九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

弾性波探査のためのドローン群の巡回経路最適化

濱里，洋平
九州電力送配電株式会社

坂口，聡範
九州大学大学院システム情報科学研究院

山本，薫
九州大学大学院システム情報科学研究院

辻，健
東京大学大学院工学系研究科

https://hdl.handle.net/2324/7170247

出版情報：Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers. 36 (7), pp.181-186, 2023. THE INSTITUTE OF SYSTEMS, CONTROL AND INFORMATION ENGINEERS (ISCIE)
バージョン：
権利関係：© 2023 一般社団法人　システム制御情報学会

KYUSHU UNIVERSITY

SCI'22 論文 特集号—II

論　文

弾性波探査のためのドローン群の巡回経路最適化*

濱里　洋平†・坂口　聡範‡・山本　薫‡・辻　健§

Multiple Drone Route Optimization for a Seismic Survey*

Yohei Hamasato†, Akinori Sakaguchi‡, Kaoru Yamamoto‡ and Takeshi Tsuji§

We study the problem of optimal route generation for visiting measurement points in seismic surveys. For this purpose, we consider the employment of multiple drones to install seismometers at the measurement points. An algorithm combining fuzzy clustering and the traveling salesman problem is proposed to generate an energy-efficient path for each drone. Several practical conditions typically arising in this application are also taken into account.

1. はじめに

弾性波探査とは，弾性波を利用し非破壊で地盤内部を可視化し，さらにその物理的特性（物性）を解明する計測技術である．ここでは弾性波探査の中で，表面波を利用して地下のS波速度を推定する表面波探査に注目する．Fig. 1に示すように，表面波探査の計測は加振器で表面波を発生させ，設置した地震計で波動を検知することによって伝搬時間差より地盤のS波速度構造を把握する探査法である．S波とは地震波の実体波のひとつであり，地盤のS波速度構造は地盤内部の物性を知るために重要な指標である．表面波探査により得られたS波速度構造の一例 [1] を Fig. 2 に示す．ここで，星マークは加振器，黒点は地震計の位置を表す．従来の弾性波探査では，地質技術者がこれらの加振器および多数の地震計を手作業で設置するため，その負担が非常に大きい．そこで，1台のドローンを用いた弾性波探査が提案されている [2]．Fig. 3 に示すように，ドローンに1個の地震計を搭載し，ドローンが多数の測定点を巡回することで，S

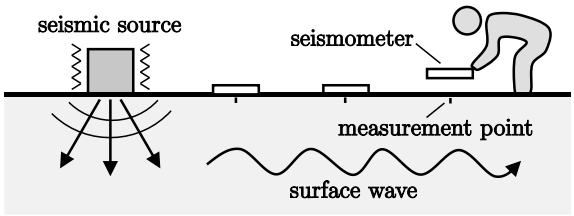

Fig. 1　Seismic survey by humans

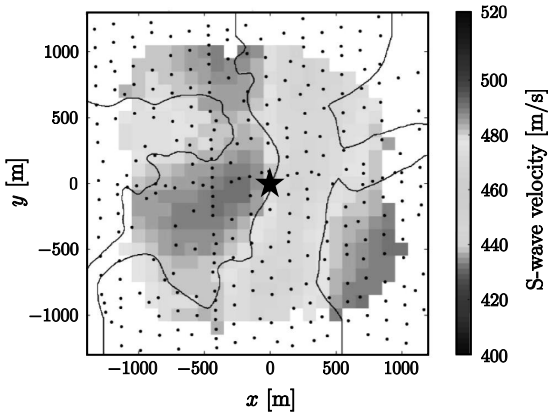

Fig. 2　S-wave velocity obtained by a seismic survey, where the star and dots show the locations of the seismic source and seismometers, respectively [1]

* 原稿受付　2022年7月11日
* 第66回システム制御情報学会研究発表講演会にて発表 (2022年5月)
† 九州電力送配電株式会社　Kyushu Electric Power Transmission and Distribution CO., INC; 2-1-82 Watanabedori, Chuo-ku, Fukuoka, Fukuoka 810–0004, JAPAN
‡ 九州大学 大学院 システム情報科学研究院　Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University; 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, Fukuoka 819–0395, JAPAN
§ 東京大学 大学院 工学系研究科　School of Engineering, The University of Tokyo; 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113–8656, JAPAN
Key Words: multi-drone routing, drone applications in seismic survey, multiple traveling salesman problem, fuzzy c-means clustering.

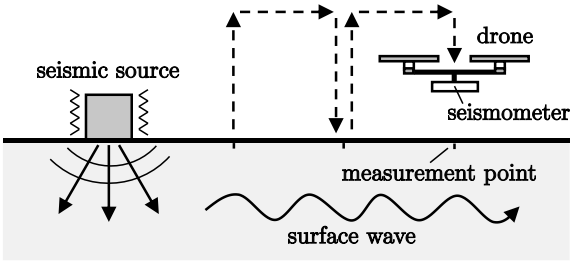

Fig. 3 Seismic survey using a drone with a seismometer

波速度構造マップを自動生成できる．しかしながら，加振器から連続的にシグナルを発振し，重合することでノイズを軽減するため，一つの測定点で長時間（30 分程度）の計測が必要である [2]．つまり，地震計を搭載したドローンが測定点に着地した後，モータを停止したアイドリング状態で長時間とどまるため，広大なエリアの S 波速度構造マップの作成には膨大な時間とバッテリーの電力を要する．

本研究では，複数台のドローンを用いた大規模な弾性波探査（Fig. 2 のように測定点が 100 点程度）について考える．各ドローンは 1 台の地震計を搭載し，あらかじめ指定された複数の測定点に向かい計測を行う．計測終了後，ドローンは離陸し，次の測定点へ移動する．

以下に詳細を述べる．文献 [3] の複数巡回セールスマン問題 (MTPS) の解法アルゴリズムをベースに，複数ドローンの経路最適化アルゴリズムを構築する．数値シミュレーションでは，提案アルゴリズムの妥当性の検証および弾性波探査へのドローンの適用可能性を検証する．

2. 弾性波探査における複数台ドローンの経路最適手法

本節では，同一な $n(\geq 2)$ 台のドローンが出発点から離陸して，効率よく $N(\gg n)$ 個の測定点を探査し，再び出発点に帰還することを考える．出発地点には充電設備と加振器が存在すると仮定する．ドローンのインデックス集合を $\mathcal{D}:=\{1,\cdots,n\}$，測定点のインデックス集合を $\mathcal{M}:=\{1,\cdots,N\}$ とおく．経路生成計画の前準備として，集合 $\mathcal{M}$ を n 個の相互に離散的な部分集合 $\mathcal{M}_1,\cdots,\mathcal{M}_n$ に分割する．それらを 1 台のドローンそれぞれに割り当て，総エネルギー推定値が最小になるようにする．本研究では，弾性波探査への実用面から，二つのケースに対して文献 [3] をベースにした最適経路を求める解法を提案する．**ケース 1** はユーザが保有するドローン台数が多く，全ドローンがバッテリー充電せずに巡回する場合である．**ケース 2** はユーザが保有するドローン台数が少なく，出発点でバッテリー充電を行いながら巡回する場合である．次節ではそれらの詳細について述べる．

2.1 バッテリー充電なしの場合（ケース 1）

実用上，探査時間を短くすることが望ましく，ホモジニアスなドローン群の場合，各ドローンの消費エネルギーを均等化すればよい．しかし，計測時間が長時間であるため計測時に待機しているドローンのアイドリング状態での消費エネルギーを無視することができない．そのため，ドローンが巡回を行ったときの各飛行状態（上昇，前進飛行，下降，アイドリング）での消費エネルギーを正確に評価する必要がある．そこで，ドローン k が測定点 i から j まで移動する際の総コストを以下のように考える．

$$E_{k,ij}=E_k^{\mathrm{up}}+E_{ij}^{\mathrm{fwd}}+E_k^{\mathrm{down}}+E^{\mathrm{idle}} \tag{1}$$

ここで，E_k^{up}, E_k^{down} は上昇・下降による消費エネルギーである．本研究では，衝突回避のために全ドローンは異なる高度で飛行するため，これらの消費エネルギーは各ドローンに依存する．E_{ij}^{fwd} は測定点 i から j までの前進飛行による消費エネルギー，E^{idle} は測定点 j でアイドリングするときの消費エネルギーである．

出発点を考慮するためにインデックス 0 を出発点として割り当て，$\overline{\mathcal{M}}:=\mathcal{M}\cup\{0\}$ とおき，同様に $\overline{\mathcal{M}}_k:=\mathcal{M}_k\cup\{0\}, k\in\mathcal{D}$ とおく．また，出発点でのアイドリングは必要ないため，すべての $k\in\mathcal{D}$ に対して $E_0^{\mathrm{idle}}=0$ とする．測定点 i から j への経路の有無を表す 2 値変数 $\delta_{ij}(i,j\in\overline{\mathcal{M}})$ を導入することで，消費エネルギーは以下のように定式化される．

$$\min_{(\delta_{ij})} E := \sum_{k=1}^{n} E_k = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i,j\in\overline{\mathcal{M}}_k, j\neq i} E_{k,ij}\delta_{ij} \tag{2a}$$

$$\text{subject to} \sum_{j\in\overline{\mathcal{M}}_k, j\neq i} \delta_{ij}=1,\ {}^{\forall}i\in\overline{\mathcal{M}_k},\ {}^{\forall}k\in\mathcal{D} \tag{2b}$$

$$\sum_{i\in\overline{\mathcal{M}}_k, i\neq j} \delta_{ij}=1,\ {}^{\forall}j\in\overline{\mathcal{M}_k},\ {}^{\forall}k\in\mathcal{D} \tag{2c}$$

$$\delta_{ij}=0,\ {}^{\forall}i\in\overline{\mathcal{M}_l},\ {}^{\forall}j\in\overline{\mathcal{M}_k},\ l\neq k \tag{2d}$$

$$\delta_{ij}\in\{0,1\},\ i,j\in\overline{\mathcal{M}} \tag{2e}$$

E_k はドローン k が出発点から割り当てられた測定点 $\mathcal{M}_k$ を巡回して，再び出発点に帰還するまでの総消費エネルギーである．制約条件 (2b) は $\mathcal{M}_k$ の各測定点から出発する経路が 1 本のみであることを，制約条件 (2c) は各測定点へ向かう経路が 1 本のみであることを保証する．制約条件 (2d) は各ドローンが割り当てられた測定点のみ巡回することを保証し，(2e) は二項制約である．

MTSP の解法について説明する．はじめに，ユーザによって与えられた N 個の測定点を，n 台のドローンが必ず巡回する n 個の初期エリアに分割する．エリアの分割には，N 測定点を n エリアにあいまいにクラスタリングするファジィ c-means 法 [4] を適用する．一般的なクラスタリング手法では測定点とドローン間の距離によってクラスタリングを行うが，経路生成の前で消費エネルギーが計算されないため，消費エネルギーを考慮した測定点の割り振りができない．一方，ファジィ c-means 法ではクラスタリングは行わず帰属度を計算する．この帰

属度を経路生成のアルゴリズムで参照すると，経路生成と測定点の割り振りを同時に行うことが可能になり，消費エネルギーを考慮した測定点の割り振りが可能となる．ファジィc-means法は次の最小化問題として定式化される．

$$\begin{aligned}&\text{minimize}\ \ J_\alpha(\boldsymbol{U},\,\boldsymbol{p}_\mathrm{a}) := \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{N}(u_{ki})^\alpha \|\boldsymbol{p}_{\mathrm{m},i}-\boldsymbol{p}_{\mathrm{a},k}\|^2\\ &\text{subject to}\ \sum_{k=1}^{n}u_{ki}=1,\ {}^\forall i=1,\cdots,N\end{aligned} \tag{3}$$

ここで，$\boldsymbol{p}_\mathrm{a}=[\boldsymbol{p}_{\mathrm{a},1}^\top\cdots\ \boldsymbol{p}_{\mathrm{a},n}^\top]^\top\in\mathbb{R}^{2n}$ は出発点を原点とする座標系 $\mathcal{F}=(\boldsymbol{e}_x,\boldsymbol{e}_y)$ における巡回エリアの重心位置ベクトル，$\boldsymbol{p}_{\mathrm{a},k}\in\mathbb{R}^2$ は巡回エリア k の重心位置ベクトルである．$\boldsymbol{p}_{\mathrm{m},i}\in\mathbb{R}^2$ は測定点 i の位置ベクトルである．$\boldsymbol{U}=[u_{ki}]\in\mathbb{R}^{n\times N}$ は，N 測定点が n エリアに属する度合いである帰属度を表す帰属行列である．要素 $u_{ki}\in\mathbb{R}$ はエリア k に対する測定点 i の帰属度である．その範囲は $u_{ki}\in[0,1]$ で，u_{ki} が1に近いほど測定点 i がエリア k に属している度合いが高いことを意味する．$\alpha\geq 1$ はユーザによって与えられる帰属度の広がりに関する定数である．この最小化問題のヒューリスティックな解法 [4] により，与えられた α における帰属行列 $\boldsymbol{U}$ と巡回エリアの重心位置ベクトル $\boldsymbol{p}_\mathrm{a}$ が得られる．$\boldsymbol{U}$ から，巡回エリア k への帰属度 u_{ki} がある閾値 $\beta\in[0,1]$ 以上となる測定点 i の集合，つまり巡回エリアの重心に近い測定点の集合

$$\mathcal{M}_k^{(0)}=\{\ i\in\mathcal{M}\mid u_{ki}\geq\beta\ \} \tag{4}$$

をドローン k の初期エリアとして割り当てる．ここで，ユーザは初期エリア $\mathcal{M}_k^{(0)}$ が以下の条件を満たすように β を調整する．

$$\mathcal{M}_k^{(0)}\cap\mathcal{M}_l^{(0)}=\emptyset\quad\forall k\neq l \tag{5}$$

$$\bigcup_{k=1}^{n}\mathcal{M}_k^{(0)}\neq\mathcal{M} \tag{6}$$

ドローンの初期エリアが重なってしまう場合，重なったエリアに存在する測定点を計測するドローンを一意に決定することができなくなる．そのため，(5) 式の条件を加える．また，消費エネルギーの計算は測定点の数だけでなく，与えられた測定点を巡回する経路も既知である必要があり，初期エリアを大きくすると，経路生成した後に消費エネルギーの均等化が困難になってしまう．そのため，(6) 式の条件を加える．以上の (5) 式，(6) 式の条件を満たす初期エリアを，ドローンの消費エネルギーを考慮せずに分割する．

つぎに，ドローン k の巡回エリアの測定点を $\mathcal{M}_k=\mathcal{M}_k^{(0)}$ とし，未割り当ての測定点 $\mathcal{M}\setminus\bigcup_{k=1}^{n}\mathcal{M}_k$ を消費エネルギーを考慮して分配する．測定点 $\mathcal{M}_k$ に対して，巡回セールスマン問題（TSP）を解き，全ドローンの消費エネルギー E_k，$k=1,\cdots,n$ を求める．TSP の解法には，厳密解法・近似解法含め様々なものが提案されているが，問題の規模により適切なものを選ぶこととする．本研究ではあらかじめオフラインで問題を解いて経路を生成し，得られた最適経路を実際の探査の際にドローンに実装して巡回させることを想定しており，求解のための計算効率は本研究の対象外としている．消費エネルギーが最小となるドローン $l\in\mathrm{argmin}_{k\in\mathcal{D}}E_k$ に，未割り当ての測定点のうちエリア l への帰属度が最大の測定点 $j\in\mathrm{argmax}_{i\in\mathcal{M}\setminus\bigcup_{k=1}^{n}\mathcal{M}_k}u_{li}$ をドローン l の割り当てエリアの測定点集合 $\mathcal{M}_l$ に加える．すべての測定点が割り当てられるまで繰り返すことで，各ドローンの消費エネルギーが均一になるような最適巡回経路が求められる．また，ユーザが設定するパラメータにより計算時間が前後するが，OS；Windows 11，プロセッサ；AMD Ryzen 5 3600 6-Core Processor 3.6 GHz，RAM；16GB の環境で，提案アルゴリズムにより **3** 節に示す数値例題（測定点数100点）を解く場合の計算時間は10[s] 程度である．

最後に，MTSP の解法を以下にまとめる．**ステップ 1** から**ステップ 5** がファジィc-means法の解法 [4] で，α を1に近づけると探査エリア上でドローンに割り当てられたエリアの重心が均一に配置され，反対に大きな値にするほど探査エリア中央に集まる傾向がある．そのため α を大きくとると，マップの四隅に近い測定点の帰属度がすべてのドローンでほぼ等しくなり，探査エリアの重なりとそれに伴うドローンの飛行経路の交錯が生じる度合いが高くなる．これを避けるため，特定のドローンに割り振るべきだと明らかな測定点に対しては，そのドローンへの帰属度が大きくなるように α を調整する．**ステップ 6** 以降が MTSP の解法である．β の増加に伴い，$\mathcal{M}_k^{(0)}$ に割り振られない測定点の数が増加する．これらの測定点はアルゴリズムで消費エネルギーを考慮しながら各ドローンに割り当てが行われるため，計算結果から消費エネルギーの均等化ができていなければ β の値を大きくするといったように β を調整する．

ステップ 1 $s=0$ とし，$\sum_{k=1}^{n}u_{ki}=1$ という条件のもと初期値 $\boldsymbol{U}^{(0)}$ を適当に与える．

ステップ 2 $s=s+1$ とする．

ステップ 3 エリア k の重心位置 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{a},k}^{(s)}$ $(k=1,\cdots,n)$ を次式で求める．

$$\boldsymbol{p}_{\mathrm{a},k}^{(s)}=\frac{\displaystyle\sum_{i=1}^{N}\left(u_{ki}^{(s-1)}\right)^\alpha\boldsymbol{p}_{\mathrm{m},i}}{\displaystyle\sum_{i=1}^{N}\left(u_{ki}^{(s-1)}\right)^\alpha} \tag{7}$$

ステップ 4 エリア k への帰属度を次式で計算し，$u_{ki}^{(s)}\in[0,1]$ と $\sum_{k=1}^{n}u_{ki}^{(s)}=1$ を満たすために $u_{ki}^{(s)}=\dfrac{u_{ki}^{(s)}}{\sum_{l=1}^{n}u_{li}^{(s)}}$ でスケーリングを行う．

$$u_{ki}^{(s)} = \frac{1}{\displaystyle\sum_{l=1}^{n}\left(\frac{\|\boldsymbol{p}_{\mathrm{m},i}-\boldsymbol{p}_{\mathrm{a},k}^{(s)}\|}{\|\boldsymbol{p}_{\mathrm{m},i}-\boldsymbol{p}_{\mathrm{a},l}^{(s)}\|}\right)^{1/(\alpha-1)}},$$
$$k=1,\cdots,n,\quad i=1,\cdots,N \tag{8}$$

ステップ 5 終了条件

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{n}\|u_{ki}^{(s)}-u_{ki}^{(s-1)}\| \le \epsilon \tag{9}$$

を満たさない場合は**ステップ 2** に戻り，満たす場合は $\boldsymbol{U}^{(s)}=[u_{ki}^{(s)}]$ と $\boldsymbol{p}_{\mathrm{a}}^{(s)}$ をヒューリスティックな解とし，次のステップへ進む．

ステップ 6 (4) 式が (5) 式と (6) 式を満たすように β を調整する．

ステップ 7 (4) 式の初期エリアの測定点 $\mathcal{M}_k^{(0)}$ をドローン k に割り当てる．つまり，$\mathcal{M}_k=\mathcal{M}_k^{(0)}$.

ステップ 8 各ドローンに割り当てられた測定点 $\mathcal{M}_k$ に対して TSP を解き，求めた巡回経路での消費エネルギー $E_k(k=1,\ldots,n)$ を計算する．

ステップ 9 ドローン $l\in\mathrm{argmin}_{k\in\mathcal{D}}E_k$ に，測定点 $j\in\mathrm{argmax}_{i\in\mathcal{M}\setminus\bigcup_{k=1}^{n}\mathcal{M}_k}u_{li}$ を割り当てる．

ステップ 10 すべての測定点がドローンへ割り振られたら終了し，そうでなければ**ステップ 8** に戻る．

2.2 バッテリー充電ありの場合（ケース 2）

2.1 節で提案した解法によって，バッテリー充電することなくすべての測定点を巡回するのに必要なドローンの台数の上界値 n^* を求めることができる．ここでは，ユーザが所持するドローン台数が $n<n^*$ のときを考える．**2.1** 節の解法によって得られる最適経路を，満充電のバッテリーで巡回し帰還可能な最大経路で分割することで，バッテリー充電ありの場合に拡張する．**ケース 2** の解法を以下にまとめる．

ステップ 1 **2.1** 節で提案したアルゴリズムを用いて MTSP を解き，各ドローンの最適経路を求める．

ステップ 2 ドローン k が巡回する測定点の集合 $\mathcal{M}_k=\{\mathrm{m}_k^{(1)},\mathrm{m}_k^{(2)},\cdots,\mathrm{m}_k^{(|\mathcal{M}_k|)}\}$ において，出発点から**ステップ 1** で求めた最適経路に沿って $\mathrm{m}_k^{(1)},\mathrm{m}_k^{(2)},\cdots,\mathrm{m}_k^{(i)}$ という順番で巡回し出発点へ帰還する経路の消費エネルギーを $E_{k,i}$ とおく．

ステップ 3 $E_{k,i}>E_{\max}$ となる i の最小値を $i_{\min}$ とし，$m_k^{i_{\min}-1}$ まで巡回し出発点に帰還する経路を分割経路とする．

ステップ 4 ドローン k が担当するすべての測定点が分割経路に含まれれば終了し，そうでなければ巡回する順番に並んだ残りの測定点の集合を $\mathcal{M}_k$ とし，再度 TSP を解いて，**ステップ 2** に戻る．

3. 数値シミュレーション

Table 1 Specifications of Phantom 4 Pro

Maximum ascent speed	6.0 [m/s]
Maximum descent speed	4.0 [m/s]
Maximum forward speed	5.6 [m/s]
Electric energy of battery	89.2 [Wh]

Table 2 Parameters

E_k^{up}	$29.7(2k-1.5)$ [J]
$E_{ij}^{\mathrm{forward}}$	$32.1\|p_{\mathrm{m},i}-p_{\mathrm{m},j}\|$ [J]
E_k^{down}	$356.8(2k-1.5)$ [J]
E^{idle}	18000 [J]

バッテリー充電なし（**ケース 1**）とバッテリー充電あり（**ケース 2**）のそれぞれに対して，**2.1** 節と **2.2** 節の提案手法を用いることで，弾性波探査へのドローンの適用可能性を数値シミュレーションで検証する．弾性波探査エリアは障害物のない 1×1 [km^2] の領域を考え，測定点は $N=100$ とする．ドローンの出発点と加振器およびバッテリー充電地点は探査エリアの中心とする．シミュレーションで対象とするドローンモデルは DJI 社の Phantom 4 Pro とする．その仕様を Table 1 に示す [5]. Table 1 から電力量 89.2[Wh] をエネルギー換算すると 321.1[kJ] となり，これをバッテリー容量とした．また，各飛行状態の消費エネルギー E_k^{up}，E_{ij}^{fwd}，E_k^{down}，E^{idle} は文献 [6] の値をもとに計算し，Table 2 に示す．E_k^{up} と E_k^{down} はドローン同士の衝突を回避するために 0.5[m] から 2[m] の間隔で各ドローンごとに設定した．

3.1 バッテリー充電なしの場合（ケース 1）

2.1 節の提案アルゴリズムによって，バッテリー充電することなく，すべての測定点を巡回するのに必要なドローンの台数の上界値が $n^*=9$ と求められた．ドローン台数 $n=9$，パラメータ $\alpha=1.3$, $\beta=0.6$ に設定したときの最適経路を Fig. 4 に示す．各ドローンの巡回経路を色分けしており，それらの巡回経路の消費エネルギーを記している．それらの値から，すべてのドローンの消費エネルギーがバッテリー要件 $E_k<E_{\max}=321.1$ [kJ] を満たしつつ，均等化されていることがわかる．このことから，**2.1** 節の提案アルゴリズムによって探査時間が短い巡回経路が生成されることが確認できた．

3.2 バッテリー充電ありの場合（ケース 2）

ドローン台数 $n=3<n^*$，パラメータ $\alpha=1.1$, $\beta=0.7$ に設定したときに，バッテリー充電なしでの最適経路を Fig. 5 に示す．すべてのドローンの消費エネルギーが $E_k>E_{\max}=321.1$ [kJ] となり，バッテリー充電なしにはすべての測定点を巡回できないことがわかる．一方，**2.2** 節の提案アルゴリズムによって，出発点でバッテリー

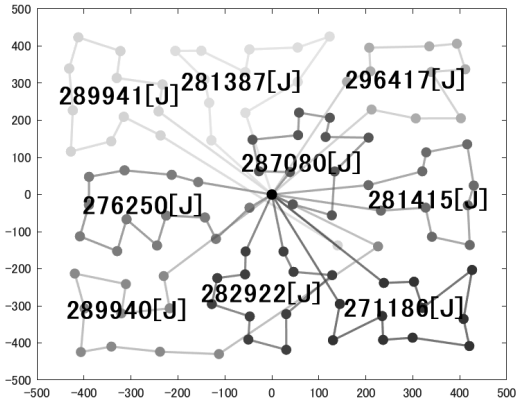

Fig. 4 Optimal paths without battery charging where $n=9$

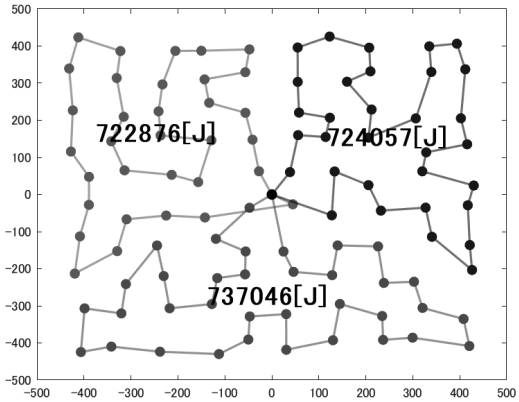

Fig. 5 Optimal paths without battery charging where $n=3$

充電を行いながら巡回した経路を Fig. 6 に示す．太線の経路が 1 回目の巡回経路，破線の経路が 2 回目の巡回経路，細線の経路が 3 回目の巡回経路を表しており，2 回のバッテリー充電ですべての測定点を巡回できる経路が生成された．

4. おわりに

本研究では，複数ドローンによる弾性波探査のための巡回経路最適化について，弾性波探査における現実的な条件を考慮したファジィクラスタリングと巡回セールスマン問題を組み合わせたアルゴリズムを提案した．弾性波探査はエリア内に分散した測定点でアイドリング状態となる必要があるため，消費エネルギーは経路長に比例しない．これを考慮するために，標準的な MTSP 問題を近似的に解くために [3] で提案されたアルゴリズムを適切に拡張した．最後に，各ドローンのバッテリー容量が限られていることを考慮し，充電のための帰還経路を生成するアルゴリズムを追加した．数値シミュレーションにより，提案したアルゴリズムが弾性波探査に利用できることを確認した．しかし，**2.2** 節の提案アルゴリズムでは，最適経路生成時にバッテリー容量制約を考慮して

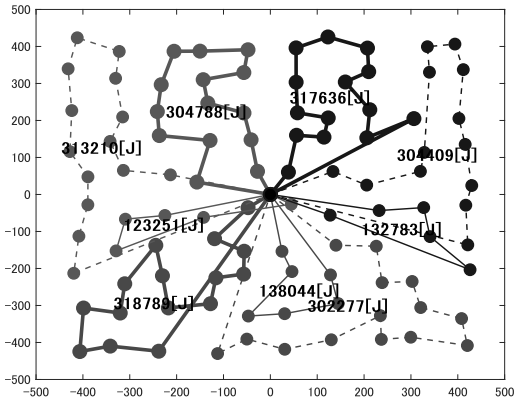

Fig. 6 Split optimal paths in Fig. 5 with battery charging where the thick, dashed, and thin lines indicate the first, second, and third paths, respectively

おらず，最終的な経路の最適性は保証されない．そこで，今後は，経路生成の時点でバッテリー容量制約を反映するようアルゴリズムの拡張に取り組む予定である．また，実際の弾性波探査において地震計が計測するノイズが加振器から近いほど軽減されることを反映するため，各ドローンが計測のためアイドリングする時間を加振器からの距離によって変えるようアルゴリズムを拡張することを検討する．

謝　辞

本研究は JSPS 科研費 JP19H02161，JP20K14766，JP20H01997，JP22H05108 の助成を受けたものです．

参 考 文 献

[1] T. Ikeda, T. Tsuji, M. Nakatsukasa, H. Ban, A. Kato, K. Worth, D. White and B. Roberts: Imaging and monitoring of the shallow subsurface using spatially windowed surface-wave analysis with a single permanent seismic source; *Geophysics*, Vol. 83, No. 6, pp. EN23–EN38 (2018)

[2] T. Tsuji, S. Tsuji, J. Kinoshita, T. Ikeda and A.B. Ahmad: 4 cm portable active seismic source (PASS) for meter- to kilometer-scale imaging and monitoring of subsurface structures; *Seismological Research Letters* (2022)

[3] 渡邊，小野，松永，金川，高橋：ファジィc-means法を用いた複数巡回セールスマン問題の一解法；日本ファジィ学会誌, Vol. 13, No. 1, pp. 119–126 (2001)

[4] J. C. Bezdek: *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press (1981)

[5] DJI Phantom 4 Pro: `https://www.dji.com/jp/phantom-4-pro/info#specs`

[6] R. Alyassi, M. Khonji, A. Karapetyan, S. C.-K. Chau, K. Elbassioni and C.-M. Tseng: Autonomous recharging and flight mission planning for battery-operated autonomous drones; *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* (2022)

著 者 略 歴

濱里 洋平 (学生会員)

2021 年 3 月九州大学工学部電気情報工学科卒業，2023 年 3 月九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子工学専攻修士課程修了．同年 4 月九州電力送配電株式会社に入社，現在に至る．

坂口 聡範

2021 年 3 月大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻博士後期課程修了．博士（工学）．2021 年 4 月九州大学学術研究員，2022 年 1 月特任助教，2023 年 4 月助教となり，現在に至る．変形機構を有するドローンの研究に従事．IEEE，日本ロボット学会，日本機械学会などの会員．

山本 薫

2016 年 1 月ケンブリッジ大学工学部情報工学科制御工学専攻 PhD 課程修了．ミネソタ大学およびルンド大学でのポスドクを経て，2018 年 8 月九州大学大学院システム情報科学研究院准教授となり，現在に至る．自律移動ロボット群や機械系の振動制御などの研究に従事．博士（工学）．IEEE，計測自動制御学会，日本ロボット学会などの会員．

辻 健

2007 年 3 月 東京大学大学院理学系研究科で博士課程修了．2007 年京都大学大学院工学研究科助教，2012 年九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所准教授，2017 年九州大学大学院工学研究院教授，2022 年東京大学大学院工学系研究科教授となり，現在に至る．専門は探査工学，エネルギー資源，CCS，地震，火山，宇宙探査．