

〈一般研究課題〉 継続的な生活環境維持をめざした  
社会インフラ設備外観の自動点検システム  
助成研究者 名古屋大学 舟洞 佑記



## 継続的な生活環境維持をめざした 社会インフラ設備外観の自動点検システム

舟洞 佑記  
(名古屋大学)

## Automatic Visual Inspection System for Long-time Utilization of Infrastructure Facilities

Yuki FUNABORA  
(Nagoya University)

### Abstract :

This paper presents a measuring position determination method of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for automatic visual inspection. Distinguishing measurable geometry of a target facility by an UAV and ensuring reliability in data gathering to detect anomaly are both important functions for inspections. The proposed method is based on the premise that the 3D geometrical data of a target facility and feature of an UAV and a sensor are given. The measuring positions to gather the visual data ensuring reliability are calculated considering positioning error of an UAV systematically. By setting the measuring positions as waypoints, flight paths appropriating for visual inspection can be obtained by using conventional path-planning method. The proposed method is examined through computer simulations on the assumption that an UAV measure image data of several bridges in an actual environmental.

### 1. はじめに

限られた財源の中で、我々の生活環境を維持するためには、社会インフラ設備の継続利用が望ましい。一方、笹子トンネル崩落事故以降、老朽化が進むインフラ設備の危険性が浮き彫りになり、インフラ設備の点検頻度向上が急務となった[1]。点検により早期に異常が発見できれば、事故防止につながるだけでなく、軽微な補修で設備を維持することができる。多くの設備において専門作業

員による点検が実施されている。しかし、特に社会インフラ設備では、設備の規模から点検作業が大掛かりになる点と、熟練した点検作業員が不足している点から、十分な頻度での点検が実施できていない。交通インフラ設備の一つである橋梁点検を例に説明する。日本には、5年に1度の頻度での点検が推奨される橋梁が約70万橋存在する[1]。橋梁点検作業は、多くの場合、交通規制や足場の設置が必要となり、点検作業に時間を要する。限られた専門作業員のみでは、5年に1度の点検の実施は困難であり、封鎖された橋梁も存在する。その他のインフラ設備も同様の状況であり、高頻度な点検を実現する自動点検システムが望まれる。

点検関連作業の自動化を目的とした研究がある[2]~[7]。点検作業の自動化関連研究は、2つに大別できる。ロボット等による点検対象設備の異常検出用データ収集[2]~[4]と、データ解析による異常検出[5]~[7]である。規模の大きな社会インフラ設備の点検は、膨大な異常検出用データを収集・解析する必要がある。一旦データが集まれば、処理能力の高いワークステーションで並列演算することで、膨大なデータでも自動的に異常が検出できる。すなわち、インフラ設備の自動点検システムの実現には、大規模な設備の異常検出用データを自動的に収集するシステムの構築が重要な課題となる。インフラ設備の点検作業は、点検対象や検出すべき異常に応じて様々存在する。本研究では、橋梁・トンネル・ダム等で広く実施されている外観点検の自動化に着目する。特に設備外観の画像データからのひびや腐食検出、サーモグラフィからの内部クラック検出等の画像情報に基づく異常検出を想定する。

橋梁やダム等の設備外観のデータを収集するロボットとして、無人飛行体(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)が注目されている[8]~[12]。高い機動性を持つUAVは、大規模設備の周辺を広域に飛行してデータを収集することができる。また、比較的容易に導入することができるため、既存設備のデータ収集にも適している。一方、対象設備の幾何的構造(凹形状等)やUAVの物理的制約(大きさや飛行原理等)によって、導入したUAVでは対象設備外観の全領域のデータは収集できない場合がある。導入したUAVでは計測不可能な外観領域を明確にする点と、異常検出に必要な精度・分解能が保証されたデータを確実に収集する点が重要である。設備外観のデータ収集を目的とした既存研究[8][9]では、専門作業員がUAVを遠隔操作してデータを収集するアプローチをとっており、作業員の経験や熟練度に依存する。UAVの経路計画法は多数研究されている[10][11]が、多くが点間の移動経路に着目しており、設備外観のデータ収集に適さない。橋梁外観のデータ収集を目的とした経路計画法も提案された[12]が、上記2点の機能はなく、収集した点検対象外観のデータが異常検出に必要な精度・分解能を満たす保証はない。

大規模設備外観の自動点検システムの構築を目指し、導入したUAVにおいて計測可能な対象設備外観の領域を明確にしつつ、異常検出に必要な精度・分解能を保証したデータを収集するための経路計画法を確立する。経路計画問題を、外観領域のデータをセンサで計測する位置を決める計測位置決定問題と、計測位置を経由点と見なした巡回経路生成問題に分けて考える。前者において、前述の2点の機能を満たす計測位置決定法が確立できれば、後者は単純な巡回セールスマン問題と捉えることができる。適切な評価関数を文献[12]等に基づき設計すれば、一般的な最適化の枠組みで巡回経路が生成できる。そこで、先の2点の機能を組込んだ計測位置決定問題に取り組む。対象設備外観の3Dモデルが用意できる点、導入するUAVと計測用センサの特性が把握できる点を前提条件に、システマティックに計測位置を決定する手法を提案する。

## 2. 問題設定

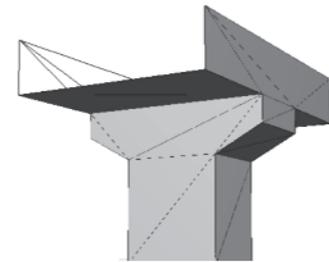
社会インフラ設備は、橋梁やトンネル等の交通インフラ設備、ダムや送電用鉄柱等の電力インフラ設備等、多岐にわたる。導入するUAVやデータ計測用のセンサ也多岐にわたり、点検対象や検出すべき異常に応じて適切に選択する必要がある。多岐にわたる対象や機器に対し、可能な限り一般化して問題を解くための制約条件を定める。点検対象の設備外観が把握できる点(点検対象に対する制約)、全計測位置で計測条件を同一にする点(計測条件に対する制約)、UAVは任意位置で任意方向のデータを計測できる点(UAVに対する制約)の3点を制約条件とする。以下、詳細を説明する。

### 2.1 点検対象に対する制約

点検対象の設備外観の幾何的形狀が把握できるという制約を設ける。CADの普及により、ここ10年で建造された多くの設備には3Dモデルが存在する。また、Kinect等の安価で汎用的な距離画像センサも普及し、専門知識がなくても、比較的容易に構造物の3Dモデルが得られるようになった。これらを背景に、点検対象の設備外観は3Dモデルで記述されていると仮定する。3DモデルのファイルフォーマットはOBJ、3DS、STL、DFX等々存在する。計測位置算出に適した形式として、STLファイルフォーマット(英名: Stereolithography, StL)[13]を採用する。STL形式では、三次元形状を小さな三角形ポリゴン(以下、ポリゴン)の集合体として表現する。一つのポリゴンは、頂点座標と法線ベクトルから成る。ポリゴンごとに、幾何的関係から計測位置が求まる。加えて、一般的な衝突判定法も容易に適用でき、計測可能なポリゴン領域の判定にも有用である。最も単純な形式であるため、多くのファイルフォーマットはSTL形式に変換できる。図1は、STL形式のモデル例である。



(a) 想定した点検対象



(b) STL形式の橋梁モデル

図1 対象の橋梁と3Dモデル

### 2.2 計測条件に対する制約

異常を正しく検出するために、異常検出用データを全て同一条件下で計測するという制約を設ける。計測用センサとしてカメラを用いる場合、全計測位置において、対象表面とカメラの相対位置・姿勢を一定に保つことに相当する(図2)。例えば、0.2mmのひびをカメラで検出する場合、全異常検出用画像データの全ピクセルで、0.9mmの空間分解能を確保する必要がある。図2のように、一定距離 $D$ 離れた位置からカメラ光軸を計測平面の法線ベクトルと対向させて撮影すると、画像中の全ピクセルが同一の空間分解能を持つ。レンズ歪の影響を抑えるため、カメラの光軸中心から半径 $r_s$ 内の領域(計測範囲)を抽出し、異常検出用データとする。 $D$ と $r_s$ は、カメラの仕様と異常検出用データに求められる精度・分解能によって決まる。

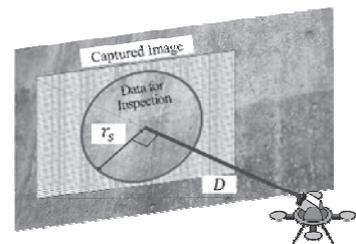


図2 計測条件の制約

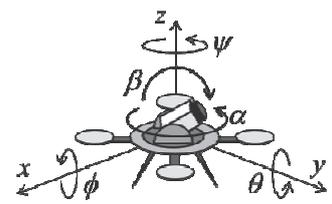


図3 UAVとカメラの制御変数

### 2.3 UAVに対する制約

UAVは任意位置で任意方向のデータが計測できるという制約を設ける。UAVへのセンサの設置

条件によっては、ある位置において所望の方向のデータが計測できない場合がある。例えば、固定式4ロータを持つUAVにおいて、UAVの真上方向に固定されたカメラでは、横方向の画像は原理的に計測できない。ここでは、複数台のカメラをジンバルを介してUAVに設置すると仮定する。この仮定により一般的なUAVでも任意方向のデータが計測できる。この場合、2.2節の「対象表面とカメラの相対位置・姿勢を一定に保つ」制約は、「対象表面とカメラの相対位置を一定に保つ」制約に緩和される。図3のように、撮影方向はジンバルの角度( $\alpha$ ,  $\beta$ )で調整する。UAVにおいては、一般的な6自由度(位置( $x$ ,  $y$ ,  $z$ )と姿勢( $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ))のうち、位置の3自由度のみを精度よく制御すればよい。

以上の制約条件により、本研究で検討すべき問題は、計測できないポリゴンを明確にしつつ、計測可能な全ポリゴン領域を計測範囲に収める計測位置群を求める問題となる。

### 3. 3Dモデルを利用した計測位置決定法

ポリゴンの幾何情報(頂点座標と法線ベクトル)、センサの仕様、UAVの仕様から計測位置を求める。対象設備外観のSTLファイルからあるポリゴンを選択し、計測範囲に収まるまでポリゴンを分割する。分割した各ポリゴンの幾何情報から、計測位置候補点を求め、計測可否を判定する。計測不可と判定したポリゴンは、再度分割・計測可否判定を行い、計測可能領域の拡大を図る。ファイル内の全ポリゴンに対して分割処理を行い、計測可能なポリゴン領域と対応する計測位置を求める。加えて、実環境で少なからず生じるUAVの定位誤差を予め組込んだ計測位置決定法に拡張し、実環境での有用性を高める。

#### 3.1 計測可否判定と計測条件を満たす計測位置決定法

一つのポリゴンにおける計測位置決定フローを図4に示す。法線ベクトル $n$ を持つあるポリゴン Aで、3頂点を内包する最小円を求める。この円の半径を $r_p$ 、中心座標を $p_p$ とする。 $r_p \leq r_s$ の時、式(1)で求める位置 $p_s$ から、 $-n$ 方向にカメラを向けて計測することで、Aが計測範囲に収まったデータを得る。

$$p_s = p_p + D \cdot n \quad (1)$$

一方、 $r_p > r_s$ の時、 $p_s$ から計測するとAの一部が計測範囲外になる。対象設備外観のSTLファイルは、形状を表現するのに適したポリゴンの集合体で記述(図1参照)されており、一般的に $r_p \leq r_s$ を満たさない。3Dモデルに含まれる全ポリゴンを、2.2節で述べた計測範囲(半径 $r_s$ の円領域)に収めるように分割することで、データ計測に適したポリゴンの集合にする。 $r_p > r_s$ となる場合、長辺の midpoint と対頂角を結ぶ線分でAを分割してポリゴンの領域を小さくし、計測範囲に収める。

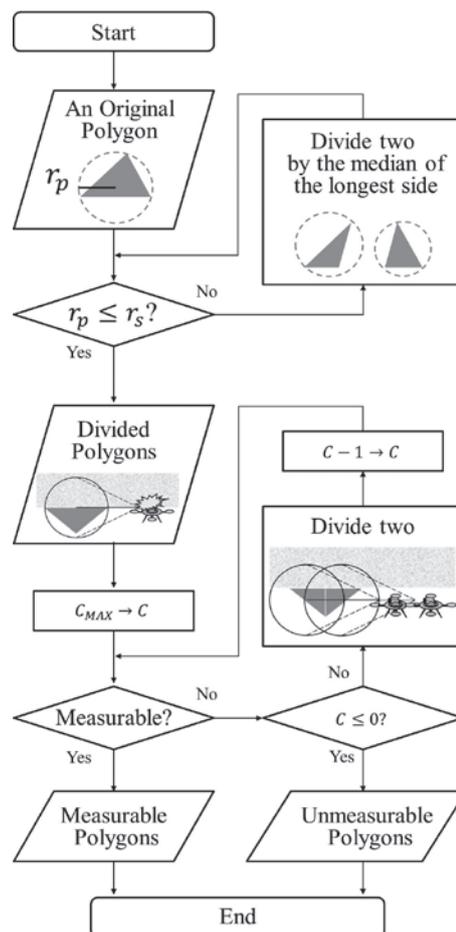


図4 あるポリゴンにおける分割処理の概要

点検対象等との衝突によりUAVが $p_s$ に到達できず計測できない場合や他ポリゴンの遮蔽により計測できない場合がある。UAVの占有領域を設定し、一般的な立体同士の衝突検出法[14]によりUAVの衝突を、線分 $L = \{p_p + tD \cdot n \mid t \in (0, 1)\}$ と他ポリゴンとの衝突検出により遮蔽を判定する。衝突や遮蔽により計測不可と判定された場合、可能な限り多くの領域のデータを計測するために、再度ポリゴンを分割する。一方、2.2節の条件下では原理的に計測できないポリゴン(距離 $D$ を確保できないほど狭い空間のポリゴン等)においては、分割処理を繰り返しても計測できない。そこで、分割処理回数の上限 $C_{MAX}$ を設定し、 $C_{MAX}$ 回分割処理を繰り返しても計測不可と判定されたポリゴン領域を計測不可能領域とする。そのようなポリゴンに対応した $p_s$ は計測位置には含めない。

このように $r_s$ に基づく分割処理と、計測可否に基づく分割処理により、一つのポリゴンAが複数のポリゴンに分けられ、対応した複数の計測位置が算出される。3Dモデル内の全ポリゴンに対して同様の処理を行うことで、設備外観の計測可否領域を明確しつつ、ポリゴンのデータを確実に計測するための計測位置群を得る。

### 3.2 UAVの定位性能を考慮した計測位置決定法への拡張

3.1節で求めた計測位置 $p_s$ は、UAVが誤差なく $p_s$ に到達できることを前提に、計測データの精度・分解能を保証する。実環境においては、風等の外乱やGPS等の位置推定系の誤差の影響により、定位誤差が発生する。特に、位置推定系に誤差が発生した場合、UAVの位置・姿勢制御系では誤差を補償できない。2016年現在、あらゆる環境下で誤差なく位置推定可能なシステムは存在しない。実環境でも計測データの精度・分解能を保証するために、3.1節の手法を定位誤差の発生を想定した計測位置決定法へ拡張する。

ある定位誤差 $e$ が生じた場合、定位誤差を含んだ位置 $p_s' = p_s + e$ で計測したデータを得る。ここで、 $e$ を $n$ 方向成分 $e_v$ と $n$ に垂直な方向成分 $e_h$ に分けてを考える。 $e_v > 0$ の場合、 $|p_p - p_s'| > |p_p - p_s| = D$ となり、画素辺りの実サイズが大きくなる。計測する画像の精度・分解能が低下することに相当するため、可能な限り避けるべきである。 $e_v < 0$ の場合、取得する画像の精度・分解能は増加するが、計測範囲の半径 $r_c$ が、 $e_v/D$ だけ小さくなる。 $e_h$ は、ポリゴンを内包する円の中心座標 $p_p$ をポリゴン平面上に $|e_h|$ ずらすことに相当する。一般的には、 $r_c < D$ であるから、 $|e_v|$ と $|e_h|$ が同程度の場合、 $|e_h|$ の影響が大きい。

以上を踏まえ、本研究においては、定位誤差を考慮した計測位置 $p_c$ と計測範囲 $r_c$ を次式で定める。

$$p_c = p_p + (D - e_v) \cdot n \quad (2)$$

$$r_c = r_s - |e_h| \quad (3)$$

$r_s$ の代わりに $r_c$ を、 $p_s$ の代わりに $p_c$ を用いるだけで、3.1節と同様の手順で、計測可能性を明確にしつつ、計測位置群 $p_c$ がシステムティックに求まる。なお、先に設定した $e$ は許容したい誤差ベクトルとして考えることができるため、予備実験により定位誤差を見積り、 $e_v$ と $e_h$ を決める。

## 4. 予備実験

UAVの定位性能を簡単な予備実験により求めた。Parrot社のBebop Drone(UAV)にGoPro社のHero4(計測用カメラ)を搭載し、名古屋大学内にある保全技術研修用橋梁モデルであるニュー・ブリッジ(N<sup>2</sup>U-BRIDGE、図5)の外観を点検することを想定した。ニュー・ブリッジは日本全国からさまざまな劣化・損傷が生じて撤去された橋梁の部材を集めた施設である。コンクリート橋・銅橋及

び付属物のひび割れ、豆板、砂すじ、アルカリシリカ反応、塩害等による劣化状態を観察することができる。

予備実験の様子を図6に示す。制御用PCから一定位置でのホバリング指令を与え、レーザ距離計の3次元座標情報取得機能により、ホバリング中の座標データを複数回取得した。1試行で30秒ホバリングさせ、4～8回の3次元座標を計測した。1試行ごとに、飛行中の初期位置から各位置の相対座標を求め、ユークリッド距離を算出、定位誤差量とした。安全のためUAVに紐を取付け、想定外の挙動をした場合には直ちに停止した。

9試行で得た定位誤差量のヒストグラムを図7に示す。0.8m付近にピークを持った分布となり、平均誤差量は約1.2mとなった。現段階ではサンプル数が41と非常に少ないため、正規分布モデル等の誤差モデルの適用は難しい。平均誤差量 $\mu=1.2$ を定位誤差の基準値とした。

Bebop Droneは4つの固定されたロータを持つUAVである。ロータ回転軸と垂直方向の外乱に対しては、機体を傾けて補償する必要があるため、定位誤差量が大きくなる。一方、ロータ回転軸方向の外乱に対しては、ロータの回転量を制御するだけで、機体の姿勢を変更することなく、位置の補償ができる。実際に、ロータ軸と

垂直方向の定位誤差の標準偏差が0.6mであったのに対し、ロータ回転軸方向では0.1mに留まった。

## 5. シミュレーション

予備実験により得られた知見に基づき、実環境を想定したシミュレーションを行った。0.2mmのひび検出を目的とした橋梁の外観点検を想定し、T型橋脚を持つ桁橋外観とアーチ橋外観のデータをUAVにカメラを搭載して計測する。まずは定位誤差のない理想的な条件下において、2種類の機体で計測する際の計測位置の違い、及び、既存の経路計画法の違いによる生成経路の様子を確認した。次に、予備実験の知見に基づきシミュレーションを行い、定位誤差が生じた場合の計測漏れと拡張した提案法の有効性を検証した。



図5 名古屋大学構内にあるニュー・ブリッジ

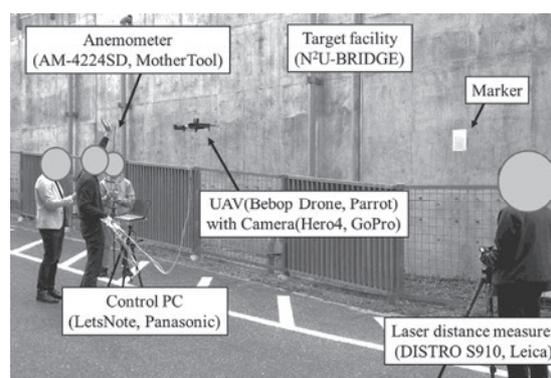


図6 UAVの定位性能を計測する予備実験の様子

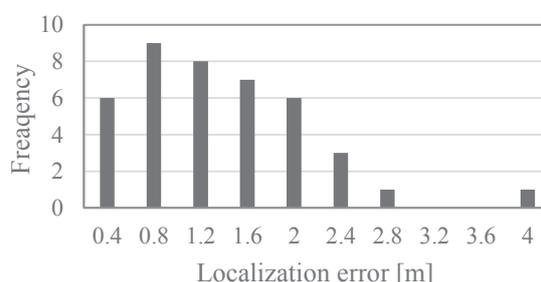


図7 ホバリング時の定位誤差量のヒストグラム

表1 UAVの仕様から求めた計測条件

	Bebop Drone with Hero4	Scout with NEX-7
Radius of occupied sphere of UAV	0.200 [m]	0.400 [m]
$r_s$	1.40 [m]	1.90 [m]
$D$	2.50 [m]	5.00 [m]

### 5.1 シミュレーション条件

計測用カメラを搭載したUAVとして、前述のHero4を搭載したBebop Droneと、SONY社のNEX-7を搭載したAeryon社のScoutの2機を想定した。衝突判定に用いるUAVの占有領域は、両機とも球で近似した。UAVとカメラの仕様から求めた計測条件を表1に示す。なお、計算の簡単化のため、カメラは占有領域を持たず、UAVの中心座標 $(x, y, z)$ に一致して設置できるとした。実環境においては、カメラの回転中心が $p_c$ または $p_e$ となるようにUAVの座標 $(x, y, z)$ 制御することになる。点検対象は、図8のような3DモデルとなるT型橋脚を持つ桁橋(図8(a))とアーチ橋(図8(b))を想定した。

### 5.2 理想的な条件下での計測位置決定結果

NEX-7を搭載したScoutを用いた場合の桁橋とアーチ橋の計測位置決定結果を図9(a)(b)に示す。橋梁表面の分割されたポリゴンを、対応する点の計測位置から計測する。解像度が高く広範囲に撮影可能なNEX-7を搭載した場合、比較的少ない計測位置が算出され、一回当たりで計測するポリゴンの面積が広がった。特に平面が続く領域では元のポリゴンが比較的大きく記述されていたため、分割後のポリゴンも大きくなった。一方、図9(b)のアーチ下部は、曲面を表現するために元のポリゴンが比較的細かく記述されていた。そのため、計測位置も細かく決められたと考えられる。Hero4を搭載したBebop Droneにおいて決定した計測位置を図10(a)(b)に示す。Hero4は計測範囲がNEX-7に比べて狭いため、多くの計測位置から細かくデータを計測する結果となった。ここで、図10(a)(b)ともに矢印の先のポリゴンは計測不可領域と判定された。Hero4の計測範囲では、矢印のポリゴンを撮影する場合、図10(a)では床板と、図10(b)では地面と衝突し、計測できない。計測可否判定をしつつ計測位置が決定できた。

### 5.3 理想的な条件下での点検経路生成結果

実際にUAVで計測する場合、計測位置を巡回する経路を計画する必要がある。風等の外乱にロバストな経路計画法[12]を実装することが望ましいが、ここでは、単純な局所探索に基づく経路生成法を実装し、生成される点検経路を確認した。

$p_i$ が評価対象となる計測位置、 $p_0$ が現在の計測位置とし、コスト関数 $f$ を式(4)で定義した。

$$f(p_i) = \sqrt{w(p_i - p_0)^T (p_i - p_0)} \quad (4)$$

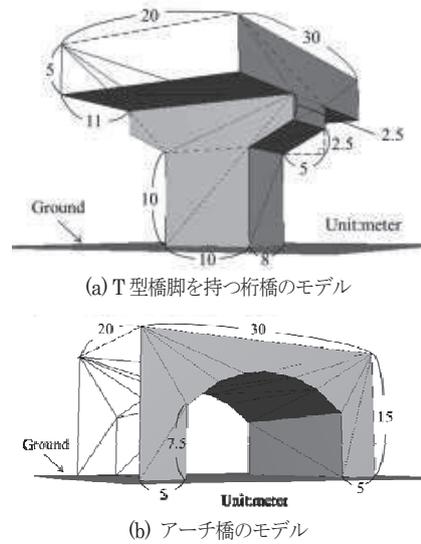


図8 想定した点検対象の3Dモデル

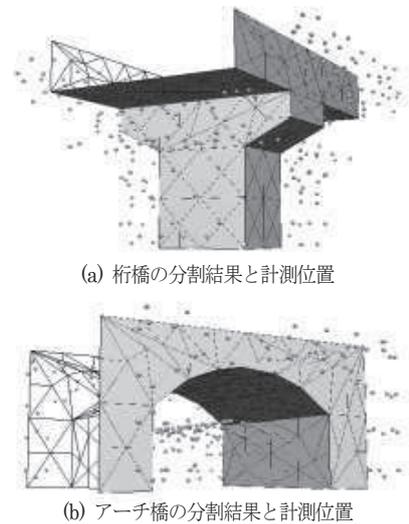


図9 NEX-7を搭載したScoutの計測位置

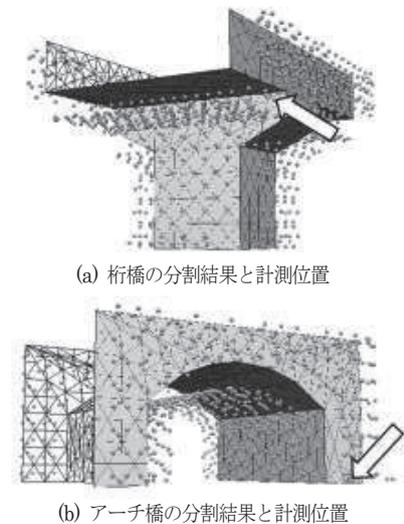


図10 Hero4を搭載したBebop Droneの計測位置(計測不可領域を含む)

ここで $w$ は各軸方向の重みベクトルである。未計測の計測位置集合を $P$ とすると、式(5)で次の計測位置 $p_k$ が決まる。

$$\min_{(p \in P)} \{f(p_i)\} = f(p_k) \quad (5)$$

一般的なロータが固定された機構のUAVの場合、上昇に最もエネルギーを使う。エネルギーロスの観点から、上下移動が少ない経路が望ましい。ここでは、2つの重みベクトル $w_1 = (1, 1, 1)$ と $w_2 = (1, 1, 100)$ を用意し、生成される経路を比較する。

図9の条件下での経路生成結果を図11に示す。図11(a)(b)が桁橋、図11(c)(d)がアーチ橋に対する結果を示す。重み $w$ の設定より、上下方向の移動が制限された。図10の計測位置に対して行った場合も同様の結果が得られた。このようにエネルギー消費や外乱へのロバスト性、移動の連続性などを巡回経路生成問題のコスト関数に落とし込むことで、使用するUAVの特性や点検の目的に応じた巡回経路が生成できる。点検対象外観のデータ計測に適した計測位置群を決定したからこそ、既存法を外観点検に利用できるようになった。

#### 5.4 定位誤差を考慮した計測位置決定結果

予備実験結果から、UAVの定位誤差をモデル化する。正規分布モデルに従って定位誤差が発生すると仮定し、定位誤差発生時のポリゴンの計測漏れを確認する。また、3.2節の定位誤差を考慮した場合の計測位置と計測漏れを確認し、拡張した計測位置決定法の有効性を示す。

4章の予備実験結果で求めた定位誤差の標準偏差は、ロータ回転軸方向が0.1、ロータ回転軸と垂直方向が0.6であった。正規分布モデルで定位誤差が発生すると仮定し、各々の方向において先の標準偏差に基づき定位誤差を発生させた。なお、計測位置ごとに独立に定位誤差を発生させた。4章ではBebop Droneで予備実験を行ったが、Scoutでも同様の定位誤差が発生すると仮定し、Scoutの計測条件でシミュレーションを行った。ここで、NEX-7のように焦点距離が変更できるカメラの場合、焦点距離の調整により $e_r$ は吸収できる。本シミュレーションにおいては、式(3)のみを考慮して計測位置を求めた。

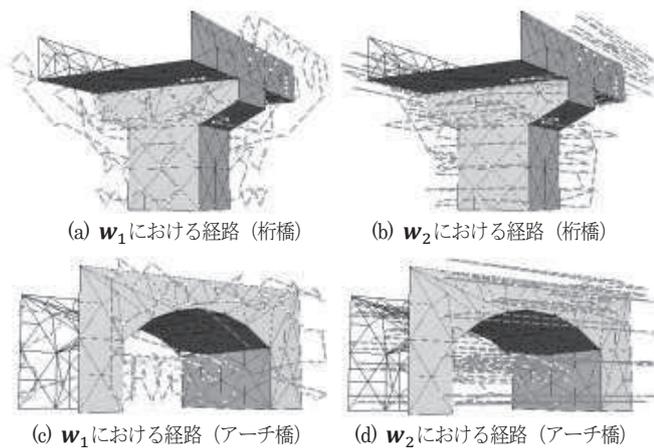


図11 NEX-7を搭載したScoutにおける経路生成結果

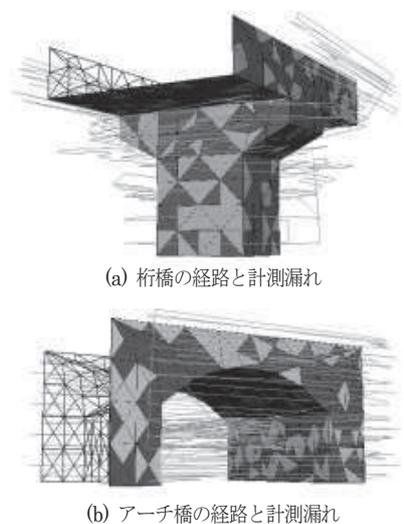


図12 定位誤差が発生した場合の経路と計測漏れ(Scout)

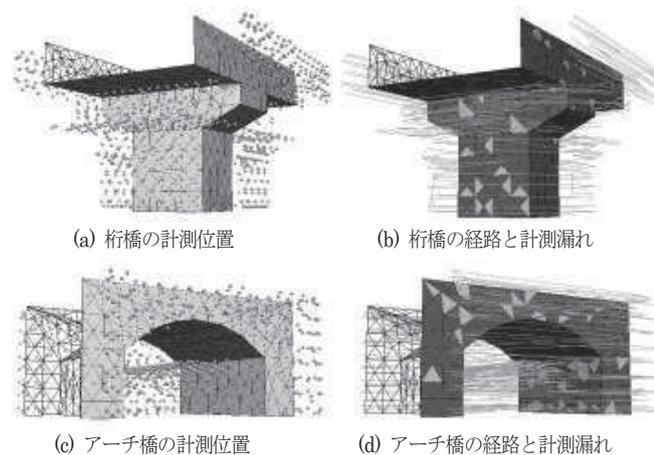


図13 定位誤差を想定した計測位置と経路と計測漏れ ( $|e_r| = 0.4$ )

理想的な条件下で算出した計測位置(図9)において定位誤差が発生した場合、UAVは図12のような経路を辿った。図中の色の薄いポリゴンは、計測が失敗したポリゴンを示す。ここで、計測の失敗は「定位誤差を含む計測位置では計測範囲内に完全にポリゴンが収まらない場合」と定義した。図12(a)で48.7%、図12(b)で38.5%ものポリゴンで計測に失敗しており、定位誤差の影響により所望の異常検出用データが計測できなかった。

$e_n$ は $n$ に垂直な方向の定位誤差であり、ポリゴンの向きに応じて方向が変化する。そこで、予備実験で求めた定位誤差量の基準値 $\mu = 1.2$ を参考に、 $|e_n| = \{\mu/3, 2\mu/3, \mu\}$ を決定した。 $|e_n|$ を設定した時の結果を図13~15に示す。 $|e_n|$ の増加に伴って計測位置の点数も増加した。空間的に密に計測位置を配置することで、計測漏れが少なくなっていく。経路巡回時の定位誤差は確率的に与えたため、各条件で10試行し、計測失敗ポリゴン数の割合の平均と標準偏差を求めた結果を表2に示す。 $|e_n|$ を大きくすることで計測失敗ポリゴン数の割合が減少し、 $|e_n| = \mu$ では、ほぼ全てのポリゴンが計測できた。ここで、十分に大きな $|e_n|$ を与えても失敗が生じたのは、失敗の定義に依存すると考える。あるポリゴンは対応する計測位置からのみ計測することを前提に失敗判定を行ったが、十分に計測位置が密に分布する場合、隣接する計測位置から複数のポリゴンが計測できる。今後、複数の計測位置から重複して計測可能な外観領域を明確にすることで、実際の異常検出用データの取得漏れの有無を判定していく。シミュレーションによる検証結果から、実環境で定位誤差が発生しても実機で所望の精度・分解能の異常検出用データが取得できる見込みが立った。今後実機検証により有効性を確認する。

## 6. まとめ

外観点検の自動化における研究動向や問題整理を踏まえ、大規模な社会インフラ設備の自動点検システムの構築に必要な要素が、計測不可能な外観領域を明確にする点と異常検出に必要な精度・分解能が保証されたデータを確実に収集する点を満たす計測位置決定法であることを述べた。点検

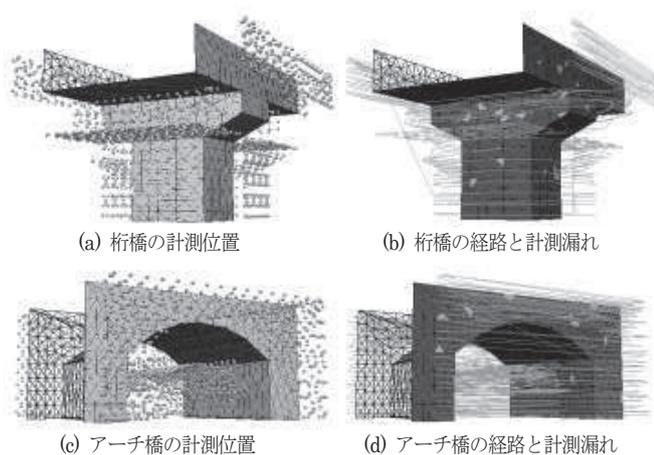


図14 定位誤差を想定した計測位置と経路と計測漏れ ( $|e_n|=0.8$ )

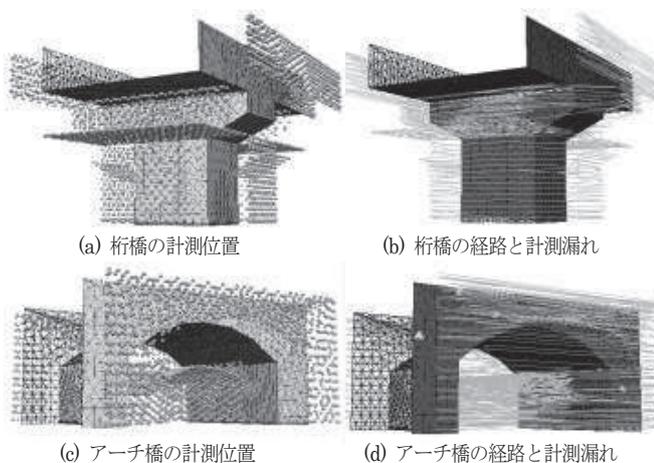


図15 定位誤差を想定した計測位置と経路と計測漏れ ( $|e_n|=1.2$ )

$ e_n $	Girder Bridge	Arch Bridge
0	49.7±0.6 [%]	41.6±1.4 [%]
$\frac{\mu}{3}$ (0.4)	12.7±0.8 [%]	12.9±0.8 [%]
$\frac{2\mu}{3}$ (0.8)	2.9±0.3 [%]	2.2±0.2 [%]
$\mu$ (1.2)	1.0±0.1 [%]	0.9±0.1 [%]

表2 計測失敗ポリゴン数の割合の平均

対象・計測条件・UAVに対する3つの制約条件の下、重要な2点の機能を有する計測位置決定法を提案した。理想的な環境を想定したシミュレーションにおいて、提案法が2点の機能を満たすことを確認した。また、実環境において避けられない定位誤差に対し、定位誤差を予め組込んだ計測位置決定法に拡張した。予備実験で計測した定位誤差を反映したシミュレーションにより、計測可能な外観領域のほぼ全ての領域において、所望の精度・分解能で異常検出用データを計測することができ、実環境での有用性を高めた。

予備実験を踏まえたシミュレーションは行えたが、実機検証には至っていない。機体の不安定性が大きな課題である。高い建造物が建つ名古屋大学構内で、安定した位置制御を行うためには、ロバストな位置推定系と制御系の実装が必須である。購入時に実装されていた位置推定系と制御系では度々不安定化したため、現在改良に取り組んでいる。早々に上記問題を解決し、実機での有効性を検証する。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、道木慎二教授、麻晃太郎氏をはじめとする名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻道木研究室の皆様にも多大なる協力をいただきました。研究協力者である道木加絵愛知工業大学准教授からは貴重なご助言を賜りました。ここに記して深謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 国土交通省、“平成25年度版 国土交通白書”、2013
- [2] 高田洋吾、桐本浩介、田尻智紀、川合忠雄、“立体的な環境で活動できる橋梁検査ロボットの開発(永久磁石式移動機構の走行性能評価)”、日本機械学会論文集(C編)、Vol.79、No.805、pp.155-166、2013
- [3] 今城直人、田尻智紀、檜木幹司、高田洋吾、“レーザレンジセンサを搭載した橋梁検査ロボットを用いた複雑環境場の立体地図作成”、日本機械学会論文集、Vol.82、No.833、pp.1-12、2016
- [4] 三菱重工メカトロシステムズ株式会社、“トンネル・橋梁の安全を支える道路維持管理設備(水噴霧測定車、橋梁点検車、橋梁点検台車)”、三菱重工技報、Vol.51、No.3、pp.41-43、2014
- [5] 金田尚志、魚本健人、“コンクリート構造物の劣化診断プログラムの開発(1)”、生産研究、Vol.55、No.4、pp.389-392、2003
- [6] 藤田悠介、三谷芳弘、浜本義彦、“画像処理によるコンクリート表面のひび割れ抽出法”、非破壊検査、Vol.56、No.7、pp.371-377、2007
- [7] 宮本文穂、浅野寛元、勝島龍郎、“PC橋維持管理支援システム(J-BMS PC版)の開発と実橋への適用”、土木学会論文集F3(土木情報学)、Vol.68、No.2、pp.L\_41-L\_54、2012
- [8] NEXCO東日本、“更なる高速道路の「安全・安心」確保に向けたスマートメンテナンスハイウェイ(SMH)の具体性について”、平成26年11月26日定例会見資料、p.1、2014
- [9] 西村正三、木本啓介、松岡のどか、大谷仁志、緒方宇大、松田浩、“橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価”、応用測量論文集、Vol.24、pp.52-61、2013

- [10] 満武勝嗣、東野伸一郎、“障害物回避を考慮したリアルタイム3次元飛行経路生成法の高速化”、日本航空宇宙学会論文集、Vol.58、No.677、pp.153-163、2010
- [11] 横山信宏、“UAVの衝突回避経路生成に関する一手法 -2次計画法とForce Field Algorithmの併用-”、日本航空宇宙学会論文集、Vol.56、No.653、pp.262-268、2008
- [12] J.A.Guerrero、Y.Bestaoui、“UAV Path Planning for Structure Inspection in Windy Environments”、Journal of Intelligent & Robotics Systems、Vol.69、Iss.1、pp.297-311、2013
- [13] “Stereolithography Interface Specification”、3D Systems, Inc., 1988
- [14] 大川善邦、“3Dグラフィックスのための数学 [改訂版]”、工学社、2009