

はじめに
UAV の最適
経路決定問題
密輸取締
ゲーム
おわりに

搜索理論とその応用

情報基盤工学講座 川口 晏璃

May 14, 2021

背景

近年における日本の環境では，搜索理論に対するニーズは災害対処やセキュリティ対策，国防にあるように思われる．

目的

災害対処への活用が期待されているドローン，あるいは無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）の経路決定と密輸船対処への搜索理論の応用例を紹介する．

数理的な UAV の経路決定では、整数計画 (IP) 問題による解法と動的計画法 (DP) によるものがある。

IP 問題による解法

定式化において複雑な目的関数は設定できないが、近年の洗練された離散最適化解法アルゴリズムで大きなサイズの問題まで解くことができる。

DP による解法

漸化式を用いた逐次計算が少し重いものの、複雑な目的関数まで扱うことができ、それぞれに一長一短がある。

整数計画問題に定式化して解く方法

いくつかの移動シナリオが想定される目標の発見確立を最大にするための UAV の飛行経路を求める問題は，UAV 利用の搜索では，搭載された CDD カメラの視覚情報による発見を目指す．センサを搭載した搜索者による搜索法には最も簡単なものとしてランダム搜索がある．

ランダム搜索

ランダム搜索では，搜索者が搜索区域内をランダムに移動して搜索する．

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

A_a : セル a の面積

v_u : UAV_u の速度

w_{ua} : セル a での有効搜索幅

$q(s)$: シナリオ s の確率

τ : 時点 t でセル a を時間 $\tau_{sat} \Delta$

DP による定式化

航空機からの搜索活動で良く使用される逆 3 乗発見法則に基づく視認度を採用する。

地点 \mathbf{r} の高度 h の UAV から、時刻 τ の目標期待視認度は、

$$E(\mathbf{r}, h, \tau) = \sum_s q(s) \frac{\alpha(\mathbf{r}) \delta_s(\mathbf{r}, h, \tau) A_s(\tau) h}{(\|\mathbf{r} - \mathbf{p}_s(\tau)\|^2 + h^2)^{3/2}}$$

$\mathbf{p}_s(t)$: 時点 t での位置

$A_s(t)$: 平面積

$\alpha(\mathbf{r})$: 位置 \mathbf{r} での環境変数

$\delta_s(\mathbf{r}, h, t)$: 可視性

で評価できる。

密輸取締ゲーム

取締船の位置 z は与えられたものとし、取締側の最適資源投入戦略 ϕ^* はつぎの DC 計画問題を解くことで得られる。

$$P_S(z) : \eta^*(z) = \max_{\eta, \varphi} \eta$$

また、密輸船の最適戦略 π^* を求める定式化として線形計画問題が得られる。

$$P_T(z) : \min_{\pi, \lambda} \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) \sum_{t=\tau_0}^T \delta_t(z, \omega) \\ \times \left\{ 1 - \exp \left(- \sum_{\tau=\tau_0}^t \alpha_{\omega(\tau)} \varphi^*(\omega(\tau), \tau) \right) \right\}$$

問題 $P_s(z)$ と $P_t(z)$ は同じ最適値 $\eta^*(z)$ をもち、取締側の最適な待機位置 z^* を次式によって求める。

$$z^* = \operatorname{argmax}_{z \in K} \eta^*(z)$$

中米沖海域での密輸取締の数値例

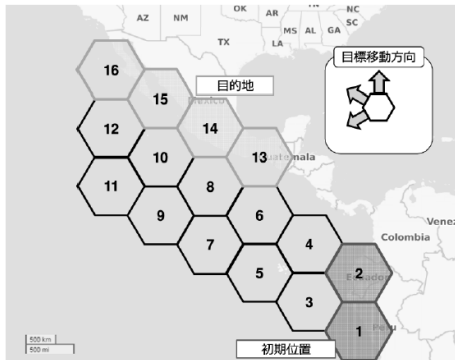
7/9

はじめに

UAV の最適
経路決定問題

密輸取締
ゲーム

おわりに



密輸船はセル 1 またはセル 2 から出航．エネルギー 1 を消費して 1 セルずつ移動できる．初期エネルギーは 7 とし，セル 1 から 417 本，セル 2 から 486 本の目標パス Ω がある．

表 1 最適な密輸船存在分布

セル	時 点					
	2	3	4	5	6	7
1	.250	.167	.009	0	0	0
2	.250	.167	.063	.007	0	0
3	.250	.167	.122	.028	0	0
4	.250	.167	.158	.088	.035	0
5	0	.167	.148	.091	.037	0
6	0	.167	.167	.143	.071	.071
7	0	0	.167	.143	.071	0
8	0	0	.103	.130	.071	.071
9	0	0	0	.089	.071	0
10	0	0	0	.063	.069	.130
11	0	0	0	0	.068	0
12	0	0	0	0	.035	.108

表 2 最適な搜索資源分布

セル	時 点					
	2	3	4	5	6	7
1	.250	.048	0	0	0	0
2	.250	.048	0	0	0	0
3	.250	.048	0	0	0	0
4	.250	.104	0	0	0	0
5	0	.134	0	0	0	0
6	0	.619	.515	.571	.571	.571
7	0	0	.485	.429	.143	0
8	0	0	0	0	.143	.429
9	0	0	0	0	.143	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0

密輸船は広範囲で均等な存在分布を心がけ、搜索資源の集中投入による効果的な搜索を防ごうとする。しかし、目的セルへの到達のため分布に偏りが生じる。取締船の最適待機セルは $z^* = 6, 7, 8$ のいずれかである。

おわりに

この論文では，搜索理論の応用例として、UAV の経路決定法と密輸取締ゲームについて解説した．

はじめに

UAV の最適
経路決定問題

密輸取締
ゲーム

おわりに