

不十分な情報下での緊急度と効率的な網羅を考慮した経路探索システム

A Route Search System Considering Urgency and Efficient Coverage under the Condition of Uncertain Information

中村 優太*¹ 松原 正樹*² 鈴木 伸崇*² 井ノ口 宗成*³ 森嶋 厚行*²
Yuta Nakamura Masaki Matsubara Nobutaka Suzuki Munenari Inoguchi Atsuyuki Morishima

*²筑波大学大学院 図書館情報メディア研究科

Graduate School of Library, Information and Media Studies, University of Tsukuba, Japan

*¹筑波大学 図書館情報メディア系

Faculty of Library, Information and Media Science, University of Tsukuba, Japan

*²静岡大学 情報学部

Faculty of Informatics, Shizuoka University, Japan

The covered route search problem for graphs with deadline time has applications such as aerial photographing route search problem at natural disaster. However, information on the deadline time of a node is not necessarily fully known in advance, and it is not realistic to calculate the optimum route in advance. In this paper, we propose a method to calculate a route as efficient as possible while giving priority to nodes with efficient covering under these conditions. The feature of this method is to prevent extreme deterioration of performance against dynamic change of information by using heuristics that makes the remaining nodes as one unit as possible.

As a result of experiment using 100 patterns graph randomly allocated urgency, this method was able to reduce flight time of average 36.52% compared with simple method. And, in many graphs, the proposed method reduces the case that does not meet the deadline.

1. はじめに

近年、自然災害時対応において、空撮で得られる情報の有効活用に注目が集まっている。例えば、ドローンやヘリなどの航空機の利用により、被害状況を調査するといった利用方法が考えられる。その際、飛行経路を決める必要があるが、飛行経路を決めるための情報が完全に揃わない時点で飛行を開始し、徐々に参考となる情報が入手可能になるという事が一般的である。例えば、ツイッター等で、ある地点は緊急事態であるといった参考情報が入ってくる可能性がある。

本論文では、そのような状況を扱うためのシステムを提案する(図1)。本システムでは、対象となる地域の地図をセル分割し、テレビ報道、ツイッターなどの情報を参考に、災害対策本部が各セルに向かわなければならない締め切り時刻を決定する。デフォルトの締め切り時刻は ∞ である。航空機は、情報が不完全な状態で飛行を開始し、締め切り時刻の最新情報に従い経路を動的に決定する。報道やツイッターでは完全に情報を把握することはできない事が予想されるため、飛行機は最終的には地域全体を網羅するように飛行を行なう。

ここでの問題は、経路決定における緊急性と効率的な網羅の両立である。本論文では、飛行機が上下左右とナナメの8方向に飛ぶことを仮定し、地図の

連絡先: 松原正樹, 筑波大学図書館情報メディア系, 〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, masaki@slis.tsukuba.ac.jp

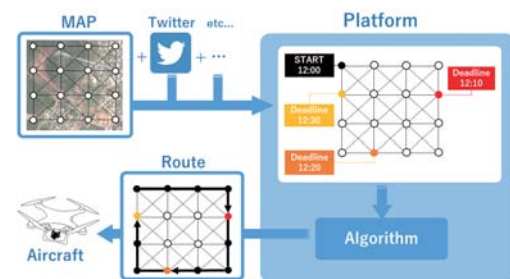


図 1: 提案システム

マトリクスをファンアウト 8 のノード隣接したセルをつないだグラフで表現する。緊急度優先経路探索では、できるだけ多くの時間制約を満たす最短の経路を見つける。

一方、このような探索は効率的な網羅とは必ずしも両立しない。効率的な網羅の経路は、常に残りのノード(セル)を一カ所に固めるものであり、ジグザグやらせん状の経路がそれらの例となる。この戦略では、重複して訪れる必要があるセルがないため、効率的な網羅が可能となる。同時に、このように残りを一カ所に固める戦略は、新たな情報が来て、新たに緊急で訪れなければいけない箇所が出現した場合に対応するためにも良い戦略となる。

提案システムでは、これらの 2 つの戦略を組み合わせたハイブリッド戦略アルゴリズムを導入する。例

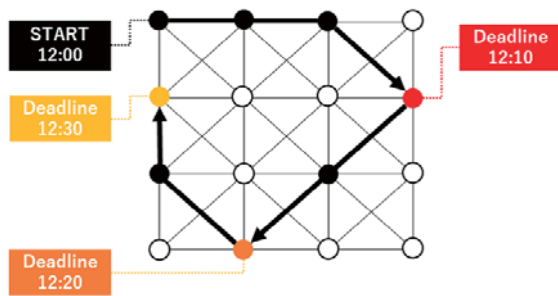


図 2: 単純に緊急度が高い順番に通過する経路

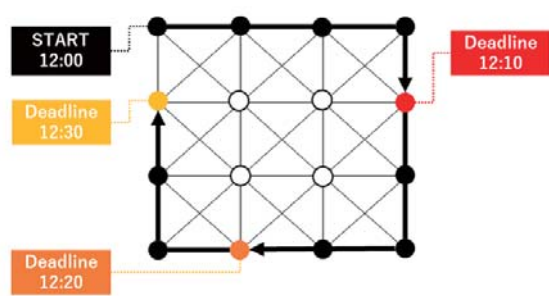


図 3: 重複を減らすために多少の速回りをした経路

えば、図 2 に対して、図 3 のように回れば、緊急性に対応しながら、重複無く網羅ができるため、効率的だといえる。

本論文では、不十分な情報下でスタートし、徐々に情報が明らかになるような状況において、緊急性と効率的な網羅撮影を行なう経路を探索するシステムを提案し、アルゴリズムをシミュレーションにより評価する。本システムで扱う問題は、これまでの航空機の経路生成手法 [Liu 14][Liu 12][Sujit 04] と設定が異なる。アルゴリズムが扱う対象は、配送計画問題の一種と考えられるが、状況が時間とともに変化するため、最初に全体最適を考えることはできない。動的な状況を考慮した経路探索問題の研究も存在するが [Golden 08][Dorigo 10]、変更の予測が効かない状況を対象としており、既存の手法の適用が難しい。

2. 問題定義

情報収集を行う領域として矩形セルで構成された多角形領域を想定する。この領域の各セルには、どれくらいまでに撮影しなければならないという締切時刻が秒単位で設定されるものとする。このとき、セルの中央に格子点として頂点がある三角メッシュ状の無向グラフ G を考える。

本問題で扱うグラフは、 $G = (N, E)$ の形で表される。頂点集合 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$ は要素ごとに、セルに対応した締切時刻と高度を持つ。各頂点に対し締切時刻を与える関数を $Deadline : N \rightarrow Time$ とする。この締切時刻は、後から追加される被災情報によって、動的に変更される可能性がある。頂点に高度を与える関数を $Height : N \rightarrow \mathbb{R}$ 、座標を与える関数を $Position : N \rightarrow \mathbb{R}^2$ とする。

辺集合 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ は要素ごとに長さを持つ。各辺に対し長さを与える関数を $Length : Edge \rightarrow \mathbb{R}_+$ とする。

被災地を空撮する航空機の飛行経路は、グラフ理論における歩道の形で表す。本問題では、入力としてグラフ $G = (N, E)$ 、関数 $Deadline$ 、 $Height$ 、 $Length$ 、飛行開始地点 n_{start} 、飛行開始時間 t_{start} が与えられたとき、締切時刻が短い箇所を優先して訪れながらも、早く網羅することのできる長さ k の歩道

$W_{output} = [n_{start}, n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{k-1}, n_k]$ を求めたい。そこで、締切時刻内に訪れることができたかを評価する関数 E_u と、早く網羅することができたかどうかを評価する関数 E_c の二つの評価関数を用意する。

評価関数 E_u では締切時刻内に訪れることができたかどうかを評価する。もし、締切時刻内に訪れることができなかった場合は、ペナルティが課される。ここで、歩道 W_{output} 内において、ある頂点 n_i を初めて訪れた時刻を返す関数を $FirstVisitTime(n_i, W)$ としたとき、頂点 n_i に対するペナルティ関数 $Penalty(n_i, W)$ を次のように定義する。

$$Penalty(n_i, W) = \begin{cases} 0 & (FirstVisitTime(n_i, W) \leq Deadline(n_i)) \\ FirstVisitTime(n_i, W) - Deadline(n_i) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

ペナルティ関数 $Penalty(n_i, W)$ を用いて、評価関数 $E_u(W)$ は次のように定義する。

$$E_u(W) = \sum_{i=start}^k Penalty(n_i, W) \quad (2)$$

評価関数 E_c では網羅までの時刻を評価する。ここで、飛行経路から航空時間を算出する関数を $FlightTime(W)$ として、評価関数 $E_c(W)$ は次のように定義する。

$$E_c(W) = FlightTime(W) \quad (3)$$

よって、本問題は、グラフ $G = (N, E)$ 、関数 $Deadline$ 、 $Position$ 、 $Height$ 、 $Length$ 、飛行開始地点 n_{start} 、飛行開始時間 t_{start} が入力として与えられたとき、 V 中の頂点を全て含み、第一に評価関数 E_u がより小さく、第二に評価関数 E_c が小さくなるような長さ k の歩道 $W_{output} = [n_{start}, n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{ik-1}, n_{ik}]$ を求めるものである。

3. 提案手法

本手法では、緊急度として与えられた締切時刻を可能な限り遵守しつつ、網羅するまでの時間が短くなるような経路を生成する。本手法の主な流れは次の通りである。まず、最も締切時刻に近い箇所を目標地点として、現在地点からの経路探索を改変 A* 探索を用いて行う。そして、次に締切時刻に近い箇所

を目標地点として、先ほどの目標地点からの経路探索を行う。この2つの手順を通過していない箇所がなくなるまで繰り返す。以下、目標地点決定方法、および、探索アルゴリズムについて説明する。

3.1 目標地点決定方法

本手法では、緊急度が高く、現在地点から早く訪れることができ、可能であれば他の緊急度が高い箇所を通過できる経路が存在する地点を次の目標地点に決定する。具体的な手順を以下の通りである。以下で目標地点が一意に決定できない場合、ランダムに決定する。

1. 締切時刻が最も近い地点を目標地点とする。
2. 同じ締切時刻の地点が複数存在した場合、現在地点からの最短距離をとるときの飛行時間が最も短い箇所を目標地点とする。
3. 2の飛行時間が同じ地点が複数存在した場合、それぞれの歩道 ΔW を計算し、余裕度 $Q(\Delta W)$ が最も小さい箇所を目標地点とする。ここで、開始ノードを n_c 、終了ノードを n_{target} としたとき、余裕度 $Q(\Delta W)$ は次のように定義される。

$$Q(\Delta W) = \sum_{i=c}^{target} \{Deadline(n_i) - FirstTime(n_i, \Delta W)\} \quad (4)$$

3.2 経路探索手法

本手法で用いる改変 A*探索アルゴリズム、および、改変 A*探索アルゴリズムで用いるヒューリスティック関数について述べる。

3.2.1 改変 A*探索アルゴリズム

本手法で用いる改変 A*探索アルゴリズムは、残余領域ができるだけひとまとまりになるように、目標地点に向かう経路探索を行う。そのため、このアルゴリズムによって生成される経路は、必ずしも最短経路をとるとは限らない。このような経路を生成するために、改変 A*探索アルゴリズムは残余領域の形を評価するヒューリスティックを持つ。このヒューリスティックは、残余領域ができるだけひとまとまりになるような経路をとるために関数 $h^*(n_c)$ に c_{group} として組み込まれている。

改変 A*探索アルゴリズムの考え方は、次の通りである。まず、地点 n_c に対して開始地点 n_s からの時間を $g(n_c)$ 、目標地点までの時間を $h(n_c)$ 、これらの和を総時間 $f(n_c)$ とする。

$$f(n_c) = g(n_c) + h(n_c) \quad (5)$$

ここで時間をコストとして扱えば、最短経路を求める際には総コスト $f(n_c)$ が最小となり続けるような経路を選択すればよい。

しかし、開始地点からのコスト $g(n_c)$ とは違い、目標地点までのコスト $h(n_c)$ は既知ではない。そのため、目標地点までのコストの推定値 $h^*(n_c)$ を与えるものとする。この推定値 $h^*(n_c)$ は後述のヒューリスティック関数として定義される。総コストは $f^*(n_c)$ として次のように与えられる。

$$f^*(n_c) = g(n_c) + h^*(n_c) \quad (6)$$

この $f^*(n_c)$ の比較を繰り返すことでコストが最小となるような経路を探索するアルゴリズムが改変 A*探索アルゴリズムである。

3.2.2 ヒューリスティック関数

ヒューリスティック関数 $h^*(n_c)$ を次のように定義する。

$$h^*(n_c) = t_{target} + t_{covering} \quad (7)$$

ここで、 t_{target} は現在地点から目標地点までの見積もり時間、 $t_{covering}$ は残余領域を網羅する際の見積もり時間である。

目標地点までの見積もり時間 t_{target}

航空機の最高速度を v_{max} とする。現在地 n_c から目標地点 n_t までの見積もり時間 t_{target} を次のように定義する。

$$t_{target} = \frac{\|Position(n_t) - Position(n_c)\|}{v_{max}} \quad (8)$$

残余領域の見積もり時間 $t_{covering}$

$t_{covering}$ は、残余領域を網羅することを考えたときの見積もり時間である。網羅を考えたとき、残余領域は可能な限りまとまって存在することが望ましい。これは残余領域が分断されている場合、網羅するときに必ず1度は既に通った箇所をもう一度通ることになり、非効率であるためである。

グラフ G の頂点のうち、経路 W に含まれていない頂点からなる集合を $N' \subset N$ とする。また、経路 W に含まれる頂点に接続する辺を除いた辺の集合を $E' \subset E$ とする。 N' と E' から、残余領域 $G' = (N', E')$ から l 個の要素を持つ完全グラフ $K_l = (N_k, E_k)$ を作成する。頂点集合 $N_k \subset N$ は、 N' 中の1-連結している頂点集合 C を1つの要素とする集合である。辺集合 E_k の各要素はコストとして距離を持つ。各辺が持つ距離には、1-連結グラフ C 同士を結ぶ最短距離を近似値として用いる。このグラフ K_l を用いて、残余領域の見積もり時間 $t_{covering}$ を次のように定義する。

$$t_{covering} = \frac{total_distance + n_distance \times |N_k| + (\delta(G') - \lambda(G'))}{v_{max}}$$

ここで、 $total_distance$ は「残余領域同士の距離の総和」、すなわち、グラフ K_l の頂点集合 N_k を網羅する際の辺のコストの総和を表す。 $n_distance$ は隣り合う頂点間の最短距離である。また、 $\delta(G')$ は G' の最小次数、 $\lambda(G')$ は辺カットの重み和の最小値であり、 $\delta(G') - \lambda(G')$ は残余領域の分断のし易さを表す。

3.3 アルゴリズム

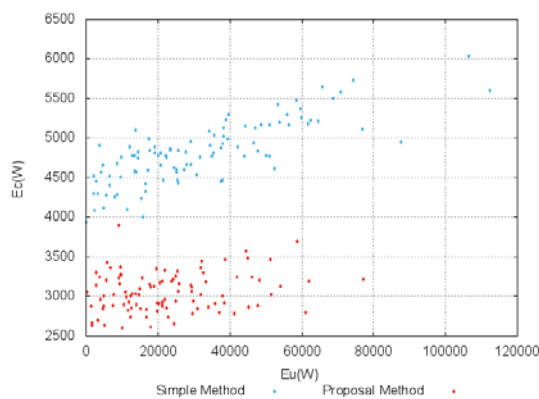
提案手法の疑似コードを Algorithm1 に示す。1,2行目では初期化として、現在地点 v_c に開始時点 v_s を、未探索ノードの集合 U に $G.node$ を代入する。5行目では、 $target$ に優先順位が最大の頂点を代入する。6行目において、現在地点 v_c から $target$ までの経路探索を改変 A*探索アルゴリズムを用いて行い、経路 $path$ を得る。7行目で、 R に $path$ を追加する。8,9行目で、経路にもとづいて移動を行い、 v_c を $target$ に更新する。10行目で、未探索ノードの集合 U から通過したノードを削除する。未探索ノードがなくなるまで、5~10行目までの処理を繰り返す。

Algorithm 1 Efficient Route Search Algorithm**Require:** v_s, G **Ensure:** W

```

1:  $v_c \leftarrow v_s$ 
2:  $U \leftarrow G.node$ 
3:  $R \leftarrow \phi$ 
4: while  $U \neq empty$  do
5:    $target \leftarrow U.priority.max$ 
6:    $path \leftarrow Mod-A\_star(v_c, target, R)$ 
7:    $R \leftarrow R + path$ 
8:    $Move(R)$ 
9:    $v_c \leftarrow target$ 
10:   $U \leftarrow U \setminus R.all$ 
11: end while

```

図 4: $E_u(W)$, $E_c(W)$ の散布図による手法の比較

4. シミュレーション

シミュレーションでは $3km^2$ の矩形領域を撮影視野で分割し、 16×16 のノードを持つグラフを対象とした。単純に網羅する場合の航空時間を min_flight_time としたとき、締切時間を、 $\mu = 1.0 \times min_flight_time$, $\delta = 0.25 \times min_flight_time$ の正規分布でランダムに設定したグラフ 100 個を用意した。これらのグラフ 1 つ 1 つに対して、提案手法を用いた時の経路 $W_{proposal}$, 単純手法を用いた時の経路 W_{simple} を求める。単純手法は締切時間が短いノードを次の目標地点に設定し、そのノードまでの最短経路探索を繰り返す手法とする。

単純手法と提案手法のシミュレーション結果を示し、その性能を比較した。比較には、締切時間をどれだけ遵守できたかを評価するための評価関数 $E_u(W)$ と、どれだけ短い航空時間で網羅できたかを評価する関数 $E_c(W)$ を用いる。

各グラフの $E_u(W)$ と $E_c(W)$ の散布図を図 4 に、平均と標準偏差を表 1 に示す。図 4 から提案手法の優位性がわかり、表 1 から、単純な手法に比べて、提案手法では $E_c(W)$ に対して平均 29.42%, $E_c(W)$ に対して平均 36.52% の効率化が確認できた。

表 1: $E_u(W)$ と $E_c(W)$ の平均と標準偏差の比較

	単純手法	提案手法
$E_u(W)$ の平均	31928.77	22532.92
$E_u(W)$ の標準偏差	22960.94	15980.40
$E_c(W)$ の平均	4820.21	3059.85
$E_c(W)$ の標準偏差	393.22	246.85

5. まとめ

本論文では、不十分な情報下での緊急度と効率的に網羅を考慮した経路探索システムを提案し、そのためのアルゴリズムをシミュレーションにより評価した。提案手法の特徴は、残余領域をできるだけひとかたまりになるように経路を決定することで、徐々に情報が明らかになるような状況においても極端な性能劣化を防ぐことにある。シミュレーションの結果、本手法は単純に緊急度の高いノードから回る単純な手法と比べて、全経路の航空時間を平均 36.52% 削減することができた。今後はアルゴリズムの効率化を行い、災害現場での実用に向け被災地のデータを用いて有効性の検証を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は JST CREST, 科研費 (#25240012), 科学技術振興機構 SIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」, および文部科学省「実社会ビッグデータ利活用のためのデータ統合・解析技術の研究開発」の支援による。

参考文献

- [Dorigo 10] Dorigo, M. and Stützle, T.: Ant colony optimization: overview and recent advances, in *Handbook of metaheuristics*, pp. 227–263, Springer (2010)
- [Golden 08] Golden, B. L., Raghavan, S., and Wasil, E. A.: *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges*, Vol. 43, Springer Science & Business Media (2008)
- [Liu 12] Liu, Q., Pang, X., Wang, Y., Pan, Y., and Li, L.: An Improved Path Management Policy for the Ferry in Opportunistic Networks., *JNW*, Vol. 7, No. 10, pp. 1568–1575 (2012)
- [Liu 14] Liu, Z., Chen, Y., Liu, B., Cao, C., and Fu, X.: HAWK: an unmanned mini-helicopter-based aerial wireless kit for localization, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 13, No. 2, pp. 287–298 (2014)
- [Sujit 04] Sujit, P. and Ghose, D.: Search using multiple UAVs with flight time constraints, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 40, No. 2, pp. 491–509 (2004)