

(59) 構造物の維持管理における 空撮用 UAV の最適飛行計画

檀 寛成¹・稲津 直毅¹・尾崎 平²・窪田 諭²・安室 喜弘²

¹非会員 ²正会員 関西大学環境都市工学部都市システム工学科

(〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

E-mail: dan@kansai-u.ac.jp

近年、屋外構造物の点検・調査や災害現場の状況把握のために、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) による空撮が多用されている。UAVは、足場を選ばず様々な視点から迅速に撮影できるという利点があるが、その飛行経路計画は上空から真下を撮影するための簡易なものに過ぎず、立体形状の空撮では、操縦者の技量に頼らざるを得ない。本研究では、対象の立体形状に合わせて、効率的なUAV空撮用の3次元飛行経路を立案する手法を提案する。具体的には、写真測量や3次元化処理に必要とされるラップ(重複)率を確保し全体を網羅した撮影を実現するための最適な飛行経路を算出する方法を提案する。本稿では、高度一定の条件で、様々な向きに垂直な壁面をもつ対象について提案手法を適用し、有効性を示す。

Key Words : UAV, path planning, airborne imaging, image inspection, mathematical optimization

1. はじめに

我が国の社会資本ストックは高度経済成長期に集中的に整備されており、今後一斉に老朽化するであろうインフラの戦略的な維持管理・更新が求められている¹⁾。そして、厳しい財政状況や技術者の不足といった制約の下で社会インフラの老朽化に適切に対処していくために、国土交通省の新たな取り組みとして "i-Construction" が始まっている。そのなかで大きく注目されているのが Unmanned Aerial Vehicle (UAV) の導入である。

例えば、高所での近接目視を実施するためには専用の点検車を用いる必要があるが、このような作業は、現場で UAV を飛ばし、搭載したカメラから点検箇所の画像を撮影することで代替できる可能性がある。さらに、得られた画像を元に打音点検を必要とする箇所を絞り込むことも可能であろう。すなわち、UAV の導入が点検の効率化に繋がると期待されるとともに、点検技術者をより高度な判定が必要な箇所へ重点化できるようになるものと考えられる²⁾。その他にも、近年、土木分野での UAV の利用は大きく広がっている。

UAV で飛行しながら搭載カメラで対象物を記録するためには、事前に撮影計画を立て、撮り残しがないように撮影しなければならない。これについては、例えば、UAV からの写真測量を用いた出来形管理において必要

な写真間のラップ率(重複率)について検討が進められている³⁾。ラップ率を大きくするためには UAV を長時間飛ばせばよいが、UAV の連続飛行可能時間は長いものでも 30 分程であり、それほど長くはない。その上、バッテリー切れによる墜落を防ぐために時間には余裕をもって着陸させることから、実際の飛行時間はさらに短くなる。このように限られた時間内で対象構造物をすべて撮影するための飛行計画を考えることは容易ではない。

そこで本研究では、構造物の維持管理での利用を想定し、空撮で対象構造物をカバーするための最適な UAV 飛行計画の立案手法を提案する。提案手法は二つのフェーズからなる。一つ目のフェーズでは、対象構造物の各壁面を撮影するときの回数と角距離に下限を設けつつ、総撮影回数が最小となるような撮影ポイントを定める。二つ目のフェーズでは、一つ目のフェーズで求めた撮影ポイントを巡回するルートの最短化を行う。

UAV の最適飛行計画を立案する場合、対象構造物の形状や UAV が空撮を行うポイントなどは 3 次元空間内で考察する必要がある。本研究では、3 次元空間で最適な飛行計画を立案する前段階として、2 次元空間内での最適な飛行計画立案する手法を提案する。これは、様々な方向を向いて配置された高さ一定の垂直な壁に対して、網羅的な撮影を実現する飛行計画を立案することに相当する。

2. 先行研究

本研究に関連する先行研究として、Dan et al.⁴⁵⁾がある。これらの研究では、3次元レーザースキャナを用いて構造物を計測する際の計測回数を最小化する手法について提案している。ここではその概要について述べる。

3次元レーザースキャナで構造物の全体を計測するには、複数箇所からの計測が必要である。一方で、スキャナの設置や計測には一定の時間的・人的コストが必要のため、計測回数は少ない方が望ましい。そこでDan et al.⁴⁵⁾は、遮蔽関係を考慮しつつ、構造物の全ての壁面を計測するために必要な最小計測回数、ならびにどこから計測すればよいかを算出する手法を提案した。

このうちDan et al.⁴⁾では、対象構造物を含む領域の平面図を元に、計測回数の最小化、ならびに最適な計測箇所を算出する問題を最適化問題として定式化し、最適化問題を求解するためのソフトウェア（ソルバ）を用いて求解することで、最適な計測計画を立案する手法を提案した。

3. 提案手法

本節では、空撮で対象構造物をカバーするための最適なUAVの飛行計画の立案手法を提案する。本研究では、計測対象の構造物を含む対象領域の平面図が与えられているものと仮定し、これを元にUAVの飛行計画を立案するものとする。

(1) 最適な撮影ポイントの算出

本項では最適な撮影ポイントを算出するための最適化問題を定式化する。ここでの定式化はDan et al.⁴⁾を元に行っている。

まず、計測候補点と計測候補方向の設定について説明する。本研究では、計測対象の構造物の周辺に、UAVが対象物を計測する際の候補点を設定する。例えば図-1のような対象構造物がある場合、図-2のように、その周辺に計測候補点を設定する。さらに、それぞれの計測候補点において全周方向を分割し（図-3）、それぞれを計測候補方向とする。ここで、計測候補点と計測候補方向の全ての組合せを要素とする集合を I とする。

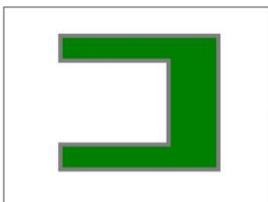


図-1 対象構造物の例

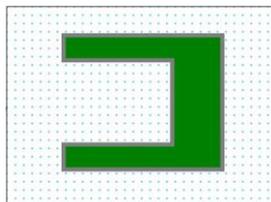


図-2 計測候補点の配置

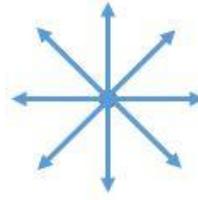


図-3 全周方向の分割

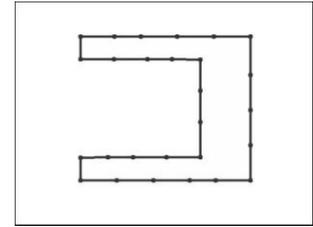


図-4 壁面の分割例

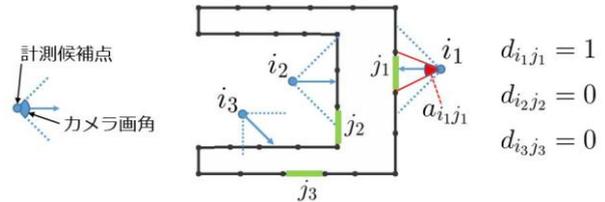


図-5 パラメータ d_{ij} , a_{ij} の意味

次に、計測対象の壁面について考察する。本研究では、平面図から壁面を抽出し、それを線分で近似する。さらにそれを適当なルールに基づいて分割する（図-4）。このようにして得られた壁面の集合を J とする。

ここで、計測候補点・方向 $i \in I$ と壁面 $j \in J$ の関係を表現するパラメータとして、次の2つを設ける（図-5）。

$$d_{ij} := \begin{cases} 1, & \text{壁面 } j \text{ は計測候補点・方向 } i \text{ で計測可能} \\ 0, & \text{壁面 } j \text{ は計測候補点・方向 } i \text{ で計測不可能} \end{cases}$$

$$a_{ij} := \text{計測候補点・方向 } i \text{ で壁面 } j \text{ を見たときの角距離}$$

d_{ij} は、計測候補点・方向 i で壁面 j が計測可能かどうかを表したパラメータである。具体的には壁面や周辺環境の遮蔽関係、ならびにUAVに搭載するカメラの画角に壁面が収まっているかどうかを表現している。また a_{ij} は、計測候補点・方向 i で壁面 j を見たときの角距離、すなわち i に対応する点から壁面 j を見込む角度とする。 a_{ij} の大小は、 i から j を撮影した際に得られるデータ量の大小を表している。 d_{ij}, a_{ij} とも、平面図が与えられれば単純な幾何計算で計算することが可能である。

上で定義した記号を用いると、本研究で提案する最適化問題は次のように書くことができる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \sum_{i \in I} x_i \\ & \text{subject to} && \sum_{i \in I} d_{ij} x_i \geq r \quad (\forall j \in J), \\ & && \sum_{i \in I} a_{ij} x_i \geq b \quad (\forall j \in J), \\ & && x_i \in \{0, 1\} \quad (\forall i \in I). \end{aligned}$$

ここで、変数 x_i は値が1ならば計測候補点・方向 i を

採用することを表し、0ならば採用しないことを表す。

この最適化問題の目的関数は、計測回数を最小化するように設定されている。また一つ目の制約条件は、各壁面 j が少なくとも r 回は計測されることを課している。 r を1とすると全体がカバーされることとなり、2以上にすると、画像間の重複の度合いが大きくなる。さらに、二つ目の制約条件に現れるパラメータ b は、壁面 j を計測する際の角距離の下限を定めるものである。1章で述べたように、UAV を用いた空撮の際にはラップ率を確保することが重要だとされているが、本研究ではこの制約を設けることでラップ率を確保することを狙う。

本研究では、最適化ソルバを用いてこの問題を解くことで、最適な計測点・計測方向を算出する。

(2) 撮影ポイントを巡回する最短経路の算出

ここでは、前項で得られた最適な計測点を巡回する最短経路を算出する。これが UAV の最適飛行計画となる。

実はこの問題は、よく知られた最適化問題である、「巡回セールスマン問題」(Traveling Salesman Problem, TSP) に他ならない。TSP とは、セールスマンが与えられた複数の都市を巡回し、元の都市に戻るような経路のうち最短のものを求める問題で、古くからよく研究されている問題である。すなわち、TSP に対する既存解法を利用することができるが、本研究固有の事情を考慮する必要があるため、それを以下に述べる。

TSP では、事前に巡回する都市間の最短移動距離を算出しておく必要がある。これは、本問題では、前項で得られた計測点間の最短移動経路を算出することに他ならない。移動経路は建物などの障害物と衝突しないようにする必要があるが、それを考えるためには、可視性グラフ上での移動を考える必要がある⁶⁾。可視性グラフとは、領域内の障害物が多角形で表現されているときに、そこに現れる全ての頂点、ならびにスタート・ゴール地点を線で結ぶことで得られるグラフである(図-6)。ただし、その線分が障害物と重なる場合は、その線分は可視性グラフの枝として採用しない。このグラフを作成し、ダイクストラ法などを用いて計測点間の最短移動経路を求めれば、それが TSP における巡回箇所間の移動距離となる。

ただし、可視性グラフの作成において、単純に構造物の端点をグラフの頂点として採用すると、それは UAV が構造物をかすめるように飛行することになってしまう。

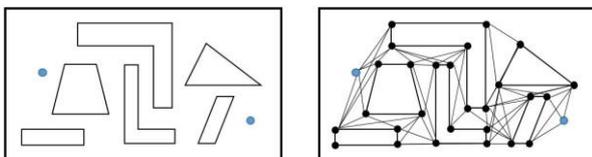


図-6 可視性グラフの作成

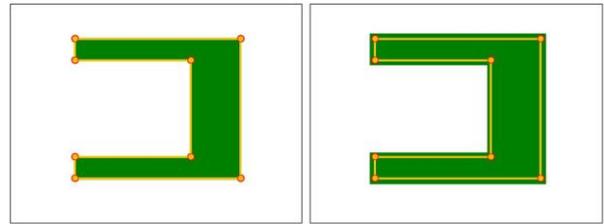


図-7 構造物の擬似的な拡大

それを回避するためには、図-7のように構造物を擬似的に拡大した上でその端点を採用すればよい。

このようにして前項で算出された計測点間の最短距離を算出し、その値を用いてTSPを解けば、それはUAVがすべての計測点を通り元場所に戻るような経路のうち最短のものを求めたことになる。

4. 数値実験

本節では、数値実験の結果を紹介する。ここでは、第一柴の下橋梁(千葉県市原市、国登録有形文化財)の橋脚を題材に取り数値実験を行った。なお、実験に用いた計算環境は表-1の通りである。

図-8は対象橋梁の平面図⁷⁾と、そこから抽出した橋脚部分の画像である。この領域内に計測候補点をグリッド状に配置した。また、全周方向については45度刻みで8方向に分割し、これを計測候補方向とした。

表-1 計算環境

OS	Microsoft Windows 10 Pro
CPU	Intel Core i7-3770
メモリ	8GB
最適化ソルバ	GLPK 4.47

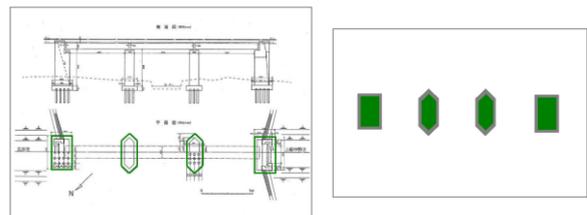


図-8 第一柴の下橋梁

表-2 計算の条件設定

	条件1	条件2	条件3	条件4
r	2	3	4	5
b	10	20	25	30

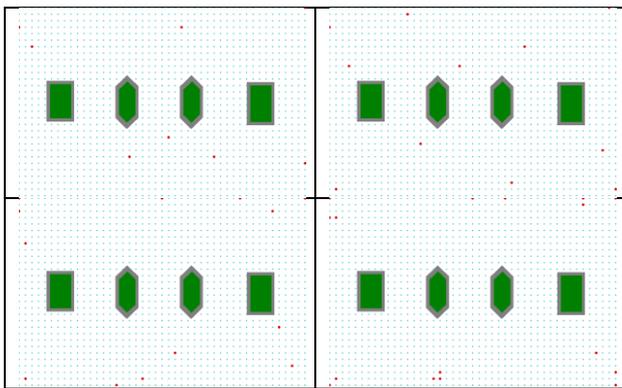


図-9 計算結果 (上段: 条件 1, 2, 下段: 条件 3, 4)

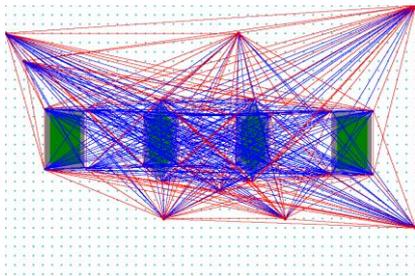


図-10 可視性グラフ (赤い線分)

図-9 は、表-2 のように条件設定を変更しながら行った数値実験の結果である。最小計測回数は、条件 1, 2, 3, 4 に対してそれぞれ 8, 11, 13, 16 回であった。

次に、条件 1, 2, 3, 4 に対して得られた最適計測点を巡回する最短経路を求めた。まず 図-10 のように可視性グラフを作成した (条件 1 の計算結果に対する可視性グラフ。他の条件設定についても同様に作成)。青い線分は構造物と衝突しているため取り除き、赤い線分で構成されるグラフを可視性グラフとしている。さらに、各最適計測点間の最短距離をダイクストラ法により求めた。そしてその値を用いて TSP を解き、それぞれの条件設定に対して 図-11 のような最短巡回路を得ることができた。

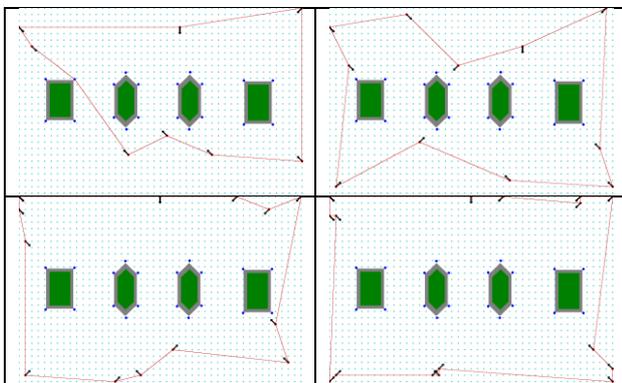


図-11 最短巡回回路 (上段: 条件 1, 2, 下段: 条件 3, 4)

5. おわりに

本研究では、UAV を用いた構造物の空撮に際し、対象となる壁面の撮影回数や撮影時の角距離の和に関する制約を満たしつつ、対象物全体を最小回数でカバーできるような撮影ポイントを見つける最適化問題を提案した。さらに、得られた撮影ポイントを巡回する最短経路を見つける手法についても提案した。これにより、屋外構造物の点検・調査に UAV を用いる際の飛行計画を立案できるようになった。

本研究では、UAV が高度一定の条件で飛行することを仮定していた。今後はこの仮定を緩和し、高度が変わる場合の飛行計画が立案できるよう、提案手法を改善する必要がある。

謝辞：本研究は、一般財団法人 日本建設情報総合センター (助成番号 第 2017-06 号) と JSPS 科研費 JP16H05000 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 国土交通省：インフラメンテナンス情報、http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html (入手 2018.6.14)。
- 2) 国土交通省：新技術の活用と維持管理・更新の担い手の育成、<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h25/hakusho/h26/html/n1233000.html> (入手 2018.6.14)。
- 3) 国土交通省：空中写真測量 (無人航空機) を用いた出来形管理要領、<http://www.mlit.go.jp/common/001230311.pdf> (入手 2018.6.14)。
- 4) Dan H., Yasumuro Y., Ishigaki T. and Nishigata T.: Shape Measurement Planning of Outdoor Constructions with Mathematical Programming and Its Applications, *Proceedings of the 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR2010)*, 319-328, 2010.
- 5) Dan H., Yasumuro Y., Ishigaki T. and Nishigata T.: Measurement Planning of Three-dimensional Shape by Mathematical Programming, *Proceedings of the 11th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality 2011 (CONVR2011)*, 205-216, 2011.
- 6) Latombe J.-C.: *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- 7) 市原市：国登録有形文化財 小湊鉄道駅舎群等 (橋梁) <https://www.city.ichihara.chiba.jp/bunka/bunkabunkazaitop/bunkazai/kominato3.html> (入手 2018.6.14)。