

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 11 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350447

研究課題名(和文) 緊急事態対処ビークルの効果的使用を目的とする計画立案・評価システムの開発

研究課題名(英文) Development of a planning and evaluation system to support an effective operation of vehicles used for emergency handling

研究代表者

宝崎 隆祐 (HOHZAKI, Ryusuke)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・電気情報学群・教授)

研究者番号：20546048

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：3年間にわたる研究の結果、緊急事態対処ビークルの効果的使用に関する次の成果を得た。(1)無人航空機の任務及び運行を含むモデル構築と任務遂行に関する最適経路決定法の提案、(2)従来型のビークル(救急ヘリや救急車)の配置や運行問題の解決に資する成果、(3)緊急事態全般の取扱いを可能にする汎用的で柔軟な時空間ネットワーク表現と探索・救難任務に関する汎用的最適化手法の提案、(4)航空機、鉄道等の大量輸送網の事故に関する実データの分析、(5)地震、津波災害等天災に関する実データの分析、(6)その他。提案した解法の幾つかはコンピュータ上での数理計画計算システムとして実現した。

研究成果の概要(英文)：Through our activities about an effective usage of emergency-handling vehicles, we contributed to the followings; (1) modeling of operation and mission of unmanned aerial vehicles and an optimal routing for their missions, (2) optimal deployment and operation of ordinary vehicles (emergency helicopters and ambulances), (3) a general representation of time and geographical space adaptive to handling emergency vehicles and general optimization methodologies for the vehicles' missions, (4) analysis on actual data about accidents of public transportation systems such as airplane and railway system, (5) analysis on actual data about disasters such as earthquake and tsunami, and (6) others. We developed a computer system on PCs by installing some developed mathematical methodologies.

研究分野：オペレーションズ・リサーチ、探索理論、意思決定

キーワード：オペレーションズ・リサーチ 探索救難

1. 研究開始当初の背景

大規模災害等で様々な障害物の散乱する地域や原子力発電所事故等により人間の近接が困難な地域における捜索救難任務及び観測任務には、近年その開発が盛んである無人航空機(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)の運用が効果的である。また、地震等自然災害において多くの被害者が想定されるケースでは、救急ヘリや救急車等の従来型のビークルを効果的に運用することが必要である。近年の開発品も含め、このような様々な緊急事態対処に供するビークルの効果的な任務遂行のためには、システムとしての計画立案・評価ツールが必要であるため、本科研費研究ではこれを研究対象にしようと思いついた。

2. 研究の目的

緊急事態対処用ビークルの任務を支援する計画立案・評価システムの開発には、任務全体に関するモデルの構築と評価尺度の設定、任務を最適化する手法の開発、さらには開発するシステムの効果の検証に係わるシミュレーション技法を準備する必要がある。本科研費研究では、以上の機能開発にオペレーションズ・リサーチ(OR)の技法を活用しようとするものである。

3. 研究の方法

大きくは以下の2項目を具体的な研究目標とした。

- (1) 初年度には、新しい技術である無人航空機(UAV)を対象に、その任務及び運行全般のモデル構築と任務を最適に達成するための飛行経路決定手法開発に、線形計画法及び動的計画法の数理計画法を用いる手法開発を行う。
- (2) 上記の手法開発が終了した後の年度では、従来型のビークル(救急ヘリや救急車)の配置や運行問題、さらには緊急事態全般の取扱いを可能にする汎用的で柔軟なネットワーク空間による表現と、緊急事態対処における重要な活動としての捜索・救難活動に資するため、グラフ理論、探索理論、ゲーム理論を援用した任務最適化手法の開発を行う。

4. 研究成果

前項で述べた「UAVを用いた任務達成のための最適飛行経路決定法の開発」、「従来型のビークルの効果的な配置や運行問題に関する提案」、「緊急事態対処のための汎用的なネットワーク空間表現と捜索・救難活動の最適化」の他、「航空機、鉄道等の大量輸送網の事故に関する実データの分析」及び「地震、津波災害等天災に関する実データの分析」について成果を得た。 に関し

ては雑誌論文2編と発表3件、 、 、 、 に関しては、それぞれ雑誌論文2、9、6、3編、発表に関しては1、15、5、1件の公表を行っており、まんべんなく成果をあげている。その中で と についての成果の概要を以下で解説する。

(1) UAVの最適経路決定法

UAVの最大の利点は、安価で、搭乗員の疲労や危険を考慮せずに運用ができることであり、Dangerous(搭乗員の生命にリスクを与える危険性)、Dirty(汚染された空域)、Dull(単調な繰り返し)な任務に適している。東日本大震災では米軍のUAVによって福島第1原子力発電所の原子炉建屋が撮影されている。一方その操作性は有人機には遙かに及ばず、その任務達成度は低い。このような任務達成をOR技法により支援しようとする試みは、特に米国で幾つかある。

文献 ではUAVに搭載されたセンサーの探知効率を示す有効探索幅という特性値を用い、探索理論による探知確率の評価式を組み込んで、探索目標の発見確率を最大にするという捜索任務に特化した飛行経路を線形計画法により求めている。しかし、UAVの任務には、捜索任務、情報収集任務等があり、任務ごとに評価尺度は異なり、またUAVの運動制約を正確に取り扱うためには線形計画問題が扱う線形な式以上の複雑な式を扱う必要があり、それに適した手法として我々は動的計画法を利用した飛行経路決定法を提案した。

UAV搭載のCCDカメラによる人間の認識力を使った昼間での捜索任務と情報収集任務を考える。捜索任務にあっては、探索目標が複数の移動シナリオをもつ可能性を考慮し、発見できない場合のシナリオ更新法も加味してUAVの稼働時間内での発見確率最大化を考える。一方の情報収集任務にあっては、複数の対象目標と移動シナリオデータから、各目標から得る価値の異なる情報の要求量を可能な限り満たすように、目標への接近を可能にする飛行経路を決定することを考える。また、固定翼と回転翼のUAVそれぞれに稼働時間や速度、飛行高度等に長所、短所があるため、それぞれの飛行経路決定法を準備する。両者の差は特に運動制約に現れ、固定翼UAVは回転翼UAVには無い針路変更の際の最小旋回半径という制約がある。以上を考慮した「捜索任務」の飛行経路決定のためのモデルの概略を以下に記す。

(A1) UAVが飛行する3次元ユークリッド空間内をサイコロ状にメッシュに切り、各ノードの座標データを得る。UAVの稼働時間帯を離散時点で設定する。

(A2) 目標に移動シナリオを複数準備しておく。また、目標がそれらを選択する確率を想定する。これらは移動シナリオに関する情報

の多寡、確実度に依存する。

(A3) UAV の離陸地点、着陸地点、運用時間、飛行速度を設定する。

(A4) 目標の視認に関するモデルとして、対象物が CCD カメラからの視線に張る立体角が発見確率に影響するという「逆 3 乗発見法則」を仮定する。その他、目標の可視性、空間での視界等も考慮した視認度に関するある評価式を仮定する。

(A5) 探索任務の評価尺度を、各シナリオに沿った移動を行う目標の総視認度をシナリオ確率で重み付けした期待視認度として、これを最大化するような飛行経路が最適であるとする。

情報収集任務のモデルでは、前提(A2)と(A5)のみが次のように異なる。

(A2') 複数の移動シナリオそれぞれに沿って移動する目標がある。その目標情報の相対的な重みと情報収集者が要求する視認度の総和(要求視認量)が設定されているとする。

(A5') 情報収集任務の評価尺度は、UAV 飛行により各シナリオ毎に実際に得られる総視認度と要求視認量の比(情報収集率)のシナリオ全体における総和(任務達成率)であり、これを最大化することが飛行経路の最適化となる。

動的計画法による解法では、UAV が時点 t にノード j を出発するとした場合のそれまでの最適な飛行により達成される評価尺度を $f_j(t)$ とし、 $f_j(t)$ とノード j の隣接ノード i での $f_i(z)$ との関係式を求め、飛行開始地点での $f_s(0)=0$ から逐次的に $f_j(t)$ を求めていくことで任務終了時点での最大評価値を計算する。

下図は、情報収集任務に関し求めた飛行経路のある時点における UAV から目標の車を見下ろしたシミュレーション画像である。



(2) ネットワーク上での探索ゲーム

遭難者の探索救難においてそうであるように、探索問題においては目標の初期位置が

その後の探索の結果の帰趨を大きく左右するものの、通常この情報は目標のみしか知らない。探索者と探索目標双方が意思決定者として参加する探索ゲームに関する従来研究では、すべての情報がプレイヤーに知られている情報完備ゲームのモデルのみが取り扱われてきた。この研究では、初めて目標の初期位置を個人情報として取扱った不完備情報探索ゲームをモデル化し、プレイヤーの最適戦略の導出と分析を行った。このモデルの概要は以下のとおりである。

(B1) 探索空間は離散地理空間と離散時間空間から成るとする。

(B2) 目標の初期位置は、目標の知る個人情報であるが、探索者はそれをある確率分布で推定する。

(B3) 目標はその初期位置からある初期エネルギーをもって空間上を時間とともに移動するが、1 時点での移動範囲は制約があり、移動にはエネルギー消費が伴う。初期エネルギーを使い尽くせば現在地点から移動できない。そのような制約を満たす 1 つの移動パスをとることが、目標の純粋戦略である。

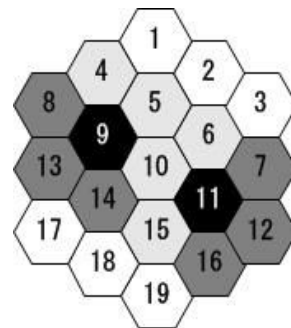
(B4) 探索者は各時点で一定量の探索資源を地理空間上に分割・投入して、目標を探知しようとする。探索者の戦略は各時点での各地点への投入資源量を定めることである。

目標の存在するセル i に投入した資源量 x により、目標は確率 $1 - \exp(-a_i x)$ で探知される。パラメータ a_i はセル i の探知効率を示す。

(B5) このゲームの支払は探知確率であり、目標はこれを最小に、探索者は最大にすべく行動する。

この研究では、目標に対して各移動パスをある確率でとるとする混合戦略を考えることで、以上の 2 人ゼロ和の情報不完備探索ゲームを線形計画問題へ定式化して解き、探索者の最適探索計画と目標の最適パス選択確率を求める解法を提案した。

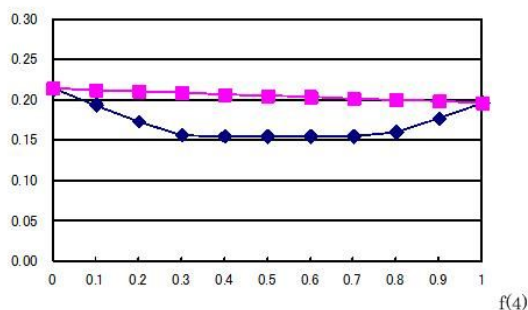
提案した解法を適用した数値例を次で示そう。探索空間には下図のように蜂の巣型にセル $1, \dots, 19$ が配列されており、時点は $t=1, \dots, 5$ ある。



セル 9 と 11 は障害物で目標の移動も探索もできず、その近くでは探索効率が悪い。具

体的な a_i の設定値は、セル $i=1,2,3,17,18,19$ に対しては 0.7 、 $i=4,5,6,10,15$ に対しては 0.5 、及び $i=7,12,16,8,13,14$ に対しては 0.3 である。目標はいつでも現在地の隣接セルと 2 隣接セルには一度で移動可能であるが、前者の移動にはエネルギー量 1 を、後者では 4 を消費する。探索者は時点 $t=2$ から探索を開始でき、各時点で手持ち量 1 の探索資源が利用可能である。目標の初期位置としてセル 4 と 2 の 2 つの可能性があり、探索者が推定する前者の確率を $f(4)$ とする。

下図の菱形の曲線は初期エネルギー 4 の設定に対し、 $f(4)$ を変化させた場合のゲームの値、すなわち期待探知確率を図示したものである。比較のために引いた四角の直線は、目標の初期位置を探索者が知っている場合の期待探知確率であり、両曲線の差が初期位置情報の価値ということになる。



当然、本モデルでは、目標の初期位置に関する探索者の無知のため、直線よりは常に低い探知確率しか得られない。この他にも目標の最適移動戦略に関する分析では、各移動パスを取る確率をチェックすることで、探知効率 a_i の小さなセルでの目標の通過具合や各時点での存在分布の変化を分析できた。また、探索者の最適資源配分をチェックすることで、目標の存在分布やセルの探知効率に適應させた合理的な資源配分計画の特徴などを明らかにできた。

< 引用文献 >

M. Kress, J.O. Royset, Aerial search optimization model (ASOM) for UAVs in special operations, Military Operations Research, Vol.13, 2008, pp.23-33

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 30 件)

Hozumi Morohosi, Takehiro Furuta, Two Approaches to Cooperative Covering Location Problem and its Application to Ambulance Deployment, Operations Research Proceedings 2015, 査読有, 2017, pp.361-366
宝崎隆祐, 効果的な搜索を科学する、オペ

レーションズ・リサーチ、査読有、61 巻、2016、pp.664-665

N.B. Parwanto、大山達雄、東日本大震災の影響と復旧・復興に関する定量的データ分析、オペレーションズ・リサーチ、査読有、61 巻、2016、pp.210-217

山口剛志、三和雅史、大山達雄、わが国の鉄道事故の発生状況と列車運行に与える影響分析、交通と統計、査読有、41 巻、2015、pp.2-15

松尾太平、宝崎隆祐、初期状態が目標の個人情報である搜索ゲーム、Proceedings of 2015 Mathematical Science Symposium, 査読有、2015、pp.45-48

[学会発表] (計 46 件)

三和雅史、松本麻美、津田晃宏、矢板健太、大山達雄、道床交換に用いる軌道保守用車の最適運用計画システムの開発、日本 OR 学会春季研究発表会、2016 年 3 月 17 日、沖縄県市町村自治会館

Hozumi Morohosi, Takehiro Furuta, Two Approaches to Cooperative Covering Location Problem and its Application to Ambulance Deployment, International Conference on Operations Research, 2015 年 9 月 1~4 日、Vienna (Austria)

Taihei Matsuo, Ryusuke Hohzaki, A Search Allocation Game with the Private Information about Target's Initial Condition, The 27th European Conference on Operational Research, 2015 年 7 月 14 日、University of Strathclyde(UK)

岩垂邦秀、大山達雄、わが国における航空機事故の発生・原因・対策に関する統計データ解析、日本 OR 学会秋季研究発表会、2014 年 8 月 28 日、北海道科学大学(北海道)
宝崎隆祐、ピークル運行に関する幾つかのトピックス：交通流から無人航空機の経路決定まで、日本オペレーションズ・リサーチ学会「公共的社会システムと OR」研究部会(招待講演)、2014 年 9 月 11 日、政策研究大学院大学(東京都港区)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

研究代表者の掲載論文や解説記事の実績
http://www.nda.ac.jp/~hozaki/p_frame.htm

6 . 研究組織

(1)研究代表者

宝崎 隆祐 (HOHZAKI, Ryusuke)
防衛大学校・電気情報学群・教授
研究者番号：2 0 5 4 6 0 4 8

(2)研究分担者

大山 達雄 (OYAMA, Tatsuo)
政策研究大学院大学・政策研究科・教授
研究者番号：3 0 1 3 4 3 2 3
諸星 穂積 (MOROHOSHI, Hozumi)
政策研究大学院大学・政策研究科・教授
研究者番号：1 0 2 7 2 3 8 7

(3)連携研究者

(4)研究協力者

防衛大学校・理工学研究科学生
田中 真 (TANAKA, Makoto) (H26)
東尾 剛丈 (HIGASHIO, Takehiro) (H26)
荒田 航 (ARATA, Wataru) (H26)
松尾 太平 (MATUO, Taihei) (H27)