UAV の経路をシミュレーション上で再現し、UAV から目標物とした乗用車を見たワンカットが図 1 です。目標物近くの上空に UAV を飛ばせていることがわかります。

## 3. おわりに

本稿では、探索理論とその関連研究を簡単に解説させていただきました。最後に、2016 年 5 月に北海道で小学 2 年生の児童が行方不明になった事件に触れたと思います。このような人命のかかった捜索に対し、探索理論では、寿命のある目標物に関する捜索問題があります。上述した研究と同じような考えの下で、生存の限度と言われる 72 時間以内の発見確率を目的関数とし、救助に使える人的資源の制約式の下で、この確率を最大にする問題を解くのが適切かと思えます。その際、地形、植生に鑑みた捜索隊の発見効率や対象物の初期の所在分布を含めた移動シナリオが最も定量化し難いものではありませんが、1 日の捜索活動終了後には、これら発見効率やシナリオ重み  $q(s)$  については確率論を用いて修正し改善しつつ、次の日の捜索計画立案に備えることとなります。

### 参考文献

- [1] P. M. Morse and G. E. Kimball, *Methods of Operations Research*, MIT Press, 1951.
- [2] B. O. Koopman, Operations Evaluation Group Report No. 56: Search and Screening, Office of the Chief on Naval Operations, Navy Department, 1946.