

鉄道災害情報システムにおけるラジコン 飛行機運用設計問題

羽田 明生^{1,a)} 流王 智子¹ 土屋 隆司¹ 廣瀬 壮一²

受付日 2011年7月20日, 採録日 2012年2月3日

概要: 本論文では, 災害発生時に通信インフラに依存することなく安定的に鉄道現場の災害情報を収集するためのシステムとして, ラジコン飛行機を活用した鉄道災害情報システムを提案する. 災害発生時には, 現場の災害情報をできる限り迅速に収集し, それに基づいて鉄道輸送のダウンタイムを最小化するための方策を検討する必要がある. そこで最初に, 災害情報を収集する対象箇所と使用可能なラジコン飛行機数が与えられているとき, 各ラジコン飛行機の飛行経路を, 災害情報の収集に要する時間が最小となるように決定する問題 (P) を設定する. 次に, 平常時におけるラジコン飛行機の配置方法を示したあと, 問題 (P) に対するアルゴリズムを提示する. その後, 災害発生時における各ラジコン飛行機の飛行経路を, 問題 (P) を解いて求めた飛行経路と問題 (P) に対するアルゴリズムを利用して決定する方法を提案する. 最後に, 実際の鉄道線区を対象とした問題例を用いて, 提案する方法の性能を検証する.

キーワード: 鉄道, 災害, ラジコン飛行機, ヒューリスティクス

Radio Control Airplanes Operational Design in the Railway Disaster Information System

AKIO HADA^{1,a)} SATOKO RYUO¹ RYUJI TSUCHIYA¹ SOHICHI HIROSE²

Received: July 20, 2011, Accepted: February 3, 2012

Abstract: In this paper, we study a railway disaster information system using radio control airplanes (RCAs) for gathering disaster information in railway field without any dependence of communication infrastructure. A quick collection of disaster information on-site and a construction of a strategy to minimize downtime of railway service based on the information are required when a disaster strikes. First, we propose a problem (P) that is to determine flight routes of RCAs so as to minimize collection time of disaster information when inspection points and the number of usable RCAs are given. Then, we propose a method to determine deployment of RCAs on a normal state, and an algorithm for the problem (P). After that, we propose two methods based on flight routes obtained from the problem (P) and the above algorithm to determine flight routes for each RCA when a disaster strikes. Finally, we show results of computational experiments carried out using data generated from a real railway field.

Keywords: railway, disaster, radio control airplane, heuristics

1. はじめに

鉄道会社では自然災害による鉄道土木構造物への被害を予防する目的で, 被害が予想されるトンネル, 橋梁, 高架橋などに対して定期検査を実施している. また, 実際に地震や台風などの自然災害が発生した際には保守作業員による特別巡回が実施される. しかし, 保守作業員による特

¹ (公財) 鉄道総合技術研究所
Railway Technical Research Institute, Kokubunji, Tokyo
185-8540, Japan

² 東京工業大学
Tokyo Institute of Technology, Meguro, Tokyo 152-8552,
Japan

a) hada@rtri.or.jp

別巡回には、現状確認に多くの時間を要する、大規模災害においては現場へのアクセスが困難な場合もある、などの問題点が存在する。一方、鉄道土木構造物のモニタリングデータを自動収集する仕組みとして、近年、センサネットワークを活用した様々な状態監視システムが提案、実用化されている [1], [2]。これらの多くはインターネットや携帯電話網などの通信インフラを利用して情報収集を行っているため、高速かつ信頼性の高い通信により、情報を効率的に収集できる。しかし、大規模災害の発生時には、通信基地局の倒壊やケーブル断線などにより通信インフラが利用できなくなり、情報収集が停止してしまう危険性がある。そこで、本研究では自然災害による影響を受けにくい空中からデータを収集するシステム、特にラジコン飛行機を活用して鉄道現場の災害情報を収集するシステムについて考察する。

鉄道沿線で災害が発生すると、走行安全性を確保するために輸送サービスを停止（ダウンタイム）して被災状況などの現状確認作業が行われる。しかし、鉄道現場における被災状況の確認作業では、鉄道土木構造物だけでなく、河川の氾濫や土砂災害などの二次災害に備えるため沿線周辺の被災状況についても確認作業を行う必要があり、災害発生時に現状確認すべき箇所は広範囲にわたる。そのため、ダウンタイムをできるだけ短くするためには、広域に散在する検査箇所の災害情報をできるだけ迅速に収集することが要求される。そこで、本論文では検査箇所の災害情報収集に要する時間を最小とするためのラジコン飛行機の飛行経路決定問題を取り上げる。

災害発生時に災害情報を収集するシステムに関しては、これまでに数多くの研究がある [3], [4]。たとえば、携帯電話や PDA などの移動端末を用いた遅延耐性ネットワークを用いて、災害によって分断されたネットワークの情報をサーバまで伝送する方法や [5]、通信環境の変化に対応して動的に通信方式や周波数を切り換えることにより頑健性の高いシステムを提供する方法 [6] などが提案されている。しかし、これらの方法は通信インフラや通信環境に依存しているため、迅速かつインフラに依存することなく、安定して災害情報を収集することが難しいという問題がある。この問題を解決する手段として、これまでにラジコン飛行機やラジコンヘリを活用した方法が提案されている。近年ではラジコン飛行機体の小型化、低価格化に加え、自動操縦機能を搭載したものが登場しており、ラジコン飛行機の導入が従来と比較すると容易になっている [7], [8]。ところが、ラジコン飛行機はインフラに依存することなく迅速に災害情報を収集できることが期待できる一方で、鉄道現場のような広範囲の災害情報を迅速に収集するためには、効率的にラジコン飛行機の配置場所や飛行経路を決定する必要がある。しかしながら、現在のところラジコン飛行機の配置と飛行経路を決定するための有効な手法はいまだ提案

されていないように見受けられる。そこで、本論文では複数台のラジコン飛行機を利用して迅速に広域災害情報を収集するためのシステムと、そのための各ラジコン飛行機の配置と飛行経路を設計する手法を提案する。

2. ラジコン飛行機を活用した鉄道災害情報システム

鉄道土木構造物の保守管理業務を担当する保守区と災害情報を収集するラジコン飛行機はそれぞれ複数与えられているものとする。また、ラジコン飛行機は事前にプログラムされた飛行経路に沿って自動操縦可能であり、空中からの災害情報の収集が可能であるものとする [7]。なお、ラジコン飛行機のデータ収集機能に関してはいくつかのシナリオを想定することができる。たとえば、斜面崩壊による線路の埋積や鉄道土木構造物の崩壊などの大規模被害の状況を確認したい場合には、ラジコン飛行機に小型カメラを搭載して、上空から検査箇所の画像データを取得する機能が考えられる。また、検査対象に無線センサネットワークが設置されている場合には、傾斜計やひずみ計など各センサノードから無線伝送されるセンシング情報をラジコン飛行機で収集するために、情報集積装置であるゲートウェイをラジコン飛行機に搭載することが考えられる。ラジコン飛行機の最大積載量以内であれば、1台に小型カメラとゲートウェイの両機を搭載することも考えられる。また、次を仮定する。

- (1) 使用可能なラジコン飛行機数、保守区の数と配置は与えられている。
- (2) 各ラジコン飛行機の性能は同一である。
- (3) 災害発生時に現状確認が必要となる可能性のある検査対象箇所は与えられているものとする。これら検査対象箇所は、定期検査結果や災害履歴情報（過去に発生した地滑り、洪水などの情報や地盤種別など）により定められている。
- (4) 実際に災害が発生した際には、災害の種類と規模に応じて、検査対象箇所の中から現状確認が必要な検査箇所が決定する。
- (5) 各検査箇所の災害情報は1台のラジコン飛行機により収集される。
- (6) 各ラジコン飛行機はそれぞれある保守区に配置されており、そこから離陸しいくつかの検査箇所の上空を飛行後にいずれか1つの保守区に着陸する。
- (7) 収集されたデータはラジコン飛行機が着陸した保守区で回収される。

災害発生時はできる限り迅速に検査箇所の情報を収集する必要があるため、各ラジコン飛行機はあらかじめ保守区で保管していることが望ましい。このとき、平常時において各ラジコン飛行機をどの保守区に配置するのがよいか、という問題が発生する。そこで、最初に平常時においてラ

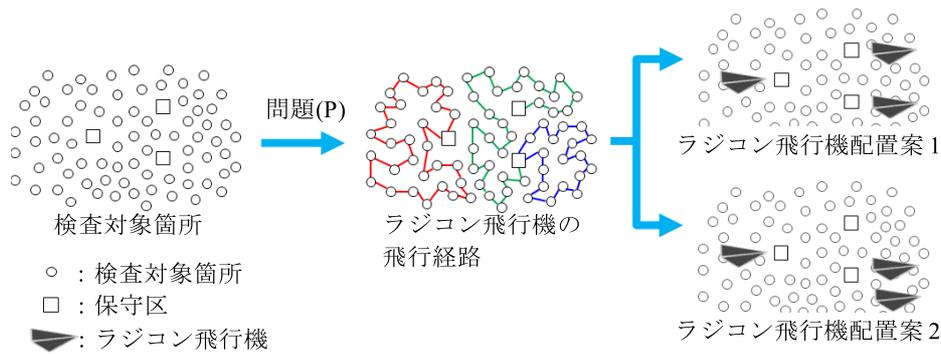


図 1 平常時におけるラジコン飛行機の配置決定

Fig. 1 Determination of radio control airplane deployment on a normal state.

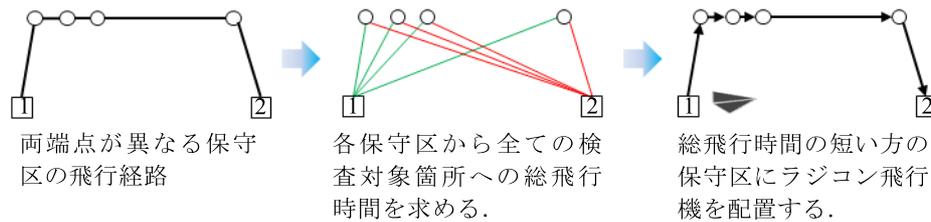


図 2 両端点異なる飛行経路に対するラジコン飛行機の配置

Fig. 2 Radio control airplane deployment for a flight route with different endpoints.

ラジコン飛行機の配置を決定する方法について考える。

検査箇所は実際に災害が発生して初めて判明すること、また検査箇所は災害が発生するたびに変わることから、災害発生前にこの検査箇所を知ることは難しい。そこで、災害発生前に判明している情報（ラジコン飛行機数、保守区数と配置、検査対象箇所数と場所）から、平常時のラジコン飛行機配置を決定するために次の問題 (P) を考える。なお、問題 (P) の厳密な定式化は 3 章で、アルゴリズムは 4.1 節で説明する。

問題 (P) すべての検査対象箇所の災害情報を収集するために必要な時間が最小となるように、与えられたラジコン飛行機の飛行経路を決定する。

問題 (P) を解くことにより、すべての検査対象箇所に対する各ラジコン飛行機の飛行経路を定めることができる。ここで、検査箇所は災害後に判明するので、平常時のラジコン飛行機配置はすべての検査対象箇所を考慮して決定している。問題 (P) で定めた飛行経路からラジコン飛行機の配置を決定する様子を図 1 にあげる。ただし、図 1 において使用可能なラジコン飛行機は 3 台とし、保守区の横に示したラジコン飛行機はその保守区に配置させることを表す。

図 1 では、最初に問題 (P) を解いて各ラジコン飛行機の飛行経路を決定している。次いで、得られた飛行経路からラジコン飛行機の配置を定めている。このとき、本論文では両端点在同一の保守区である飛行経路に対しては、その保守区にラジコン飛行機を配置するものとする。たとえば、図 1 の赤色と青色で示された飛行経路はそれぞれ同一

の保守区をその両端点としていることから、対応する保守区にラジコン飛行機を 1 台ずつ配置している。一方、飛行経路の両端点異なる保守区となる場合にはどちらの保守区を始点としてもよく、また同様にどちらの保守区を終点としてもよい。ラジコン飛行機配置案を複数考えることができる。たとえば、図 1 では緑色で示された飛行経路の両端点異なることから、ラジコン飛行機配置案は 2 通り考えることができる。そこでそのような場合には、両端点の各保守区について、それぞれの保守区から飛行経路内の各検査対象箇所へ直行する場合の飛行時間の総和（総飛行時間）を求め、それが短い方の保守区にラジコン飛行機を配置するものとする。つまり、飛行経路内の検査対象箇所が近辺により多く分布している方の保守区にラジコン飛行機を配置するものとする。たとえば、図 2 において、保守区 1 から各検査対象箇所への総飛行時間（緑色線分の飛行時間の総和）は、保守区 2 から各検査対象箇所への総飛行時間（赤色線分の飛行時間の総和）よりも短いことから、この場合は保守区 1 にラジコン飛行機を配置することになる。なお、両保守区に対して計算された総飛行時間が等しい場合は、任意の保守区にラジコン飛行機を配置するものとする。

次に、災害発生後における実際のラジコン飛行機の飛行経路を決定する方法について説明する。上記の仮定 (4) より、災害が発生して初めて実際に現状確認が必要な検査箇所が判明するので、問題 (P) と上記方法により定められたラジコン飛行機配置の下ですべての検査箇所を飛行経路に含むような各ラジコン飛行機の飛行経路を災害発生後に

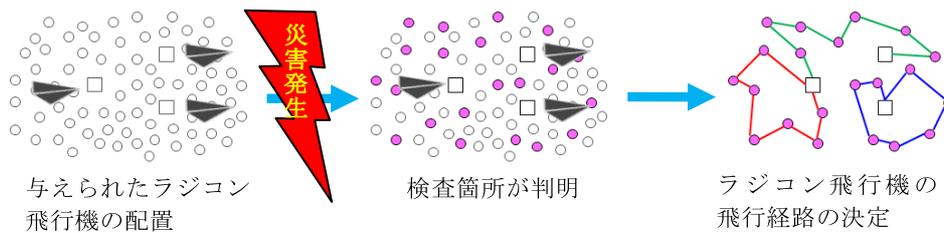


図 3 災害発生後のラジコン飛行機の飛行経路決定

Fig. 3 Determination of flight routes for radio control airplanes after a disaster strikes.

きる限り迅速に決定する必要がある。そこで、災害発生後に実際に飛行するラジコン飛行機の飛行経路を求める次の問題 (Q) を考える。なお、問題 (Q) の厳密な定式化は 3 章で、アルゴリズムは 4.2 節で説明する。

問題 (Q) 与えられたラジコン飛行機の配置で、すべての検査箇所の災害情報を収集するために必要な時間が最小となるように、各ラジコン飛行機の飛行経路を決定する。

問題 (Q) では上記方法により災害発生前に定めたラジコン飛行機配置を入力として、各ラジコン飛行機の飛行経路を決定する。ここで、図 3 に災害発生からラジコン飛行機の飛行経路を決定するまでの様子を示す。ただし、図 3 においてピンク色の点は検査箇所を示すものとする。

本論文で提案するラジコン飛行機を活用した鉄道災害情報システムでは、災害発生前に検査箇所となる可能性のあるすべての検査対象箇所を、与えられたラジコン飛行機数で効率的に飛行するための飛行経路を決定し、この飛行経路からラジコン飛行機配置を決定する。災害発生後にはこのラジコン飛行機配置の下、判明したすべての検査箇所を飛行するための飛行経路を決定する。

3. 定式化

検査対象箇所の集合を $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 、保守区の集合を $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 、同性能のラジコン飛行機の集合を $R = \{1, 2, \dots, r\}$ とする。また、点集合 $V = N \cup M$ と枝集合 $E = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$ からなる無向グラフを $G = (V, E)$ とし、枝 $(i, j) \in E$ の飛行時間を t_{ij} とする。加えて、始点と終点のみが M に含まれ、他の点は N に含まれるパスであり、かつ始点と終点以外の点は互いに素であるものを特に飛行パスと呼び、 G の部分グラフで定義する。なお、始点と終点が同一の場合は、飛行パスはサイクルとなる。さらに、 G の部分グラフ H に含まれる検査対象箇所集合と枝集合をそれぞれ $N(H)$ 、 $E(H)$ とし、部分グラフ H の飛行時間を $T(H) = \sum_{(i,j) \in E(H)} t_{ij}$ で定義する。このとき、グラフ G 上のすべての飛行パス集合を Λ とすると、前章で説明した問題 (P) は次のように定式化される。

$$(P) \quad \min\{\max_{k \in R} T(P_k)\} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \bigcup_{k \in R} N(P_k) = N, \quad (2)$$

$$N(P_k) \cap N(P_l) = \emptyset, k, l \in R, k \neq l \quad (3)$$

$$P_k \in \Lambda, \quad k \in R \quad (4)$$

問題 (P) において、式 (1) は各ラジコン飛行機の飛行時間で最大のものを最小にすることを、式 (2) は各ラジコン飛行機によりすべての検査対象箇所の災害情報が収集されることを、式 (3) は各検査対象箇所の災害情報はただ 1 台のラジコン飛行機により収集されることを保証する。

次に、問題 (Q) の定式化について説明する。問題 (Q) は、問題 (P) と同様に式 (1) から式 (4) を満たすラジコン飛行機の飛行パスを求める問題であるが、各ラジコン飛行機の配置が固定されているという点が問題 (P) と異なる。そこで、この制約を定式化に組み入れるために必要な用語を定義する。保守区 $i \in M$ に配置されているラジコン飛行機数を h_i とし、これらの値は入力として与えられているものとする。また、飛行パス集合 $\{P_1, \dots, P_r\}$ に対して、保守区 $i \in M$ を始点とする飛行パス数を $f_i(P_1, \dots, P_r)$ とする。すると、各ラジコン飛行機が所定の保守区に配置されていることを表す制約条件は次のようになる。

$$f_i(P_1, \dots, P_r) = h_i, \quad i \in M \quad (5)$$

このとき、問題 (Q) は、問題 (P) における N を検査箇所集合に置き換え、問題 (P) に制約条件式 (5) を追加した問題に定式化される。

なお、NP 完全な問題に 2 分割問題がある [9], [10]。すなわち、 n 個の実数 d_1, \dots, d_n が与えられているとき、

$$\sum_{i \in W} d_i = \sum_{i \notin W} d_i \quad (6)$$

を満たす $W \subset N = \{1, \dots, n\}$ が存在するか否かを判定する問題であるが、この 2 分割問題は、 $M = \{n+1\}$ 、 $R = \{1, 2\}$ とし、 (t_{ij}) を次のように定めると、

$$t_{ij} = \begin{cases} 1/2 \cdot d_i + 1/2 \cdot d_j, & i, j \in N \\ 1/2 \cdot d_i, & i \in N, j \in M \end{cases} \quad (7)$$

上述の問題 (P) と問題 (Q) に帰着される。すなわち、問題 (P) と問題 (Q) の最適解が $1/2 \cdot (d_1 + \dots + d_n)$ であるとき、そしてそのときに限り d_1, \dots, d_n は 2 分割可能となる。よって、問題 (P) と問題 (Q) は明らかに NP 困難な問

題である。

問題 (P) と問題 (Q) はパス被覆問題に分類される [11], [12]. パス被覆問題は、与えられた点集合を被覆する互いに素なパスの集合を求める問題であるが、各パスの始点と終点に対する制約を持つパス被覆問題は本論文との関わりが特に深い。そこで、以下ではパスの始点と終点に制約を持つパス被覆問題に関する既存研究と本研究との相違点について述べる。ある 1 つの始点と終点集合が与えられているパス被覆問題に対しては、これまでに多くの多項式時間アルゴリズムが提案されている [13], [14]. 点集合のある部分集合に対して、始点と終点はこの部分集合に含まなければならないという制約を持つパス被覆問題に対しては、Asdre らが補可約グラフ上での多項式時間アルゴリズムを提案している [15]. また、各パスに対して始点と終点が与えられており、この条件を満たすパス被覆が存在するかどうかを判定する問題に対しては、いくつかの多項式時間アルゴリズムが提案されている [16], [17]. さらに、点集合の部分集合が与えられ、この部分集合に含まれるすべての点はあるパスの端点とするという条件の下、パス数最小のパス被覆を求める問題に対しては、区間グラフ上での多項式時間アルゴリズムが提案されている [18]. しかしながら、これらの研究では与えられた条件を満たすパス被覆が存在するかどうかを判定する問題、またはパス被覆に含まれるパス数を最小化する問題を扱っており、本論文で対象とするような、最大重みのパスを最小化するパス被覆を求める問題とは異なる。加えて、本論文では、始点と終点在同一であるパス (サイクル) も解に含めることを許容している点もこれら既存のパス被覆問題に対する研究とは異なる。

4. アルゴリズム

ここでは、前章において定式化した問題 (P) と問題 (Q) に対する解法アルゴリズムを提案する。問題 (P) に対して提案するアルゴリズムは Frederickson らのサイクル分割法 [19] に基づくアルゴリズムであり、それにより問題 (P) の可能解を、つまりすべての検査対象箇所を含む r 個の飛行パスを構築する。そして既述のように、それより平常時における各ラジコン飛行機の配置を定める。他方、問題 (Q) に対して提案するアルゴリズムにおいては、問題 (Q) の可能解を生成する 2 つの方法を示す。1 つは問題 (P) の可能解を利用して問題 (Q) の可能解を生成する方法であり、他の 1 つは問題 (P) に対するアルゴリズムと、ボトルネックマッチング問題 (Min-max 型重み付きマッチング問題) の最適解法 [20] を組み合わせてそれを求める方法である。したがって、問題 (P) に対するアルゴリズムは、ラジコン飛行機の配置決定に加えて、問題 (Q) の 2 つの可能解の生成にも適用されることになる。また、問題 (Q) は災害発生時に各ラジコン飛行機の飛行パスを実際に生成する

問題である。それゆえ、目的関数値がより小さい、つまりできる限り情報収集時間が短い問題 (Q) の可能解を求める必要がある。そこで、上述の方法で求めた問題 (Q) の 2 つの可能解の中で情報収集時間がより短い方の可能解を選択し、それをさらに局所探索法で改善するものとする。

4.1 問題 (P) に対するアルゴリズム

問題 (P) に対するアルゴリズムを説明する前に、用語の定義を行う。以下では保守区を表す点 $j \in M$ を特に根点と呼び、飛行パスを点集合の順列で表記する。

定義 1 G に次の操作を行って得られるグラフ $\bar{G} = (\bar{V}, \bar{E})$ を G の縮約グラフという。

1. 新しい点 0 (擬点と呼ぶ) を追加し、擬点を各根点と同一視する。
2. 点 $i \in N$ と根点 $j \in M$ を端点とする枝 (i, j) の接続替えを行う。すなわち、そのような枝 (i, j) は新しい枝 $(i, 0)$ とする。
3. すべての根点と根点に接続するすべての枝を削除する。

定義 2 G の部分グラフ H を、次の操作で \bar{G} の部分グラフ \bar{H} に変換することを H の縮約という。

1. 点 $i \in N$ と根点 $j \in M$ を端点とする H の枝 (i, j) は、 \bar{H} の枝 $(i, 0)$ とする。
2. 点 $i, j \in N$ を端点とする H の枝 (i, j) は、そのまま \bar{H} の枝 (i, j) とする。

ここで、 $l(i) = \arg \min_{j \in M} t_{ij}$, $i \in N$ とし、枝 $(i, j) \in \bar{E}$ の飛行時間 \bar{t}_{ij} を次で定義する。

$$\bar{t}_{ij} = \begin{cases} t_{ij}, & i, j \in N \\ t_{i, l(i)}, & i \in N, j = 0 \end{cases}$$

また、縮約グラフにおいて $\bar{t}_{\max} = \max_{i \in N} \bar{t}_{i0}$ を定義する。さらに G の部分グラフ H と同様に、 \bar{G} の部分グラフ \bar{H} に含まれる枝集合を $\bar{E}(\bar{H})$ とし、部分グラフ \bar{H} の飛行時間を $\bar{T}(\bar{H}) = \sum_{(i, j) \in \bar{E}(\bar{H})} \bar{t}_{ij}$ とする。加えて、次を定義する。

定義 3 \bar{G} の部分グラフ \bar{H} を、次の操作で G の部分グラフ H に変換することを \bar{H} の拡大という。

1. 点 $i \in N$ と擬点 0 を端点とする \bar{H} の枝 $(i, 0)$ は、 H の枝 $(i, l(i))$ とする。
2. 点 $i, j \in N$ を端点とする \bar{H} の枝 (i, j) は、そのまま H の枝 (i, j) とする。

このとき、問題 (P) に対する次のアルゴリズムを考える (図 4 参照)。このアルゴリズムは Min-max 型の複数人巡回セールスマン問題に対する Frederickson らのアルゴリズム [19] を修正したものである。また、 $v_1, v_2, \dots, v_n \in \bar{V}$ とする。

アルゴリズム 1 (問題 (P) に対するアルゴリズム)

STEP1. 縮約グラフ \bar{G} 上で巡回セールスマン問題を解

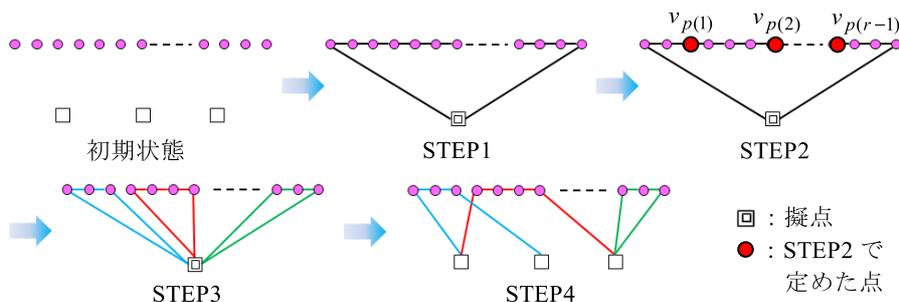


図 4 アルゴリズム 1 による問題 (P) の可能解の生成

Fig. 4 Construction of a feasible solution of the problem (P) by the algorithm1.



図 5 アルゴリズム 2 の STEP1 における非検査箇所のショートカット

Fig. 5 Shortcut of non-inspection points in the step1 of the algorithm2.

き、得られたサイクルを $C = (0, v_1, v_2, \dots, v_n, 0)$ とし、 $\bar{T}(C) = L$ とする。

STEP2. 各 $j \in R \setminus \{r\}$ に対して、サイクル C に沿って $0, v_1, v_2, \dots$ と順に点を調べていき、飛行時間の総和が $(j/r)(L - 2\bar{t}_{\max}) + \bar{t}_{\max}$ を超えない最後の点 $v_{p(j)}$ を求める。

STEP3. $(v_{p(i)}, v_{p(i+1)})$, $i \in R \setminus \{r\}$ を削除する。また、 $v_{p(i+1)}$, $i \in R \setminus \{r\}$ と $v_{p(i)}$, $i \in R \setminus \{r\}$ を点 0 と接続し、 r 個のサイクル $C_1 = (0, v_1, \dots, v_{p(1)}, 0)$, $C_2 = (0, v_{p(1)+1}, \dots, v_{p(2)}, 0)$, \dots , $C_r = (0, v_{p(r-1)+1}, \dots, v_n, 0)$ を生成する。

STEP4. STEP3 で生成した r 個のサイクル C_i , $i \in R$ を拡大する。

4.2 問題 (Q) に対するアルゴリズム

ここでは、問題 (Q) の可能解を生成する方法について説明する。問題 (Q) に対する提案アルゴリズムの概略は次のようになる。

アルゴリズム 2 (問題 (Q) に対するアルゴリズム)

STEP1. 問題 (P) で求めた r 個の飛行パスを利用して、問題 (Q) の可能解を生成する。

STEP2. 問題 (P) の検査対象箇所集合 N を検査箇所集合に置き換えて、アルゴリズム 1 を実行し r 個の飛行パスを生成する。次いで、この r 個の飛行パスを修正して問題 (Q) の可能解を生成する。

STEP3. STEP1 と STEP2 で生成した問題 (Q) の可能解のうち、災害情報収集時間が短い方の可能解を選択する。

STEP4. STEP3 で得られた問題 (Q) の可能解に局所探索法を適用して解を改善する。

アルゴリズム 2 を実行するためには、STEP1 における問題 (Q) の可能解の生成方法、STEP2 における飛行パス

の修正方法、STEP4 における局所探索法を示す必要がある。そこで以下では、それらについて順次説明する。

問題 (P) を解くと、すべての検査対象箇所を含む r 個の飛行パスが求まる。そして、平常時におけるラジコン飛行機の配置はそれら r 個の飛行パスが運用可能であるように定めた。したがって、問題 (P) を解いて求めた飛行パス上で検査箇所のみを接続すると、つまり非検査箇所をショートカットすると、式 (5) を満たす問題 (Q) の 1 つの可能解が定まる。そこで STEP1 では、問題 (P) で求めた飛行パス上で検査箇所のみを接続して問題 (Q) の可能解を生成するものとする (図 5 参照)。これより、問題 (P) は平常時におけるラジコン飛行機の配置決定に加えて、災害発生後の飛行経路の決定にも活用されることになる。

STEP2 の前半で求まる r 個の飛行パスは、平常時におけるラジコン飛行機の配置制約を考慮していないため、それから問題 (Q) の可能解を生成するためには、式 (5) を満たすようにラジコン飛行機の配置を変更する必要がある。そこで本研究では、ボトルネックマッチング問題を利用した次のアルゴリズムで、この r 個の飛行パスを問題 (Q) の可能解に修正するものとする (アルゴリズム 2 の STEP2)。

アルゴリズム 3 (問題 (Q) の可能解の生成)

STEP1. アルゴリズム 2 の STEP2 で生成した r 個の飛行パスに対し、根点に接続するすべての枝を除去する。この結果得られる r 個のパスを P_1, \dots, P_r とする。

STEP2. P_k , $k \in R$ に対応する点からなる点集合を V_1 とし、各 $i \in M$ に対して h_i 個の根点 i に対応する点からなる点集合を V_2 とする。また、点集合 $V_K = V_1 \cup V_2$, 無向枝集合 $E_K = \{(a, b) | a \in V_1, b \in V_2\}$ から構成される完全 2 部グラフ $G_K = (V_K, E_K)$ を構成する。

STEP3. 枝 $(a, b) \in E_K$ の重み w_{ab} を次のように定義する。ただし、 $\delta(P)$ はパス P の両端点の集合、 $\sigma(b) \in M$ は点 $b \in V_2$ に対応する根点を表す。

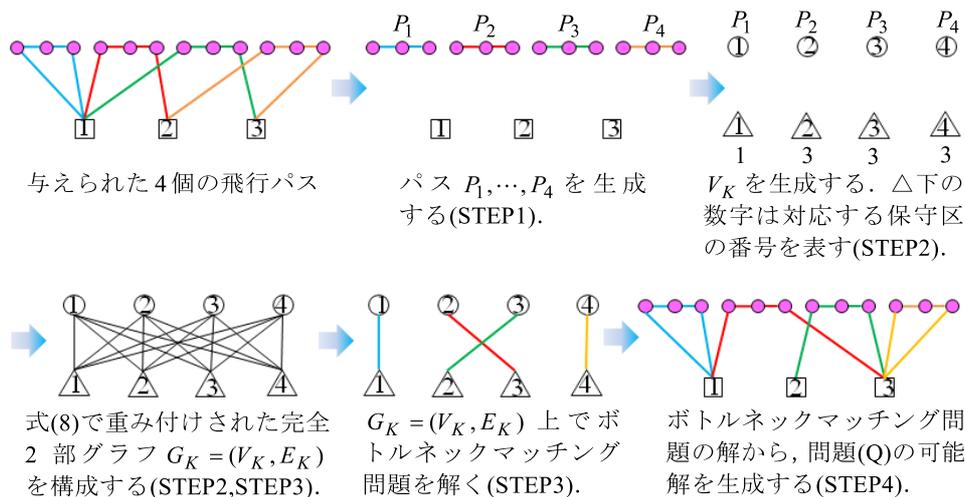


図 6 ボトルネックマッチングを利用した問題 (Q) の可能解の生成

Fig. 6 Generation of a feasible solution of the problem (Q) using bottleneck matching.

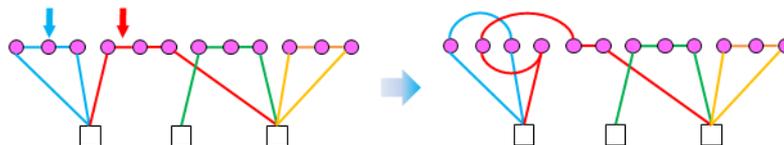


図 7 局所探索法による可能解の改善

Fig. 7 Improvement of a feasible solution by a local search method.

$$w_{ab} = T(P_a) + \min_{i \in \delta(P_a)} t_{i,\sigma(b)}, \quad (a, b) \in E_K \quad (8)$$

$(w_{ab}), (a, b) \in E_K$ で重み付けされた $G_K = (V_K, E_K)$ 上でボトルネックマッチング問題を解く。

STEP4. STEP3 で求めたボトルネックマッチング問題の最適解に含まれる枝集合 M^* を利用して次のように問題 (Q) の可能解を生成する。

- (i) M^* に含まれる各枝 $(a, b) \in M^*$ に対して, w_{ab} の値を与える式 (8) の点 i (パス P_a の端点) と根点 $\sigma(b)$ を接続することによりパス P_a を更新する。
- (ii) 更新されたパス $P_k, k \in R$ に対して, 根点と接続していない端点とある根点とを, 増加する飛行時間が最小となるように接続する。

アルゴリズム 3 の STEP3 では, ラジコン飛行機配置制約である式 (5) を満たすように r 個のパスが保守区に割り当てられ, パスの一方の端点がマッチングに対応する保守区と接続される。また, STEP4 では保守区と接続されていない他方の端点のある保守区と接続することにより r 個の飛行パスを生成する。アルゴリズム 3 により, 式 (5) を満たさない r 個の飛行パスが問題 (Q) の可能解に修正される様子を図 6 に示す。ただし, 図 6 においてラジコン飛行機数は $r = 4$ であり, ラジコン飛行機は $h_1 = 1, h_3 = 3$ となるように配置するものとする。また, $\square, \circ, \triangle$ はそれぞれ保守区, V_1 の要素, V_2 の要素を表すものとし, 中

の数字はそれぞれの番号を表すものとする。なお, ボトルネックマッチング問題に対しては多項式時間の最適解法が提案されていることから [20], アルゴリズム 3 の計算も多項式時間で終了する。

また, この方法で求めた問題 (Q) の可能解に対して, 局所探索法を適用する。この局所探索法では, 飛行時間が最も長い飛行パス上の検査箇所を他の飛行パスの任意の検査箇所間に挿入する挿入近傍を用いて, 可能解の改善を図っている (アルゴリズム 2 の STEP4)。局所探索法による可能解の改善の様子を図 7 にあげる。図 7 では, 水色で示された飛行パス上の検査箇所 (水色矢印) を赤色で示された飛行パス上の検査箇所間 (赤色矢印) に挿入することにより可能解を修正している様子を示している。

5. 数値実験

提案アルゴリズムの性能を検証するために, 関東地域の複数線区とその周辺地域を対象とした数値実験を実施した。具体的には, 鉄道総合技術研究所の所在地 (東京都国分寺市光町 2-8-38) を中心に直径 5 km, 10 km, 15 km の範囲に含まれる鉄道沿線に検査対象箇所を設定し, これら対象領域に含まれる検査対象箇所数をそれぞれ 51 カ所, 186 カ所, 336 カ所とした。また, 保守区数に関しては, 直径 5 km, 10 km, 15 km の範囲に含まれる各領域に対し, それぞれ 1 カ所, 2 カ所, 4 カ所とした。これらの様子を図 8 に示す。なお, 図 8 において●は検査対象箇所, ■

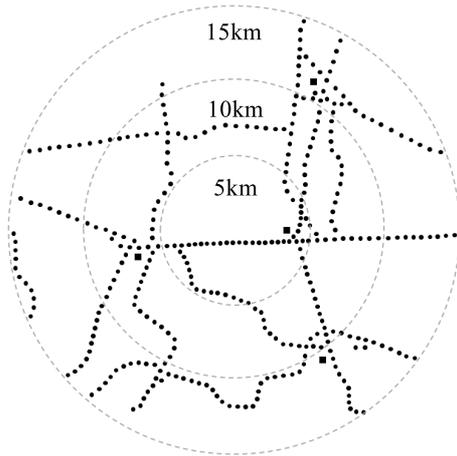


図 8 数値実験で対象とする地域

Fig. 8 Target area for computational experiments.

は保守区を表す。

以下の数値実験におけるパラメータ設定と実験環境については次のとおりである。

- ラジコン飛行機の速度は 40 km/h とし、ラジコン飛行機の飛行時間は飛行距離に比例するものとした。また、使用計算機言語は C で、使用計算機の仕様は Microsoft Windows 7 Professional, Intel® Core™, i5 CPU, 2.67 GHz, 4.00 GB RAM である。
- アルゴリズム 1 の STEP1 における巡回セールスマン問題は、double 最小木法を用いて可能解を生成した [21]。

また、以下の表 1, 表 2, 表 3 に関しては次のとおりである。

- n_1 は検査対象箇所数, n_2 は検査箇所数, m は保守区数, r はラジコン飛行機数であり、表 1 は $n_1 = 51$ (直径 5 km 領域), 表 2 は $n_1 = 186$ (直径 10 km 領域), 表 3 は $n_1 = 336$ (直径 15 km 領域) である場合の数値実験結果である。
- 検査箇所数は $n_2 = \lceil n_1 \times \alpha \rceil$ ($\alpha = 0.3, 0.6, 0.9$) で定めた。ただし、 $\lceil \cdot \rceil$ は \cdot を四捨五入した結果の数値とする。また、検査箇所の場所に関しては、検査対象箇所の中からランダムに n_2 カ所を選択した。
- ラジコン飛行機数は $r = \lceil n_1 / \beta \rceil$ ($\beta = 45, 30, 15$) で定めた。
- c_1 は問題 (P) にアルゴリズム 1 を適用して得られた問題 (P) に対する可能解の目的関数値であり、 s_1 はその計算時間である。
- c_2 と c_3 はそれぞれアルゴリズム 2 の STEP1 と STEP2 で求めた問題 (Q) の可能解に対する目的関数値である。
- c_4 はアルゴリズム 2 を適用して求めた問題 (Q) の可能解に対する目的関数値であり、 s_2 はその計算時間である。
- 検査箇所の場所はランダムに選択されることから、同

表 1 数値実験結果 (直径 5 km 領域)

Table 1 Results for the experiments conducted in the area of 5 km in diameter.

n_1	n_2	m	r	c_1	c_2	c_3	c_4	s_1	s_2
51	15	1	1	36.801	25.349	22.227	20.826	—	—
51	15	1	2	20.494	15.629	14.764	14.422	—	—
51	15	1	3	16.591	13.679	13.316	13.004	—	—
51	31	1	1	36.801	32.859	30.201	29.511	—	—
51	31	1	2	20.494	19.095	17.935	17.278	—	—
51	31	1	3	16.591	15.619	15.722	14.622	—	—
51	46	1	1	36.801	36.670	38.116	36.305	—	—
51	46	1	2	20.494	20.484	21.696	19.944	—	—
51	46	1	3	16.591	16.564	18.900	16.277	—	—

表 2 数値実験結果 (直径 10 km 領域)

Table 2 Results for the experiments conducted in the area of 10 km in diameter.

n_1	n_2	m	r	c_1	c_2	c_3	c_4	s_1	s_2
186	56	2	4	53.141	44.903	38.073	34.995	2.343	0.026
186	56	2	6	40.760	34.804	30.636	27.761	2.330	0.022
186	56	2	12	28.243	21.327	20.221	18.907	2.538	0.022
186	112	2	4	53.141	49.716	50.232	46.013	2.343	0.390
186	112	2	6	40.760	38.631	41.152	33.575	2.330	0.366
186	112	2	12	28.243	24.676	26.575	21.512	2.538	0.356
186	167	2	4	53.141	52.689	55.029	50.207	2.343	1.828
186	167	2	6	40.760	40.666	42.834	37.069	2.330	1.662
186	167	2	12	28.243	27.283	25.756	22.533	2.538	1.749

表 3 数値実験結果 (直径 15 km 領域)

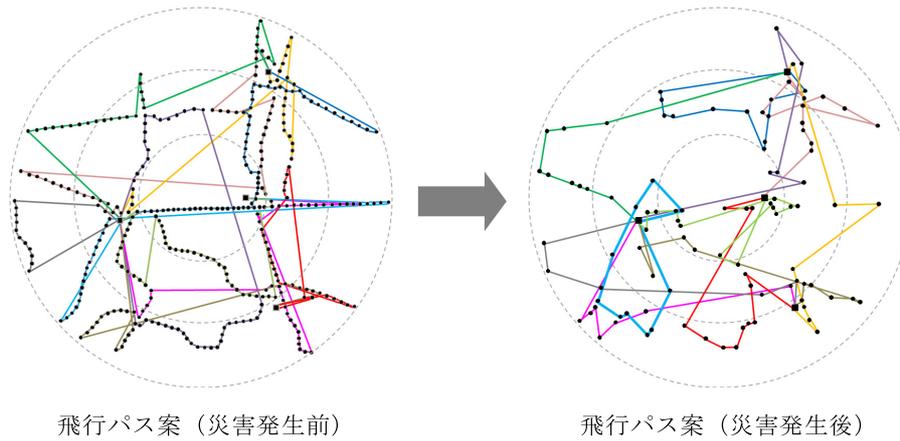
Table 3 Results for the experiments conducted in the area of 15 km in diameter.

n_1	n_2	m	r	c_1	c_2	c_3	c_4	s_1	s_2
336	101	4	7	58.784	50.409	47.409	40.318	24.018	0.243
336	101	4	11	43.430	37.526	33.893	29.188	24.420	0.248
336	101	4	22	26.771	22.400	25.866	20.588	24.703	0.255
336	202	4	7	58.784	56.124	58.601	48.303	24.018	3.619
336	202	4	11	43.430	41.489	41.490	36.837	24.420	3.550
336	202	4	22	26.771	25.219	30.962	23.911	24.703	3.438
336	302	4	7	58.784	58.564	62.970	51.432	24.018	17.307
336	302	4	11	43.430	43.172	44.645	39.933	24.420	16.948
336	302	4	22	26.771	26.500	29.933	25.389	24.703	16.907

一インスタンスでも計算結果が異なる可能性がある。そこで、ここでは各インスタンスを 5 題解き、表中にはこれら 5 題を解いた結果得られた値の平均値を示した。

- c_1, c_2, c_3, c_4 の単位は分であり、 s_1, s_2 の単位は秒である。また、 s_1, s_2 に関して、平均計算時間が 0.01 秒以下の場合には横線とした。

表 1 から表 3 において、 $\alpha = 0.3$ で検査箇所数を定めた場合に $\min\{c_2, c_3\} = c_3$ となる割合は約 89% である。これは $\alpha = 0.3$ である場合はアルゴリズム 2 の STEP1 の方法よりも、アルゴリズム 2 の STEP2 の方法の方が、災害情報収集時間がより短い飛行パスを生成できることを示している。つまり、 $\alpha = 0.3$ である場合は検査対象箇所の中から検査箇所となる割合が比較的小さいことから、すべての検査対象箇所を含む飛行パスを利用して災害発生後の飛行



飛行パス案 (災害発生前)

飛行パス案 (災害発生後)

図 9 災害発生前後の飛行パス案

Fig. 9 Flight path plans before and after a disaster strikes.

パスを生成する STEP1 の方法よりも、災害発生後に判明する検査箇所限定してそれを生成する STEP2 の方法の方が、災害情報収集時間の短縮により有効であることを示している。他方、 $\alpha = 0.6, 0.9$ で検査箇所数を定めた場合に $\min\{c_2, c_3\} = c_2$ となる割合は約 83% である。これは、 $\alpha = 0.3$ の場合とは反対に、検査対象箇所の多くが検査箇所となることから、アルゴリズム 2 の STEP2 の方法よりも、すべての検査対象箇所を含む飛行パスを利用して災害発生後の飛行パス生成する STEP1 の方法の方が、災害情報収集時間の短縮により有効であることを示している。

一方、表 1 から表 3 の $r \geq 2$ であるインスタンスにおいて、 $\min\{c_2, c_3\}$ と c_4 の平均値はそれぞれ表 1 では 16.447 と 15.925、表 2 では 35.674 と 32.508、表 3 では 39.419 と 35.100 である。よって、アルゴリズム 2 の STEP4 における局所探索法により、表 1 から表 3 における $\min\{c_2, c_3\}$ は、平均的にそれぞれ 3.174%, 8.875%, 10.957% 改善されたことが確認できる。また、表 1 から表 3 における s_2 はそれぞれ 0.01 秒以下、1.828 秒以下、17.307 秒以下であることから、この数値実験で扱ったインスタンス規模ならば、災害発生後に 20 秒以下で各ラジコン飛行機の飛行パスを決定できるものと推察される。提案したアルゴリズムを適用して求めたラジコン飛行機の飛行パス案として、 $(n_1, n_2, m, r) = (336, 101, 4, 11)$ であるインスタンスに対する結果を図 9 に示す。ここで、図 9 左は問題 (P) にアルゴリズム 1 を適用して求めた場合の、図 9 右は問題 (Q) にアルゴリズム 2 を適用して求めた場合の飛行パス案である。また図 9 においては、各ラジコン飛行機の飛行パス案を異なる色で示している。

2 章においては、問題 (P) で求めた飛行パスを利用して各ラジコン飛行機の初期配置を決定する方法を示した。そして、アルゴリズム 2 の STEP1 においては、その方法で各ラジコン飛行機は配置されているものとして飛行パスを求めた。それゆえ、ラジコン飛行機の初期配置を他の方法

表 4 ラジコン飛行機の初期配置方法に対する災害情報収集時間

Table 4 Results for the experiments conducted for three deployment strategies.

n_1	n_2	m	r	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3
336	101	4	7	50.719	47.862	47.907	42.715	40.229	41.466
336	101	4	11	37.127	37.127	38.225	31.193	31.902	31.465
336	101	4	22	28.629	28.976	28.983	24.540	24.794	24.794
336	202	4	7	62.619	62.536	62.350	56.303	55.596	54.222
336	202	4	11	44.152	42.979	46.122	38.721	37.843	38.105
336	202	4	22	26.741	27.785	27.611	24.794	26.770	25.745
336	302	4	7	64.230	64.218	66.157	60.845	60.583	61.118
336	302	4	11	45.666	44.443	48.665	42.147	41.152	43.938
336	302	4	22	31.408	31.845	31.845	27.794	29.053	29.199

で定めると、アルゴリズム 2 の STEP1 で生成する飛行パスの実行可能性を保証することができない。しかし、アルゴリズム 2 の STEP2 においては、各ラジコン飛行機の初期配置を他の方法で定めても実行可能な飛行パスを生成することができる。そこで、アルゴリズム 2 の STEP2 におけるラジコン飛行機の初期配置を、2 章で示した方法ではなく“各保守区に均等配置する方法”や“各保守区にランダム配置する方法”で定めた場合に、それらが災害情報収集時間にどのように影響するかを検証するための数値実験を実施した。その結果を表 4 に示す。ただし表 4 については、以下のとおりである。

- 図 8 の直径 15 km 領域 ($n_1 = 336, m = 4$) を対象にした。また、 n_2 と r の値は表 1 から表 3 の場合と同様な方法で定めた。
- ラジコン飛行機の初期配置を“2 章で示した方法”、“各保守区に均等配置する方法”、“各保守区にランダム配置する方法”で定めた場合に、アルゴリズム 2 の STEP2 で生成した飛行パス案の災害情報収集時間 (分) をそれぞれ A_1, A_2, A_3 とし、これらの飛行パス案に局所探索法を適用した場合の災害情報収集時間 (分) をそれぞれ B_1, B_2, B_3 とした。
- 表 4 に示した数値は各インスタンスを 5 題解いた場合



図 10 検査対象箇所分布例

Fig. 10 An example of a distribution of potential inspection points.

の平均値である.

表 4 における A_1, A_2, A_3 の中で、値が最小となるインスタンスの数はそれぞれ 4, 5, 1 であり、 B_1, B_2, B_3 の中で値が最小となるインスタンスの数はそれぞれ 4, 4, 1 である. この結果から、ラジコン飛行機をランダムに配置した場合よりも、それを 2 章で示した方法で配置した場合や均等に配置した場合の方が、災害情報収集時間が最小となるインスタンス数が多くなっていることが確認できる. しかし、ラジコン飛行機を 2 章で示した方法で配置した場合とそれを均等に配置した場合では、災害情報収集時間が最小となるインスタンス数に大きな差を確認することはできない. 一方、この数値実験においては検査対象箇所が各保守区の周りにほぼ均等に分布している場合 (図 8 参照) を対象としたが、ラジコン飛行機を各保守区に均等に配置しておく、災害情報収集時間の長時間化が懸念される場合も存在する. たとえば、使用可能なラジコン飛行機が 4 台で保守区が 2 か所であるとき、検査対象箇所が図 10 のように片方の保守区の周辺に集中して分布している場合を考える. このような場合に、ラジコン飛行機を保守区 1, 2 に 2 台ずつ均等に配置すると、保守区 1 に配置したラジコン飛行機の飛行時間が保守区 2 に配置したそれよりも極端に長くなり、結果として災害情報収集時間が長時間化してしまう懸念がある. そして、同様な状況はラジコン飛行機を各保守区にランダムに配置した場合 (たとえば図 10 においてラジコン飛行機を保守区 1 に 1 台、保守区 2 に 3 台ランダムに配置した場合) にも発生する. したがって、表 4 に示した数値実験結果とこのような状況を考慮すると、“各保守区に均等配置する方法”や“各保守区にランダム配置する方法”よりも“2 章で示した方法”の方が情報収集時間の短縮により有効であると推察される. なお、表 4 の A_1 と表 3 の c_3 はともにラジコン飛行機配置を 2 章で示した方法で定めた場合の値であるが、この数値実験においては検査箇所を検査対象箇所の中からランダムに選択していることから、それらの値も異なっている.

6. おわりに

本論文では、災害発生時に通信インフラに依存することなく安定的に鉄道現場の災害情報を収集するためのシステムとして、ラジコン飛行機を活用した鉄道災害情報システムを取り上げた. そして、ラジコン飛行機の飛行経路を災害情報収集時間が最小となるように決定する問題を設定し、

この問題に対するアルゴリズムを提案した. また、平常時におけるラジコン飛行機の配置方法を示すとともに、災害発生時におけるラジコン飛行機の飛行経路の決定方法を提案した. さらに、実際の鉄道線区を対象とした問題例に対する数値実験を実施し、災害情報収集箇所が 336 以下の問題であれば、提案法により 20 秒以下でラジコン飛行機の飛行経路を決定できることを確認した. しかしながら、ラジコン飛行機のバッテリー制約を組み入れた場合の問題や、各ラジコン飛行機の性能が異なる場合の問題なども実務上重要な問題であり、今後それらの問題に対する解法アルゴリズムについても研究を進める必要がある.

参考文献

- [1] Bennett, P.J., Soga, K., Wassell, I.J., et al.: Wireless sensor networks for underground railway applications: case studies in Prague and London, *Smart Structures and Systems*, Vol.6, No.5-6, pp.619–639 (2010).
- [2] Hada, A., Soga, K., Middleton, C.R., et al.: Condition Monitoring System for Railway Structures in Hammersmith, *9th World Congress on Railway Research* (2011).
- [3] 間瀬憲一, 岡田 啓, 大和田泰伯: 中山間被災地復興へ向けた無線ブロードバンド提供の実践的取組み—山古志ねっと共同実験プロジェクトの概要, *電子情報通信学会誌*, Vol.91, No.10, pp.857–861 (2008).
- [4] Kawasaki, K., Shimizu, A., Monden, K., et al.: Wireless Ad-hoc Network-Based Tourist Information Delivery System, *Proc. 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, pp.138–142, IEEE Computer Society (2006).
- [5] 陶山優一, 横田裕介, 大久保英嗣: 移動端末を用いた災害情報システムにおける DTN ルーティング手法, *電子情報通信学会技術研究報告ユビキタス・センサネットワーク*, Vol.108, No.399, pp.117–121 (2009).
- [6] 佐藤剛至, 柴田義考: 災害情報システムのための動的ネットワーク再構成手法に基づいたコグニティブ無線の研究, *情報処理学会研究報告コンピュータセキュリティ*, Vol.48, pp.1–7 (2010).
- [7] SenseFly, available from (<http://www.sensefly.com/products/swinglet-cam/>).
- [8] 小野里雅彦, 中西弘明: エアロロボットによる上空からの災害情報の収集, *ロボット*, Vol.164, pp.4–8 (2005).
- [9] Fisher, M.L. Jaikumar, R. and Wassenhove, L.N.: A multiplier adjustment method for the generalized assignment problem, *Management Science*, Vol.32, No.9, pp.1095–1103 (1986).
- [10] Garey, M.R. and Johnson, D.S.: *Computers and intractability; A guide to the theory of NP-completeness*, pp.46–48, Freeman, San Francisco (1980).
- [11] Hung, R.W. and Chang, M.S.: Finding a minimum path cover of a distance-hereditary graph in polynomial time, *Discrete Applied Mathematics*, Vol.155, pp.2242–2256

- (2007).
- [12] Lin, R., Olariu, S. and Pruesse, G.: An optimal path cover algorithm for cographs, *Computers & Mathematics with Applications*, Vol.30, No.8, pp.75–83 (1995).
 - [13] Gu, Q. and Peng, S.: Node-to-set disjoint paths problem in star graphs, *Information Processing Letters*, Vol.62, No.4, pp.201–207 (1997).
 - [14] Suzuki, Y., Kaneko, K. and Nakamori, M.: Node-disjoint paths algorithm in a transposition graph, *IEICE Trans. Inf. Syst.*, E89-D, pp.2600–2605 (2006).
 - [15] Asdre, K. and Nikolopoulos, S.: A linear-time algorithm for the k-fixed-endpoint path cover problem on Cographs, *Networks*, Vol.50, pp.231–240 (2007).
 - [16] Seymour, P.D.: Disjoint paths in graphs, *Discrete Mathematics*, Vol.29, pp.293–309 (1980).
 - [17] Shiloach, Y.: A polynomial solution to the undirected two paths problem, *J. ACM*, Vol.27, pp.445–456 (1980).
 - [18] Asdre, K. and Nikolopoulos, S.: A polynomial solution to the k-fixed-endpoint path cover problem on proper interval graphs, *Theoretical Computer Science*, Vol.411, pp.967–975 (2010).
 - [19] Frederickson, G.N., Hecht, M.S. and Kim, C.E.: Approximation algorithms for some routing problems, *Siam Journal of Computing*, Vol.7, No.2, pp.178–193 (1978).
 - [20] Lawler, E.: *Combinatorial optimization: Networks and matroids*, pp.197–199, Holt, Rinehart and Winston (1976).
 - [21] 久保幹雄, 田村明久, 松井知己 (編集): 応用数理計画ハンドブック, pp.532–539 (2002).



土屋 隆司 (正会員)

1985年東京大学理学部情報科学科卒業。同年日本国有鉄道入社。1987年鉄道総合技術研究所入所。故障診断システム, セーフティクリティカルシステムの要求定義技術, 異常時における旅客案内等の研究開発に従事。現在, 信号・情報技術研究部長。電気学会会員。



廣瀬 壮一

1982年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年京都大学工学部助手。ノースウェスタン大学ポストドクター研究員, 岡山大学助手および助教授を経て, 1998年東京工業大学工学部助教授, 1999年東京工業大学大学院情報理工学研究科教授, 現在に至る。応用力学, 非破壊検査に関する研究に従事。土木学会会員。



羽田 明生 (正会員)

2007年東北大学大学院情報科学研究科博士課程満期退学。同年鉄道総合技術研究所入社。輸送情報技術研究部研究員。2009年ケンブリッジ大学工学部客員研究員。現在, 鉄道総合技術研究所信号・情報技術研究部。土木構造物維持管理システム, 勤務計画作成システム, センサネットワーク等の研究開発に従事。スケジューリング学会会員。



流王 智子

2009年筑波大学大学院システム情報工学研究科修士課程修了。同年鉄道総合技術研究所入社。輸送情報技術研究部研究員。2011年ケンブリッジ大学工学部客員研究員, 現在に至る。構造物ヘルスマニタリング, 無線センサネットワーク, 勤務計画自動作成システム, 鉄道設備異常判別手法等に関する研究に従事。日本オペレーションズ・リサーチ学会会員。