

無人航空機によるインフラ設備外観自動点検における
計測タスク達成のための経路計画

麻 晃 太 朗

目 次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.1.1	UAV の歩み	1
1.1.2	UAV への期待	2
1.2	UAV 利用の技術課題	6
1.2.1	UAV の自律移動のための要素技術	6
1.2.2	UAV が達成すべきタスクと経路計画	9
1.3	インフラ設備自動点検システムと経路計画問題	10
1.3.1	インフラ設備点検の補助・代替のための要素技術	11
1.3.2	経路計画に関する既存研究と問題点	14
1.4	本研究の目的	15
1.4.1	研究目的	15
1.4.2	本研究でのアプローチ	16
1.5	本論文の構成	17
第 2 章	問題設定	19
2.1	本研究における自動点検システムと経路計画	19
2.1.1	本研究で扱うインフラ設備点検	19
2.1.2	経路計画に必要な事前情報の検討	20
2.2	本研究における経路計画の方針	23
2.2.1	計測位置の導出	25
2.2.2	計測位置巡回順の決定	25
第 3 章	経路計画方針の妥当性評価	29
3.1	計測タスクへの要件と経路計画	29
3.2	計測位置導出法	30
3.2.1	計測条件の定式化	30
3.2.2	計測位置導出問題の定式化	31
3.2.3	計測位置導出のための 3D モデルの再構成	32

3.3	計測位置巡回順決定法	36
3.3.1	計測位置間の移動	36
3.3.2	計測位置巡回順の決定	38
3.4	経路計画法評価のためのシミュレーション	38
3.4.1	シミュレーション条件：対象設備	38
3.4.2	シミュレーション条件：計測機器・計測条件	38
3.4.3	経路計画結果	40
3.5	実際の運用を考慮して改善すべき問題	43
3.5.1	短時間でのタスク達成	43
第4章	収集データの精度と作業効率を両立した経路計画	45
4.1	計測位置導出法	45
4.1.1	ポリゴンの統合のための検討	45
4.1.2	曲面の計測を考慮した計測条件の定式化	46
4.1.3	初期ポリゴン配置への依存を解消した計測位置導出法	48
4.2	経路計画法評価のためのシミュレーション	52
4.2.1	シミュレーション条件	52
4.2.2	計測タスクのシミュレーション	53
4.2.3	シミュレーション結果	54
4.3	社会実装に向けて検討すべき問題	59
第5章	社会実装を想定した評価・検証	61
5.1	社会実装に向けて検討すべき課題	61
5.2	大規模設備に対する手法の適用	63
5.2.1	計測位置導出法の計算量の概算	63
5.2.2	3Dモデルの規模と計算時間の比較	63
5.3	実験計画	64
5.3.1	実環境における検証実験のロードマップ	67
5.4	実験 1-1：理想的な UAV を想定した検証実験	70
5.4.1	実験条件	70
5.4.2	位置誤差への対処	70
5.4.3	実験結果	75
5.5	実験 1-2：UAV 実機を用いた検証実験	75
5.5.1	使用する UAV	75
5.5.2	実機に発生する位置誤差	79
5.5.3	実験条件	82
5.5.4	実験結果	83

5.5.5	実験1のまとめと今後の課題	86
5.6	今後の実験計画	87
5.6.1	実験2. 小規模立体形状領域の計測	87
5.6.2	実験3. 実橋梁規模の対象の計測	88
5.7	本章のまとめ	89
第6章	結論	91
6.1	本研究の成果	91
6.2	今後の課題	93
6.2.1	検証実験	93
6.2.2	経路計画	93
	参考文献	97

目 次

1.1	日本における年少・生産年齢・老年人口の推移（出典：日本の将来推計人口，国立社会保障・人口問題研究所.）	2
1.2	国内のドローンビジネス市場規模の予測（出典：ドローンビジネス調査報告書 2019【インフラ・設備点検編】，インプレス総合研究所.）	3
1.3	サービス市場の分野別市場規模（出典：ドローンビジネス調査報告書 2019【インフラ・設備点検編】，インプレス総合研究所.）	3
1.4	自律移動システムの概要	7
1.5	これまで主流であった経路計画問題のイメージ（橙点：目的地，赤矢印：経路）	8
1.6	測量用の経路計画のイメージ	10
1.7	定期点検に関する維持管理フロー（出典：国土交通省.）	12
2.1	インフラ設備表面に生じる異常の例	21
2.2	StL ファイル	22
2.3	マルチロータ型 UAV：DJI S1000+	24
2.4	UAV の姿勢とカメラの方向	24
2.5	仮想的な計測と実環境での計測	26
3.1	カメラのパラメータと計測範囲の定義	32
3.2	あるポリゴンに対する計測位置の導出	33
3.3	再構成が必要なポリゴンの例	33
3.4	ポリゴン分割のイメージ	35
3.5	$p_{\text{start}}-p_{\text{goal}}$ 間の衝突回避用部分経路の生成	37
3.6	対象設備の 3D モデル	39
3.7	経路計画結果（桁橋）	41
3.8	経路計画結果（アーチ橋）	42
4.1	曲面領域と計測範囲の位置関係	46
4.2	楕円体状の計測範囲 O	47

4.3	ポリゴン t と計測範囲 O の位置関係	47
4.4	計測方向のずれと画像上でのサイズの関係	49
4.5	計測位置導出法のフロー	50
4.6	経路計画結果（桁橋）	56
4.7	経路計画結果（アーチ橋）	57
4.8	計測シミュレーションの例	58
4.9	各対象・条件・経路における計測結果	58
5.1	社会実装に向けて解決すべき課題	62
5.2	2 個連ねた 3D モデル（モデル B）	64
5.3	3D モデルの規模と計算時間の比較（桁橋）	65
5.4	3D モデルの規模と計算時間の比較（アーチ橋）	65
5.5	3D モデルの計測に要した時間の比較（桁橋）	66
5.6	3D モデルの計測に要した時間の比較（アーチ橋）	66
5.7	実環境における検証実験のロードマップ	68
5.8	実験環境（輪講室）	71
5.9	計測対象のホワイトボード	71
5.10	AR マーカーを搭載した HERO 4	72
5.11	誤差分布（単位：cm）	73
5.12	水平方向の位置誤差への対処	74
5.13	計測位置（実験 1-1）	76
5.14	画像データが収集された範囲（実験 1-1）	77
5.15	解析結果（実験 1-1）	78
5.16	位置誤差測定実験の様子	80
5.17	計測された UAV の座標	81
5.18	位置誤差の解析結果	81
5.19	計測対象の平面領域	82
5.20	計測実験の様子	83
5.21	計測位置（実験 1-2）	84
5.22	計測結果（実験 1-2）	85
5.23	高度方向の累積誤差	86
5.24	構築中の実験環境	88
5.25	橋梁を模した実験施設（写真：福島ロボットテストフィールド）	89

本論文で用いる用語・変数・定数の定義

本論文では，以下の用語を定義する．

タスク : ロボットが達成すべき作業

計測 : 点検作業における異常検出のためのデータの収集

ウェイポイント : 経路において UAV が通過・到達すべき位置

計測位置 : 計測タスク達成のためのウェイポイント

計測距離 : 計測位置 – 対象表面間の距離

計測範囲 : 計測位置から有効なデータを収集可能な範囲

本論文で用いる主な変数・定数の定義を以下に示す．

S_{pxl} : 画像中の 1 画素当たりの実サイズ

t : 三角形ポリゴン

T : t の集合および配列

b : t の重心

n : t の法線

p : 計測位置

D : 計測距離

O : 扁球状の計測範囲

c_o : O の中心

v_{op} : c_o から p へ向かうベクトル

C_j : 複数の t から構成される j 番目のクラス

\mathbf{C} : C_j の集合および配列

\mathbf{b}_{C_j} : C_j の \mathbf{b} 成分の中心

\mathbf{n}_{C_j} : C_j の \mathbf{n} 成分の中心

\mathbf{V}_j : C_j の中心

第1章

序論

本章では、本研究の背景と研究目的および本論文の構成を説明する。

1.1 本研究の背景

無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle, 以降, UAV）とは、人間が搭乗せず遠隔操縦や自律制御によって飛行する航空機を指す。UAV は空中を移動可能である, 人間が搭乗しないため作業員の負担が少ないといった特徴から, 様々な分野での導入が進められてきた。本節では, UAV の歩みとこれまでの利用について述べる。

1.1.1 UAV の歩み

UAV の歴史は古く, 誕生は 1917 年に遡る [1]。世界最古の UAV は, アメリカ海軍の Curtiss-Sperry Aerial Torpedo とされている。この機体をはじめ, 当初の UAV は軍用として開発が進められた。人間が搭乗不要という点から, 隊員の生命に危険が及ぶ任務の遂行を期待された。その後, 現在に至るまで標的, 偵察, 攻撃といった用途で開発・利用されてきた。

一方, 民生・産業用 UAV の開発は 1980 年代から盛んとなった。これまでに最も普及した分野は農業・林業である。例えば, 農薬散布作業は雑草, 害虫および菌の駆除に有効であるが, 作業員への曝露の恐れがある, 広大な農地への散布は重労働であるといった課題がある。ヤマハ [2] は, 1987 年に世界初の農薬散布用の小型無人ヘリコプターである R-50 を販売した。その他, 生育把握 [3] や植生分類 [4] といった目的で開発・利用が広がり, 従事者不足が問題とされるこれらの分野において重要なツールとなっている [5]。

今日「ドローン」として一般的に知られているマルチロータ型 UAV の研究開発も 1980 年代から始まっている。最も初期のマルチロータ型 UAV は, 丹羽ら [6] が開

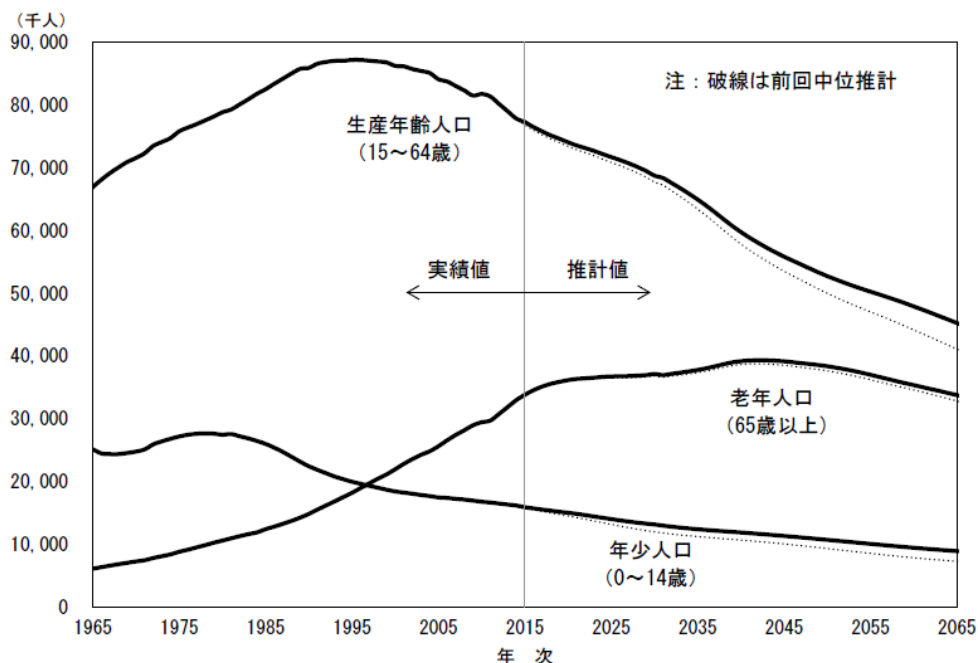


図 1.1. 日本における年少・生産年齢・老年人口の推移（出典：日本の将来推計人口，国立社会保障・人口問題研究所。）

発したダクトドファン形 VTOL 実験機，キーエンス [7] が発売した E-170 ジャイロソーサ等である。当時は MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）センサやバッテリーやといった周辺技術が未熟であり，大規模な普及には至らなかったものの，現在のマルチロータ型 UAV の基礎を築いた。これら技術の発達に伴い，マルチロータ型 UAV の研究開発が活発化した。特に，2010 年に Parrot 社の AR.Drone [8]，2012 年に DJI 社の PHANTOM [9] といった安価で操縦が容易な機体が発売され，空撮分野を中心に UAV が広く認知されるきっかけとなった。以降，UAV は様々な分野で利用され，現在に至る。

1.1.2 UAV への期待

我が国においては，少子高齢化を背景に労働力不足が大きな問題となっている。国立社会保障・人口問題研究所 [10] によると，日本の生産年齢（15～64 歳）人口は，1995 年の 8,726 万人をピークに 2015 年には 7,728 万人に減少し，2065 年には 4,529 万人まで低下すると予想される（図 1.1）。日本のみならず，世界的に見ても高齢化が進むと予想されており [11]，将来の労働力不足への対策が求められる。

労働力不足に対して，これまでは製造業における産業用ロボット，工場・倉庫内

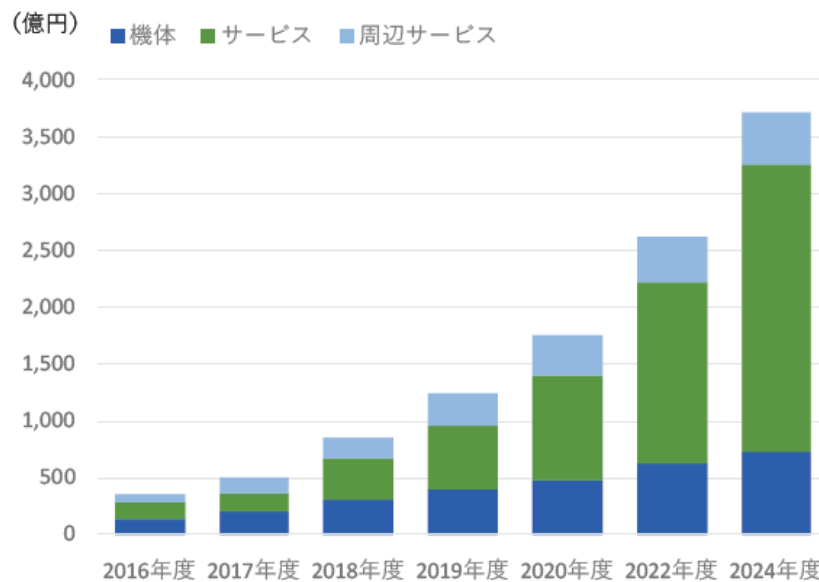


図 1.2. 国内のドローンビジネス市場規模の予測（出典：ドローンビジネス調査報告書 2019【インフラ・設備点検編】，インプレス総合研究所.）

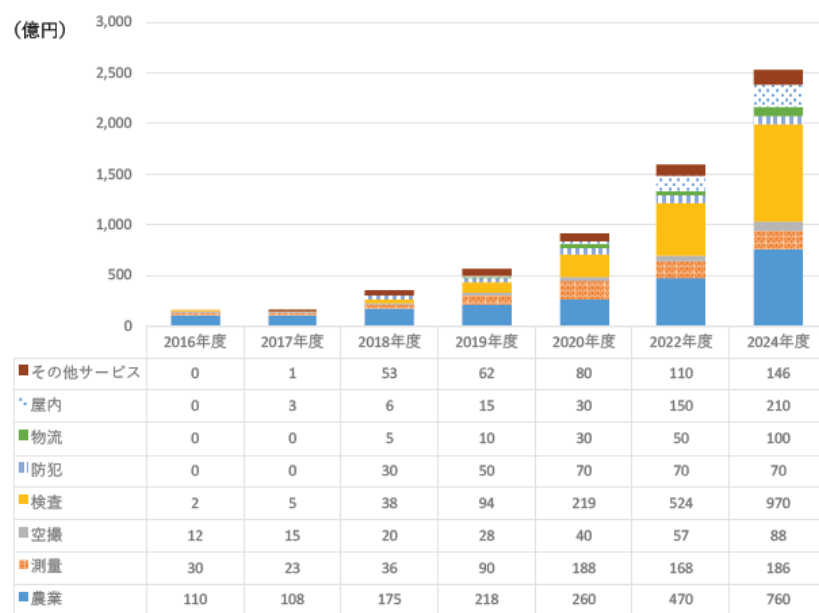


図 1.3. サービス市場の分野別市場規模（出典：ドローンビジネス調査報告書 2019【インフラ・設備点検編】，インプレス総合研究所.）

での無人搬送車（Automated Guided Vehicle, 以降, AGV）等が大きく貢献してきた。一方, これらの機器は行動範囲の制約が大きく, 導入可能な分野が限定的であった。UAV は従来のロボットとは異なるタスクを遂行可能なツールとして, 大きな期待が寄せられている。

国内のドローン（航空, 陸上, 水上, 水中）ビジネス市場規模の予測結果 [12] を図 1.2 に示す。図 1.2 に見られるように, ドローン市場の規模は前後 5 年の間で加速度的に膨らむと予測されており, UAV への期待は非常に高まっている。ドローンビジネスのうち, サービス市場の分野別市場規模の予測結果を図 1.3 に示す。前述のとおり, 「農業」分野は現在最も大きな市場であり, 今後も成長していく見通しである。一方, 「検査」(=点検) 分野の市場規模は 2016 年から急速に拡大し, 今後 5 年で農業分野を追い抜くと予測されている。以降で述べるが, 点検分野ではインフラ設備の老朽化と作業員不足が喫緊の課題であり, UAV の導入が特に期待されている。また, 「測量」分野においては農業に次いで早い段階から利用が進んでおり, 他の分野に押されながらも安定した市場規模を保つ見込みである。さらに注目すべき分野は「物流」である。2018 年に本格的な利用が始まって以降, 2024 年には 20 倍の市場規模を持つと試算されている。

以上のように, UAV の利用は今後様々な分野で拡大すると予測されている。以降では, 社会的意義が大きく, 向こう 5 年ほどで大きな市場規模を持つと考えられる農業, 点検, 測量, 物流の分野に注目する。ここで, 点検, 測量, 物流の分野に関して, 現状の問題と UAV への期待を述べる。

点検

老朽化インフラ設備の増加と新設改良費の削減 [13] を背景に, 既存設備の長期利用のための高頻度な点検が求められている。インフラ設備の点検は専門作業員によって実施されているが, 限られた作業員のみで多数の設備すべてを点検することは困難である。また, 点検作業には専門的な技能や経験を要求され, 未経験者を現場へ投入できるレベルまで育成するために多くの時間を要する。以上のような背景から, 点検頻度の確保が課題となっている。代表的なインフラ設備である橋梁を例に挙げると, 日本国内の約 70 万の橋梁 [13] に対して 5 年に一度の頻度での点検 [14] が義務付けられている。これを受けて, 平成 26 年度には全橋梁の 10% (69,766 橋) に対して点検が計画されたが, 実際に点検された橋梁は全体の 9% (63,719 橋) にとどまった [15]。

インフラ設備の高頻度な点検のために, 対象となる設備から各種データを収集する専用ロボット [16, 17], 対象設備の異常を収集データから検知する技術 [18–21] といった様々な研究・開発が行われている。特に, UAV は入手が容易かつ広範囲を短時間で点検可能な点から大きな期待が寄せられており, イン

フラ設備点検への導入が進んでいる [22, 23].

測量

従来の地形測量はトータルステーションや GNSS 測量機器を用いて作業員が地上から行う手法が主流であった。この方法は、インフラ設備点検と同様に膨大な人員と時間を要する。他には、小型の有人航空機を用いて上空から行うといった手法もあったが、費用が膨大となる問題に加えて、上空からの測量となるため詳細なデータを収集できず、狭域の詳細な測量には不適である。

UAV を導入することで、安価、少人数、短時間で広範囲を詳細に測量できると期待されている。現在でも多くの企業が UAV を用いた測量サービスを提供している [24, 25].

物流

昨今のネットショッピングの利用拡大 [26] を背景に、運送業界では人手不足が深刻な問題となっている。また、顧客への荷物の配送はこれまで陸路を主として行われてきたが、交通渋滞が慢性化した地域においては円滑な配送が困難である。AI・IoT 技術を活用した物流の最適化に関する研究開発 [27, 28] も行われてきたが、陸路のみでの配送には限界がある。

UAV の導入により、無人かつ高速な配送、また、離島などの交通困難地への配送が期待されている。これまでに、楽天 [29] や amazon [30] といった企業が UAV を用いた配送サービスの提供に向けて活動している。

上記の分野において、UAV の機構は基本的に同一である。にもかかわらず、UAV の適用先が多岐にわたるのは、UAV がタスク達成のために異なる動作をするからである。例えば、物流作業において、UAV は荷物を目的地まで運ぶタスクを要求される。この場合、UAV は基地から（複数の）目的地へ移動して荷物を積み降ろし、最終的に基地へ戻る。一方、インフラ設備点検・地形測量作業においては対象物の表面形状をカメラやレーザ距離計を用いてデータを収集するタスクを求められる。このタスクは物流のような荷物を目的地まで運ぶタスクとは異なり、UAV は基地から出発して対象物周辺を飛行しながらデータを収集し、最終的に基地へ戻る。また、農業の分野においては、タスクは指定された領域への農薬の散布となる。このタスクにおいては、UAV は測量のように対象物周辺を飛行しながら農薬を散布する。タスクを考慮して動作を検討することで、これまで挙げた分野以外にも UAV を導入できる可能性がある。そのため、UAV の利用は今後さらに広がると考えられる。

1.2 UAV 利用の技術課題

幅広い分野での利用が進む UAV であるが、現行の UAV には技術課題が存在する。本節では、UAV の技術課題について述べ、本研究で対象とする課題を明確化する。

現行のほとんどの UAV はバッテリーを動力としている。UAV に搭載可能なバッテリーの持続時間は一般的に数十分程である。長時間にわたる作業の遂行のために、充電用基地局の設置や複数機の利用といった策が採られる。ケーブルを介して電力を供給しながら利用するという対策もあるが、広範囲を移動できるという UAV の特性を活かし切れていない。

また、UAV は空中を移動するという性質から、航行不能に陥った場合の周囲への影響が AGV 等の機器と比べて大きい。そのため、コントローラとの通信が途絶えた、機構の一部が故障した際のフェールセーフが強く要求される。例として、通信断絶時の自動帰還機能、8 枚のロータによる冗長性の確保、安全な落下のためのパラシュートの搭載といった対策が採られる。

さらに、マルチロータ型 UAV は操縦が容易とはいえ、業務への利用には一定以上の操縦技量・経験が求められる。日本においては現在、人口集中地区や空港周辺で 200g 以上の UAV を飛行させる際には国土交通省からの許可・承認が必要である。この許可・承認を受けるための基準 [31] として、10 時間以上の飛行経歴および基本的な知識・操縦技量という項目が存在する。飛行経験を積むためには自主的な訓練もしくはドローンスクールの受講が必要であり、UAV 利用のネックとなっている。昨今の技術の発達に伴い、指定されたウェイポイントの巡回のような簡易的な命令を実行する自律移動が可能となった。一方、実践的な作業への導入を考えると、現状の自律移動技術には課題が残る [32]。例えば、物流においては数 cm の精度での着陸が必要とされる。他には、インフラ設備点検では GNSS が利用不可能な領域での自己位置推定が求められる。

以上より、技術課題の中でも、本研究では自律移動に着目する。自律移動技術の発展によって UAV 活用の敷居が下がり、労働力不足解消に貢献できると考えられる。以降で、UAV の自律移動のための要素技術について述べる。

1.2.1 UAV の自律移動のための要素技術

自律移動は UAV に特有の技術ではなく、AGV をはじめとするロボットや自動運転車等の分野で盛んに研究されてきた。自律移動システムは大きく分けて、センシング、自己位置推定、経路計画、機体制御の 4 ステップで構成される (図 1.4)。ロボットはまず、カメラ、レーザ距離計、衛星信号受信機等のセンサを用いて自身の周囲の情報を収集する。収集した情報を基に、環境の中で自身がどこに存在するか

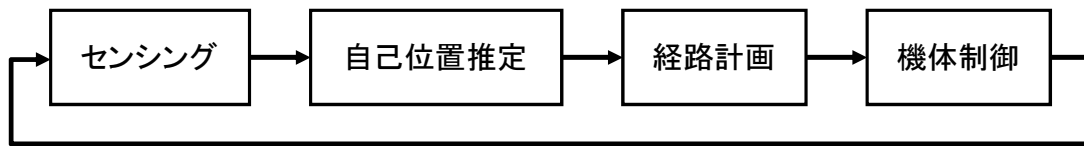


図 1.4. 自律移動システムの概要

を推定する。推定した位置から、タスク達成のために自身が追従すべき経路を計画する。経路に関して、作業環境の詳細が既知であればタスク開始前に計画する場合もある。計画された経路に追従するように移動機構を動作させ、その後再びセンシングを行う。以上の4ステップをタスク達成まで繰り返す。

システムを構成する各要素技術について議論する。ロボットが移動する環境によって収集が容易・困難なデータは異なる。例えば、遮蔽物のない上空を飛行する UAV は衛星信号を受信しやすく、GNSS の利用が有効である。しかし、ビル街を走行する自動運転車にとっては、マルチパスの影響を受ける GNSS よりも、反射光によって周囲の形状を認識できるレーザ距離計の方が有用なデータを得られる。そのため、センシング技術に関して、ロボットごとに異なるセンサを搭載すべきである。また、UAV であれば翼、AGV や自動運転車であれば車輪・ステアリング、その他ロボットであれば脚といったように、各ロボットはそれぞれ異なる移動機構を持つ。そのため、機体制御技術は各機構に合わせて選択する必要がある [33,34]。一方、自己位置推定、経路計画に関して、AGV と UAV では活動する環境は異なるが、基本的な要素技術はおおむね同一である。例えば、大橋ら [35] は、ロボットに搭載された複数のセンサからの情報を選択・統合し、ロバストな位置推定を実現する手法を提案した。この手法は搭載されたセンサの種類に依存しないため、様々なロボットに適用できる。そのため、これらの要素技術を発展させることで自律移動システムの高度化に広く貢献できる。

上記要素技術の中で、本研究では経路計画に着目する。まず、これまで研究されてきた経路計画技術について述べる。従来の主流であった経路計画に関する検討は、2 点間の移動経路の生成、複数目的地の巡回順決定の大きく 2 つに分けられる (図 1.5)。それぞれについて以下で説明する。

2 点間の移動経路の生成 (図 1.5(a))

ある 1 点から他の 1 点へ移動する際、点間に障害物がなければ 2 点を結ぶ直線上を移動すればよいが、障害物が存在する場合は迂回して移動しなければならない。また、AGV の場合は地面の起伏、UAV の場合は気流といったように、移動にかかるコスト (時間、エネルギー等) や機体の安全に影響を及ぼす要素を考慮する必要がある。

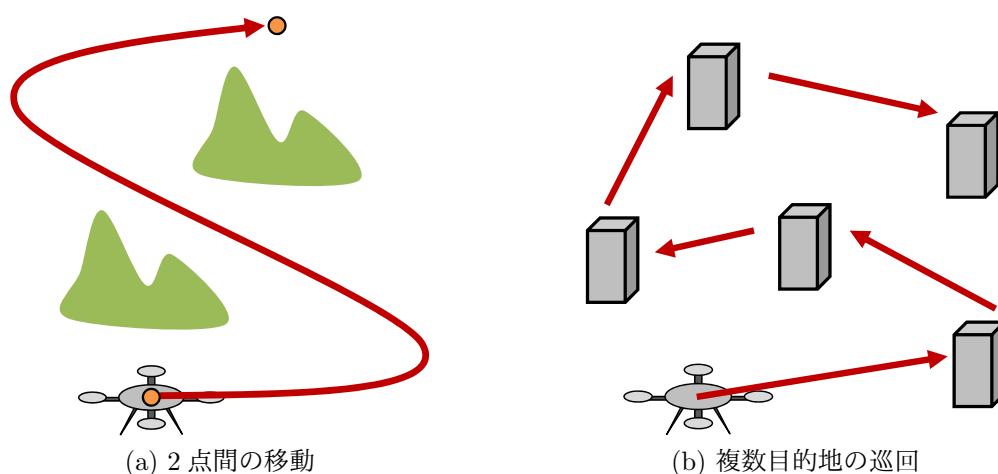


図 1.5. これまで主流であった経路計画問題のイメージ（橙点：目的地，赤矢印：経路）

この問題の解法として，ロボットが移動する環境をグラフと見なしてグラフ探索アルゴリズム [36] を用いる方法が存在する．また，目標位置や障害物にポテンシャル関数を定義し，関数の最急降下方向にロボットを移動させるポテンシャル法 [37] が提案された．これらの手法は，ロボットの経路計画問題に広く利用されている [38,39]．

複数目的地の巡回順決定（図 1.5(b)）

ロボットに与えられた作業によっては，複数の目的地を巡回する必要がある．上記の作業を効率的に達成するためには，総移動距離や総作業時間を最小化する経路が求められる．このような問題は，セールスマンが複数の訪問先を巡回する問題と見立てて，巡回セールスマン問題（Traveling Salesman Problem, 以降，TSP）と呼ばれる．TSP は組み合わせ最適化問題の一種であり，全探索によって最適解を得られる．しかし，都市（＝目的地）の数が多い場合やオンラインで巡回順を決定する場合においては現実的ではない．そこで，現実時間内に準最適解を導出するアルゴリズム [40,41] が多く提案・利用されている．

以上を受けて，UAV の経路計画について述べる．前述のとおり，UAV には利用分野ごとに運搬，計測，農薬散布といった様々なタスクが与えられる．これらのタスク達成のためには，UAV がとるべき動作に応じた経路を計画する必要がある．一方，従来の経路計画法は単純な移動を目的としており，あらゆるタスクに適用することはできない．例えば，測量や農薬散布というタスクは対象となる領域と一定の位置関係を保って飛行する必要があるが，2 点間の移動や複数目的地の巡回では対処できない．

以上のように、UAV のタスク達成のためには、これまでの移動を目的とした手法とは異なる、タスクを考慮した経路計画が必要である。そこで、UAV のタスクと経路計画について更に検討し、本研究の焦点を絞る。

1.2.2 UAV が達成すべきタスクと経路計画

UAV が達成すべきタスクと経路計画について議論する。まず、問題の単純化のために、タスクは単一の UAV を用いて達成することを前提とする。前述のとおり、UAV の導入が想定される分野は様々である。ここでは、前節で挙げた物流作業とインフラ設備点検作業の 2 分野に関して議論する。

物流作業において、達成すべきタスクはある地点から他の地点への荷物の運搬である。UAV は基地から出発し、集荷地点まで移動して荷物を積み、搬送地点まで移動して荷物を降ろし、最後に基地へ戻る。集荷・搬送地点は複数の場合もあり、また、基地に戻らず運搬作業を繰り返す場合もある。以降、集荷地点と搬送地点を合わせて目的地と呼ぶ。目的地の位置は事前情報として与えられる、もしくは環境認識技術を用いて推定できるものとする。上記の作業において、UAV は目的地に到達さえすれば、荷物の積み降ろし作業は UAV に搭載された機構、もしくは人間によって遂行可能である。よって、物流作業は目的地の巡回と荷物の積み降ろしという 2 つのタスクに分類でき、経路計画問題においては目的地の巡回のみ考慮すればよい。以上を考慮し、基地を b 、集荷地点と搬送地点を合わせた n 個の目的地を $\mathbf{D} = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ とおくと、 $\{b, d_1\}$, $\{d_1, d_2\}$, \dots , $\{d_n, b\}$ 間を結ぶ各経路を生成すれば、すべてのタスクを達成可能な経路を計画できる。また、 \mathbf{D} の中で到達すべき順番を入れ替えられる場合、TSP を解くことで最短時間でタスクを達成可能な経路を計画できる。以上のように、物流用 UAV については、従来手法を利用して経路計画が可能となる。

一方、点検作業において、UAV は基地から出発し、対象設備の周辺を移動しながら各種データを収集し、最終的に基地へ戻る。以降、対象設備のデータを収集するタスクを計測タスクと呼ぶ。物流作業と同様に経路計画を行うためには、計測タスクを目的地巡回タスクとデータ収集タスクに分類する必要がある。しかし、点検作業の事前情報として与えられるのは対象設備のうちデータを収集すべき領域である。対象領域は一般的に UAV に対して広大であり、UAV が到達すべき特定の点群や小領域群と見なせない。この場合、点検作業から目的地巡回タスクを抜き出せない。人間が目的地を提示するという解決案はあるが、対象設備は橋梁やダムといった巨大な構造物であり人手では膨大な手間がかかる、人間による作業は各人での判断基準に差があり系統立てて目的地を決定できない、といった従来の人間による点検作業と同様の問題が生じる。そのため、物流作業と同様の経路計画は不可能である。

インフラ設備点検における計測タスクと類似したタスクの経路計画についても議

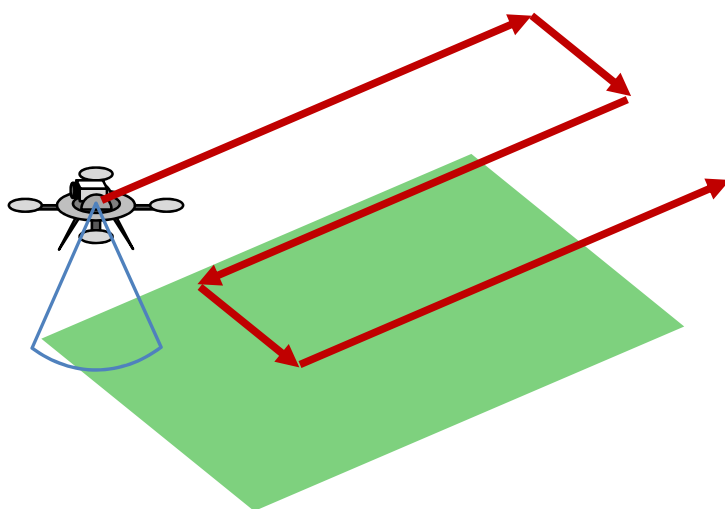


図 1.6. 測量用の経路計画のイメージ

論する．地形測量や農薬散布といったタスクは，指定された領域を網羅するという点で計測タスクと類似する．これらのタスクに関して，経路計画システム [42,43] が既に開発・運用されている．しかし，これらの経路計画システムは広大な平面領域を対象とし，作業員が直線移動を繰り返すように操縦する知見をベースとしている（図 1.6）．そのため，曲面も含んだ複雑な表面形状を持つインフラ設備に対しては適用が困難・煩雑となる．地上で活動するロボットを用いた掃引タスクについても経路計画法 [44,45] が提案されたが，同様の問題が存在する．iRobot 社の掃引ロボット「ルンバ」には，障害物の多い環境でも確実に掃引するための経路探索アルゴリズムが搭載されている [46]．一方で，このアルゴリズムは系統的でなく，対象全領域の計測を保証できない．

以上より，これまで主流であった経路計画法のみでは点検作業に対応できない．そこで，本研究の目的を点検用 UAV の経路計画に限定する．点検作業以外にも前述の問題を持つ作業は存在するが，点検作業はインフラ設備の維持・保全に必須であり，社会的意義が非常に高い分野である．そのための経路計問題は早急に解決すべきであるため，本研究で取り扱う問題とする．

1.3 インフラ設備自動点検システムと経路計画問題

前節で課題としたインフラ設備点検のための経路計画問題に取り組むにあたり，インフラ設備点検の全体像，本研究において取り扱うべき作業，また，その作業における経路計画の必要性を明確化する．

1.3.1 インフラ設備点検の補助・代替のための要素技術

インフラ設備点検の最終目的は、設備の長期安全利用のための維持管理計画を立案する際の目安となる設備の健全度を診断することである。そのために達成すべきタスクは多岐にわたる。図 1.7 は、国土交通省 [14] が示した定期点検に関連する維持管理の標準的なフローである。図 1.7 のうち、定期点検において主となるタスクは「定期点検 2. (2) の範囲」であり、近接目視等により対象設備の状態を把握し、次回の定期点検までの措置方針の参考のための判定を行い、部分的・全体的な健全度を診断すると定められている。以降では、これらタスクを補助・代替する要素技術について議論する。

宮本ら [51] は、橋梁の維持管理を合理化・効率化するための支援システムを開発した。このシステムは 3 つのサブシステムから構成され、それぞれが実際の橋梁点検におけるデータ管理、健全度診断、維持管理計画策定を支援する。この中でも、図 1.7 の「定期点検 2. (2) の範囲」に該当する、RC-BREX：橋梁の健全度を評価するサブシステムに着目する。RC-BREX では、入力すべき異常の状況が一定領域内のひび割れ量・ひび割れ幅といった定量的なデータとなっており、これらを基に橋梁の健全度を評価する。このシステムにより、適切なデータを入力すれば橋梁の健全度を定量的に評価できる。RC-BREX において、入力すべき異常の状況は作業員が収集することが前提となっている。従来、このタスクは作業員が対象設備に近接して点検対象表面に発生したひび、さび、漏水といった異常、また、サーモ画像や打音から内部の亀裂を発見し、その数や程度を把握するといった方法で行われてきた。しかし、この方法では作業員の主観による判断や熟練度の違いによって検出結果に差が生じる。また、限られた作業員のみで多数の設備を目視点検することは困難であり、維持管理効率化のネックになっていると考えられる。そのため、本研究では従来の目視作業をロボットに代替させることに着目し、それらに関する要素技術について議論する。

作業員の近接目視作業を代替するための様々な装置・ロボットの開発が行われてきた。代表的なものとして、対象設備に接触しながら移動してデータを収集するロボット [16,17]、対象設備周辺を飛行してデータを収集する UAV [22,23] 等が挙げられる。本研究では、前述のとおり UAV の利用を前提とする。UAV は移動可能な領域が大きく広範囲のデータを短時間で収集可能であり、簡易的な定期点検においては特に有効である。

近接目視作業を UAV が代替する場合、以下の 3 つのステップが必要となる。

- 経路計画：データ収集作業を達成するための UAV の飛行経路を決定する。
- データ収集：対象設備表面または内部の状態をできるデータを収集する。

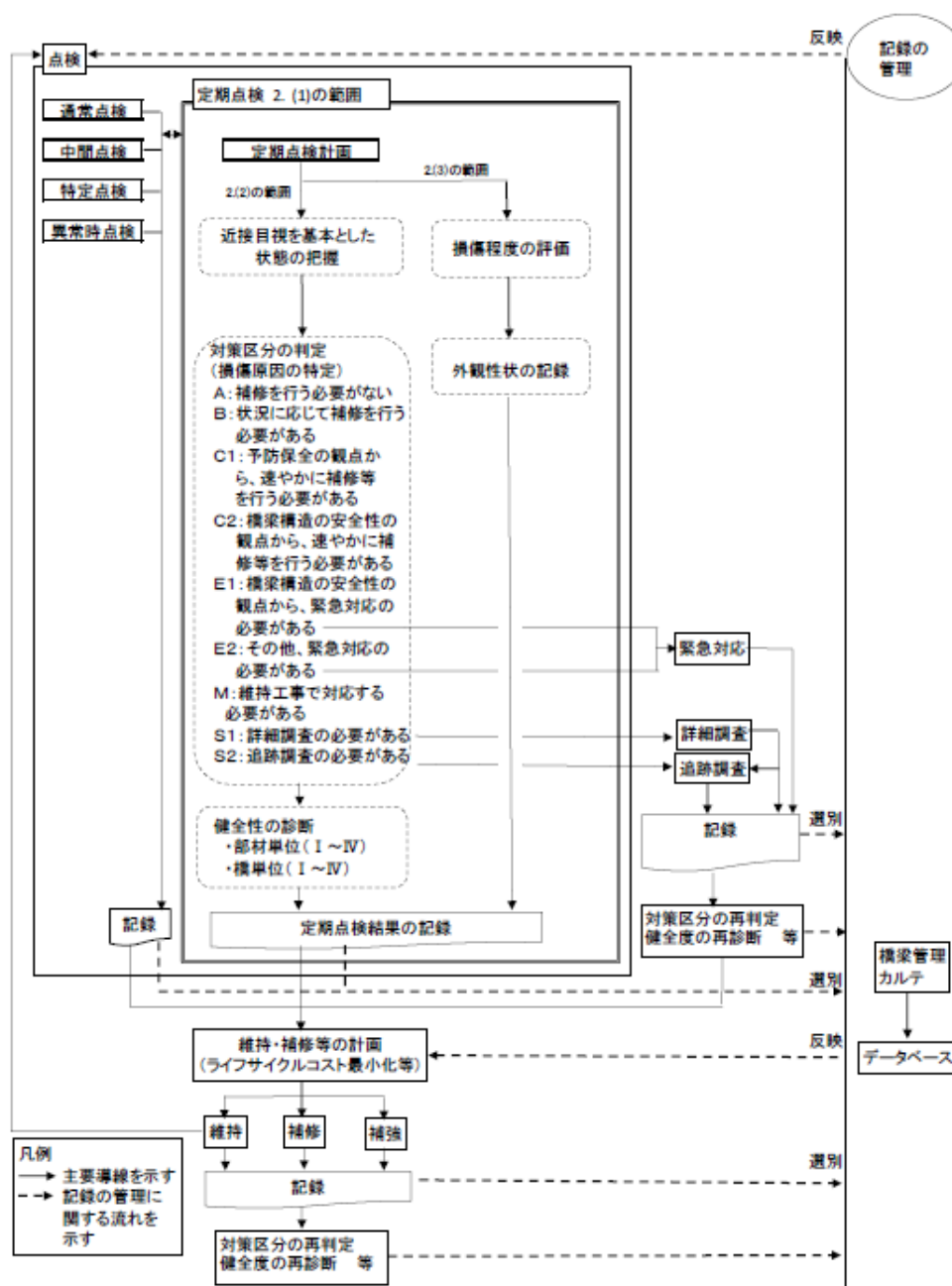


図 1.7. 定期点検に関する維持管理フロー（出典：国土交通省.）

- 異常検出：収集されたデータから，異常の数や程度を把握する．

まず，データ収集および異常検出に関する要素技術の研究動向を以下に示す．

異常検出に関する既存研究

対象設備の収集データから，異常箇所や異常の程度を自動で検出する手法が多数研究されている [18–21]．小山ら [18] は，画像解析によるコンクリート表面のひび割れ抽出法を提案した．ガボールウェーブレットの特徴量を用いることで，画像データの輝度むら，影，汚れなどの影響を除去し，高精度なひび割れ抽出が可能となった．後藤ら [19] は，さびの粗密さをさび画像の周波数エネルギー比の違いとして表現し，外観評点の識別モデルによるさび画像を自動識別する手法を提案した．この手法は，耐候性鋼材のさび外観点検評価の基準を満たし，さびの自動検出に有用である．

光学画像からでは困難な対象設備内部の異常を検出する手法も研究されている．溝上ら [20] は，赤外線サーモグラフィを用いた鋼床版の亀裂の遠隔検出に関する研究を行った．亀裂によって生じる鋼床版の温度ギャップを赤外線サーモグラフィを用いて検出することにより，鋼床版表面の塗装を剥がすことなく目視での亀裂検出の可能性を示した．この知見を画像処理技術等と組み合わせることで，鋼床版内部の亀裂を自動で検出できると考えられる．園田ら [21] は，打音検査を定量的に行うための研究を行った．打音の周波数特性を評価するための周波数スペクトル差を定義，打音特性から3つの特徴量を設定し，実橋梁において健全度の評価が可能という結果が得られた．

データ収集に関する既存研究

前述の異常検出技術の利用には，必要な各種データを一定精度以上で収集する必要がある．そのために，データ収集と UAV の定位性能向上に関する技術が重要となる．

DJI 社の S1000+ [47] は最大離陸重量 11kg である．一眼レフカメラほどの重量の機器であれば搭載でき，高解像度な画像を収集可能となる．通常のカメラ以外にも，UAV に搭載可能な多くのデータ収集機器が開発されている．DJI 社は，赤外線カメラを搭載した UAV [48] や，UAV に搭載可能な赤外線カメラ [49] を開発した．市川ら [50] は，マニピュレータを搭載した UAV を用いた橋梁の打音点検システムを提案した．UAV に搭載可能かつ人と同等の打撃力を発生可能な打音装置を作成し，対象設備に対して高い確率で打撃を成功可能という結果を得られた．これらの機器を用いることで，異常検出に必要な各種データを収集できる．

UAV の定位性能向上に関しても様々な研究・開発がされている．鈴木ら [52] は，複数の GNSS アンテナを用いた UAV の位置推定法を提案した．各 GNSS アンテナの観測値とアンテナ間の位置関係を利用し，高精度な位置・姿勢推定を可能とした．デンソー [23] は，インフラ設備点検や測量に用いる UAV を開発した．トータルステーションを利用して GNSS 信号を受信不可能な領域での高精度な位置推定，可変ピッチプロペラの搭載による耐風性能を実現した．

以上を受け，UAV を用いたインフラ設備点検のための経路計画の要件を説明する．まず，インフラ設備点検における計測タスクを達成するための絶対条件として次の 2 つが挙げられる．1 つは，データ収集のために，経路を巡回することで対象設備全領域のデータを一定以上の精度で収集できること，もう 1 つは，対象設備の保全のために，設備と UAV が衝突しないことである．また，絶対ではないが考慮すべき要件が存在する．例として，作業時間を最短にする，飛行中のエネルギー切れを回避する，UAV の飛行特性を考慮する等がある．これらを考慮して，以降では計測タスクおよびそれと類似するタスクのための経路計画の既存研究とその問題点を説明する．

1.3.2 経路計画に関する既存研究と問題点

インフラ設備点検への UAV の導入は 2010 年代から検討され始めた課題であり，また，当初は作業員による操縦を前提としていた．そのため，自動点検システムを前提とした経路計画に関する検討は十分でない．

Guerrero ら [53] は，風の影響を考慮したインフラ設備点検用 UAV の経路計画法を提案した．風力が線形変化する環境において，UAV が対象設備を最短で点検するための経路を計画可能とした．この手法ではまず，対象のメッシュデータから点検のためのウェイポイントを導出する．次に，最短時間で点検するためのウェイポイント巡回順の最適化を巡回セールスマン問題（TSP）と見立てて解く．しかし，ウェイポイントに関して，対象設備のメッシュデータが得られれば入手可能としており，収集データの精度に対する言及がされていない．収集データの精度を確保するためにはメッシュデータ作成の段階で何らかの対処が必要であり，この手法のみでは前節の要件を十分に考慮できないと考えられる．

瀬戸口ら [54] は，UAV による災害現場撮影のための経路計画法を提案した．UAV に搭載されたレーザースキャナで対象構造物の形状を把握し，経路をオンラインで計画・更新する．この手法においても，撮影のためのウェイポイントを導出したのち，最短時間でウェイポイントを巡回する順番を決定するという手順を踏んでいる．最終的には，UAV のバッテリー残量の許す限り構造物のできるだけ多くの表面領域を

撮影可能であり、また、UAV と構造物の衝突も回避可能な経路が計画される。この手法では、オンラインで経路計画を行うにあたり、計算の高速化のために空間を3次元的に任意の幅のグリッドで分割している。これにより、対象形状は直方体の集合で構成され、ウェイポイントはグリッド上にしか定義できない。そのため、実際に撮影される面は経路計画における撮影面から最大でグリッド幅だけ遠くなり、撮影される画像データの精度にばらつきが生じる。画像の精度を確保するための対処としてグリッド幅の縮小があるが、空間が複雑となって計算時間が増大し、最終的な経路も複雑化すると考えられる。対象形状が既知でありオフラインで経路計画する場合には計算時間は問題とならないが、実際の撮影の効率が低下する。また、直方体の撮影のために撮影方向が6方向に限定され、実際の表面が斜めから撮影される場合がある。これによって対象表面の特徴が画像上では小さくなり、結果的に精度の低い画像が撮影される。そもそも、この手法の目的は災害現場の迅速な撮影であり、インフラ設備点検と類似した問題ではあるが収集データの精度よりも作業スピードが重視される。したがって、この手法はインフラ設備点検には適当と言えない。

以上より、インフラ設備点検における高精度なデータ収集というタスクに対して、既存手法では要求を十分に満たせないと考えられる。本研究はこの問題の解決を目的とし、新たな経路計画法の確立に取り組む。

1.4 本研究の目的

UAV を用いたインフラ設備自動点検システム実現を目指すにあたり、本研究の目的を UAV の経路計画と定める。その後、本研究でとる経路計画アプローチを説明する。

1.4.1 研究目的

橋梁等の立体形状を持つインフラ設備の点検作業を代替可能な、UAV を用いたインフラ設備自動点検システムの実現を本研究の目的とする。システムの中でも、データ収集のための UAV の経路計画法を検討する。

想定する点検作業は簡易的な定期点検とし、事前に作成された定期点検計画に基づいて実施されるものとする。UAV が達成すべきタスクは、人間による点検作業の代替を想定し、対象設備の指定された全領域のデータを収集することとする。前節で述べた経路計画の要件に関して、本研究では絶対に充足すべき「対象設備全領域の計測」、「一定以上の精度での計測」および「対象設備と UAV の衝突の回避」に加えて、できれば充足すべき「短時間でのタスク達成」を充足する経路計画法を検討する。「バッテリー残量の管理」、「UAV の飛行特性の考慮」も充足すべきであるが、こ

れらは従来研究 [53, 54] にて充足可能である．本研究では計測タスクの達成を重視し，取り組む課題を限定して検討を進める．以上の前提を基に，従来手法では十分に考慮されなかった，高精度なデータ収集を可能とする UAV の経路計画法を検討する．

1.4.2 本研究でのアプローチ

経路計画は計測タスクの開始前にオフラインで行うものとする．オフラインで経路を計画する場合，解の精度が高くなる代わりに計算時間が長くなる．計測タスクでは高精度なデータを求められる点，定期点検においては準備を入念に行えるという点から，本研究ではオフラインの経路計画を選択する．これに付随し，対象設備の形状や周囲の環境といった情報は事前に得られるとし，事前情報から系統的に経路計画する手法を検討する．また，UAV は理想的に飛行可能とし，飛行中の環境の変化も考慮しない．ただし，実環境において UAV の定位性能や環境の変化は無視できないため，実運用の際にはオンラインで経路を修正して対処するものとする．

構造物外観計測用 UAV の経路計画のための従来研究 [53, 54] では，データ収集のために UAV が到達すべきウェイポイントを導出し，導出された全ウェイポイントの巡回順を決定するといった手順で経路を計画する．これらの手法では暗に，構造物外観計測というタスクが目的地巡回タスクとデータ収集タスクに分離して考えられている．本研究でもこの知見を利用し，対象設備からデータを所望の精度で効率的に収集するためのウェイポイント導出を検討する．

対象設備からデータを収集するタスクは，対象設備と UAV に搭載されたセンサの位置合わせ作業とみなせる．例えば，画像データは対象設備表面からある距離・角度でカメラを向けてシャッターを押すことで得られる．打音データはハンマーを用いて対象設備表面をある距離・角度から打撃し，その際の打撃音をマイクで集音することで得られる．一定以上の精度でデータ収集するためには，特定の距離・角度でセンサを位置合わせする必要がある．以上から，UAV が対象設備表面に対して一定の位置関係を保ちながら飛行することを想定して経路を計画する．

次章以降に示すように，本研究では初期段階として，取り扱うインフラ設備点検を限定して経路計画問題を検討する．一方，研究の展望として，特定のインフラ設備点検のみでなく幅広いインフラ設備点検や，インフラ設備点検以外の作業を代替するロボットの経路計画を考えている．前述のとおり，点検作業における収集データは様々な種類のものが存在する．最終的には，収集データに関する事前情報が与えられれば，各種データの収集に最適化された経路を計画できる手法を目指す．また，計測タスクは立体構造物表面を網羅するタスクとみなせ，これは測量，塗装，清掃といったタスクと類似する．そのため，経路計画への要求も類似しており，本研

究の発展としてこれらタスクへの応用も考えられる。

1.5 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章では、UAVの利用とそのための経路計画の重要性を示した。これまで主流であった経路計画法は、インフラ設備点検のような構造物の計測を目的とした作業に直接は適用できなかった。構造物計測のための経路計画の既存法では収集データの精度が十分に考慮されておらず、点検作業の遂行には不十分であった。以上を受けて、インフラ設備自動点検システムのためのUAVの経路計画を本研究の目的とした。

第2章では、本研究で想定するインフラ設備点検について説明し、経路計画に必要な条件を設定する。対象設備・収集データ等が多岐にわたるインフラ設備点検に対して、本研究で取り扱うべき問題を「目視点検を代替するためのUAVの経路計画」に具体化する。その後、経路計画に必要な事前情報（対象設備の3Dモデル、収集すべき画像データの要求精度、機器の性能・制約）を定め、解くべき問題を「3Dモデルの全構成要素を計測するためのUAVの経路計画」とみなす。

第3章では、第2章の問題設定および経路計画方針の妥当性を評価する。収集すべき画像データの要求精度、機器の性能・制約から、必要最低限の精度で画像データを収集可能な最大の範囲（計測範囲）を設定し、3Dモデルの各構成要素を計測範囲に収めることで所望の精度の画像データを収集できるとみなす。以上の方針を基に、収集データの精度を考慮した基礎的な経路計画法を提案し、シミュレーションにて有効性を検証する。

第4章では、第3章で検討した方針に基づき、収集データと作業効率を両立した経路計画法を提案する。基礎的な経路計画アルゴリズムでは考慮されなかった作業効率を確保するために、3Dモデルを再構成することを考える。クラスタリング法を用いて3Dモデルの構成要素を計測範囲に収まる形状に再構成した後に経路計画を行い、シミュレーションにて有効性を検証する。

第5章では、本研究における社会実装に向けたこれまでの取り組みを述べる。社会実装とは、「RISTEXの「社会技術」の概念の議論から生まれた言葉であると言われる。」（茅・奥和田，2015，p. 112）。RISTEX（社会技術研究開発センター）は、社会技術を「自然科学と人文・社会科学の複数領域の知見を統合して新たな社会システムを構築していくための技術」（社会技術の研究開発の進め方に関する研究会，2000）と定義し、この定義に基づき、研究・開発・実証・普及を一貫して行い、研究開発成果を人や社会に活用するための実装支援プログラム [55] を提供している。本研究では、社会実装を、提案手法を実在する対象設備に適用し、計画された経路

に沿って UAV が実環境を飛行することで計測タスクを達成することとする．社会実装のためには，大規模設備に対しても手法を適用できること，実環境において所望の計測タスクを達成できることを明確にする必要がある．そこで，上記の課題に対する検証実験を計画・実施する．大規模な対象設備への手法の適用に向けて，3D モデルの規模と手法の計算量の関係を検討する．実環境でのタスク達成に向けて，第 3, 4 章では理想化されていた「センシング」, 「自己位置推定」および「機体制御」を考慮した検証実験を計画・実施する．さらに，今後の実験計画・展望を述べる．最後に，第 6 章において本研究のまとめおよび今後の課題について述べる．

第2章

問題設定

本章では，本研究における具体的な問題設定を述べる．

2.1 本研究における自動点検システムと経路計画

実際のインフラ設備点検において想定される作業は多岐にわたり，点検システムにおける経路計画問題を一般的に解くことは困難である．本研究では，対象設備外観を撮影した画像データから異常の有無を検出する近接目視点検作業を取り扱う．カメラを搭載した UAV により，対象設備外観全体の画像データを所望の精度で収集するための経路を計画する問題を解く．以上の前提の下で，経路計画問題を解くために必要な事前情報について検討する．

2.1.1 本研究で取り扱うインフラ設備点検

第1章にて，本研究にて取り組む問題を，点検作業における計測タスクを代替する UAV の経路計画問題と定めた．一方，一口に計測タスクといってもその内容は多岐にわたる．例えば，データ収集の対象となるのは，橋梁，トンネル，ダムといったインフラ設備であり，それぞれの中でも設備ごとに異なる立体形状を持つ．また，検出すべき異常も，コンクリート表面のひび，剥離，漏水，コンクリート内部の空洞，鉄骨の腐食，設備全体の変形と多様である．さらに，これら異常の検出のために，画像，打音，距離等の様々なデータを収集する必要がある．このような多様なタスクすべてを一般的に解くことは困難である．最終的にはあらゆるタスクに対して問題を検討すべきだが，本研究では特に重要と考えられるタスクに関して検討する．

前提として，対象設備は UAV によるデータ収集が可能である地上・水面上に存在するインフラ設備とする．また，実環境においては対象設備以外にも様々な障害物

が存在するが、問題の簡単化のために、経路計画において環境中には UAV と対象設備のみ存在するものとする。

まず、本研究で取り扱うインフラ設備点検について議論する。国土交通省が作成した道路橋定期点検要領 [14] には、「健全性の診断の根拠となる状態の把握は、近接目視により行うことを基本とする。」と記載されている。図 2.1 は、名古屋大学構内の土木系研修施設である N2U-BRIDGE 内の劣化サンプルの一例を示す。N2U-BRIDGE は撤去された橋梁の部材を再構築した実橋モデルである。図 2.1 に見られるように、目視によってひび、さびといった異常を検出できる。これらの異常を放置すると、設備の劣化が進行し、重大な事故の原因となり得る。そのため、定期点検において近接目視は単純ながらも重要な作業であり、本研究でもこれに従って問題設定をする。点検作業は近接目視点検、UAV が代替する計測タスクは対象設備表面のひび、剥離、漏水、さび等の異常を検出するためのデータを収集するタスクとする。

次に、近接目視点検のために収集すべきデータについて検討する。対象設備表面の異常は、画像や動画といったデータから検出できる [18, 19]。一方、移動しながら撮影した画像や動画には、UAV の速度とカメラの露光時間に起因してブレが発生する。ブレによって画像中の特徴が不鮮明になり、要求される精度を保持したとしても所望のサイズの異常を検出できない恐れがある。従って、本研究では UAV は静止した状態で画像データを収集するものとする。

以上より、本研究では UAV を用いた近接目視による対象設備表面の異常検出を代替するシステムの確立を目指す。このシステムでは、対象設備全表面領域の一定以上の精度の画像データを UAV によって収集し、収集した画像データから対象設備に生じた異常を検出する。システム実現のために、本研究では対象設備の全表面領域の画像データを一定以上の精度で収集するための UAV の経路計画問題を解く。

2.1.2 経路計画に必要な事前情報の検討

データ収集のための経路計画においては、対象設備、収集データ、使用機器に関する事前情報が必要となる。前述した計測タスクの具体化を基に、経路計画問題を解くための事前情報について検討する。収集データに関しては前述のとおり一定精度以上の画像データであり、この前提からデータ収集機器は UAV に搭載可能なカメラとなる。また、対象設備に関して、撮影すべき領域として表面形状を把握する必要がある。以上の前提から、対象設備の表面形状をどのように把握するか、何を基準として画像データの要求精度を決定するか、UAV・カメラにはどのような性能が求められるか検討する。

対象設備の表面形状



(a) コンクリート表面のひび



(b) 金属のさび

図 2.1. インフラ設備表面に生じる異常の例

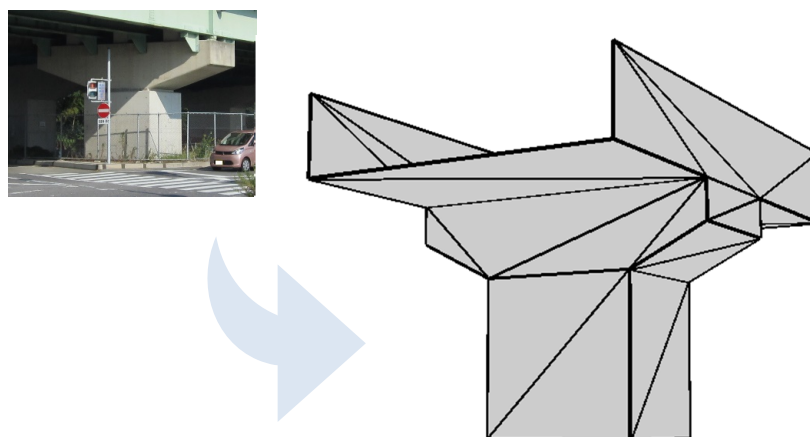


図 2.2. StL ファイル

対象設備の表面形状は 3D モデルを利用して把握可能とする。土木の分野では、これまで 2D の図面を用いて設計、施工が進められてきたが、昨今の CAD 技術の発達・浸透に伴い、新しい設備は設計段階で 3D モデルが存在することも多い。また、従来利用されてきた 2D の図面から 3D モデルを作成する技術が開発され、図面さえあれば 3D モデルを入手可能となった。さらに、図面の存在しない設備においても、レーザ距離計を用いて設備を計測することで 3D モデルを作成する技術 [56] が開発されたため、3D モデルを入手可能である。以上の背景から、本研究ではあらゆる設備の 3D モデルを入手可能と考える。

3D モデルには様々な形式のものが存在するが、本研究では Stereo Lithography（以降、StL）形式 [57] のファイルを用いて検討を進めてきた。このファイルは多くのソフトウェアでサポートされており、3D モデルの中で最も入手が容易と考えられるためである。図 2.2 は、実在する橋梁の一部を模した StL ファイルの例を示す。図 2.2 のように、StL ファイルは多数の三角形ポリゴンで構成されている。各ポリゴンは立体構造物の平面を表現しており、曲面も多数の微小ポリゴンで近似している。

画像データの要求精度

画像データの要求精度は、検出すべき異常と使用する異常検出技術に基づいて決定する。検出すべき異常の例として、幅 0.2mm のひびという基準が多くの資料 [14,58] で取り上げられている。また、画像データからひびを検出する技術において、小山ら [18] の手法では、1 画素あたりの実サイズが検出すべきひび割れ幅の 3.5～5 倍である画像データを必要とする。これに従うと、1 画素あたりの実サイズは 0.7～1mm と定まる。他の異常に関してもこれらの情報を基

に決定できる。

機器の性能・制約

計測のための機器をカメラと UAV に分けて考える。

前述のような精度で画像データを収集するためのカメラについて検討する。昨今の技術の発達に伴い、UAV に搭載可能なサイズの一眼レフカメラで数千万画素の画像を撮影できるようになった。これを受けて、用いるカメラは一般的な一眼レフカメラとする。カメラに関して、焦点距離、受光部のサイズ、ピクセル数といった性能を事前に把握しておく。これらの情報から、撮影対象-カメラ間の距離と撮影可能な範囲の関係、また、その時撮影された画像データの精度が把握可能となる。

UAV は、旅客機のような固定翼型、ヘリコプターのような回転翼型の機体に大きく分類され、それぞれの中でも様々な機構の機体が存在する。前述のとおり、UAV は静止して画像データを収集するものとした。固定翼機は前進することで揚力を発生させるため、ホバリングは不可能である。シングルロータ型の機体はホバリング可能であるものの、メインローターの回転面を傾けて加速度を操作する機構から機敏な動作が困難である。以上より、本研究では図 2.3 に示すような 4 枚以上のプロペラを搭載したマルチロータ型の機体を対象とする。マルチロータ型 UAV は、ホバリングが可能な点、機敏な動作が可能な点から、本研究の要件に適している。また、広範囲の移動を想定するため、外部からの有線給電は行わないものとする。

UAV の機構とカメラの搭載について検討する。マルチロータ型の機体は、各ロータの回転差によって機体の姿勢 $[\phi, \theta, \psi]$ を変化させ、機体に働く外力と推進力の合力方向に加速度を発生させる。この加速度を操作して、絶対座標系における機体の位置 $[x, y, z]$ を制御する。この特徴から、機体の位置・姿勢を同時に所望の値に保持することは困難であり、重力と推進力のつり合いを考慮すると保持は不可能な姿勢が存在する。そのため、カメラが UAV に対して完全に固定されている場合は撮影不可能な領域が存在する。以上より、本研究ではカメラは回転台を介して複数台取り付けられるものとする。この条件によって、UAV の姿勢によらずカメラを任意の方向に向けることができる（図 2.4）。

2.2 本研究における経路計画の方針

前節での問題設定・事前情報を基に、本研究における経路計画の方針について検討する。第 1 章で述べたとおり、本研究では従来研究 [53, 54] を参考に計測タスクを



図 2.3. マルチロータ型 UAV : DJI S1000+

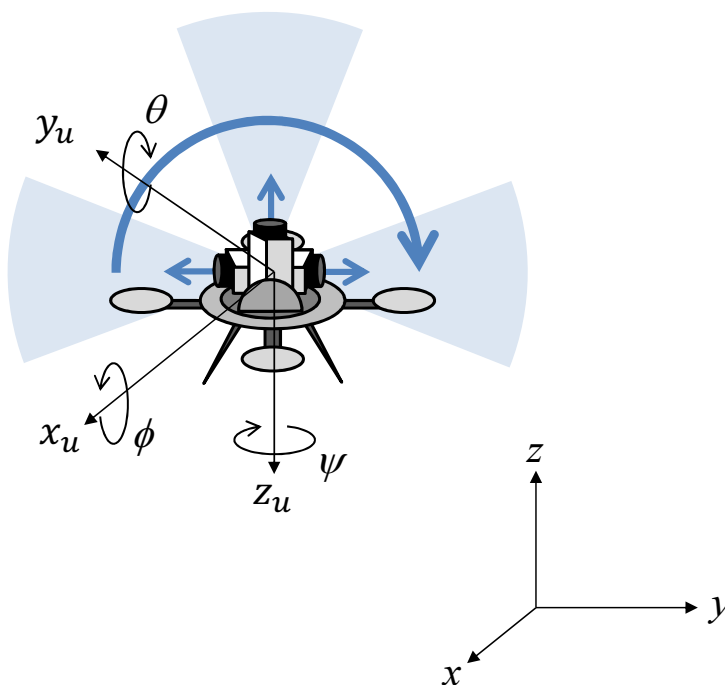


図 2.4. UAV の姿勢とカメラの方向

ウェイポイントの巡回に落とし込んで考える．これにより，経路計画問題を，対象設備外観の画像データを収集するために UAV が到達すべきウェイポイントを導出し，導出された全計測位置の巡回順を決定する問題とみなせる．一方，従来研究では対象設備表面と UAV の位置関係が厳密に考慮されておらず，所望の精度でデータを収集することが困難であった．以降では，この問題を解消するための経路計画方針について述べる．

2.2.1 計測位置の導出

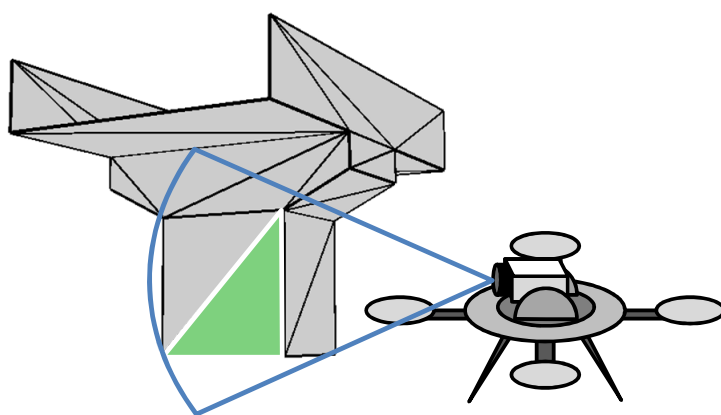
インフラ設備点検の対象となる設備は複雑な形状を持ち，特定の表面領域と UAV との位置関係を定義することは困難である．本研究では，StL ファイルとカメラの性能から位置関係を定義する．

StL ファイルは多数の三角形ポリゴンで構成され，各ポリゴンは対象設備表面の小領域を表現する．そのため，図 2.5 に示すように，あるポリゴンを仮想的に計測するように UAV が飛行すれば，実際の対象設備においてポリゴンと対応する小領域を計測できると考えられる．各ポリゴンは 3 頂点と法線の情報を持ち，これらの情報からポリゴンの位置・形状・表裏を把握できる．また，カメラの焦点距離，受光部のサイズ，ピクセル数といった情報から，ある位置から撮影可能な範囲と画像データの精度を把握できる．これらの幾何的情報と画像データの要求精度から，計測タスクを，あるポリゴンで表現される小領域を所望の精度で計測するためにカメラを特定の位置から特定の方向に向けるタスクと見なせる．以上の前提から，StL ファイルを構成する各ポリゴンに対して，計測のために UAV が到達すべきウェイポイントを導出する．以降，このようなウェイポイントを計測位置と呼ぶ．導出された全計測位置に到達することで，対象設備の全表面領域の画像データを所望の精度で収集できる．

2.2.2 計測位置巡回順の決定

前述の計測位置によって，計測タスクは計測位置を巡回するタスクと見なされる．つまり，経路計画問題を，「2 点間の移動経路の生成」，「複数目的地の巡回順決定」問題として解くことができる．対象設備と UAV の衝突を回避するように計測位置間の移動経路の生成し，短時間での全領域の計測を考慮して計測位置の巡回順を決定する．以上より，「対象設備全領域の計測」，「一定以上の精度での計測」，「対象設備と UAV の衝突の回避」および「短時間でのタスク達成」を充足する経路を計画できる．

Virtual



Actual

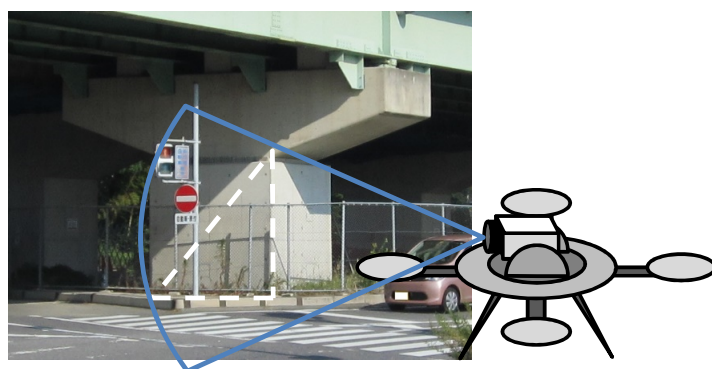


図 2.5. 仮想的な計測と実環境での計測

本章では，経路計画の前提，事前情報および方針について述べた．これらを基に，次章以降でタスク達成やその他の要件を充足する経路計画法を検討する．まず，第3章では，「対象設備全領域の計測」，「一定以上の精度での計測」および「対象設備と UAV の衝突の回避」を充足する基礎的な経路計画法の提案・適用によって，前述の方針の妥当性を評価する．

第3章

経路計画方針の妥当性評価

本章では，第2章の問題設定と経路計画方針の妥当性を評価するために，基礎的な経路計画法を提案する．事前情報から，対象設備全表面領域を一定以上の精度で計測するための計測位置群を導出し，対象設備と UAV の衝突を回避するように計測位置群の巡回順を決定する．その後，シミュレーション実験にて手法の有効性を確認する．

3.1 計測タスクへの要件と経路計画

経路計画法の提案にあたり，計測タスク達成のための経路への要件について検討する．第1章で，計測タスクにおいて絶対に充足すべき要件として「対象設備全表面領域の計測」，「一定以上の精度での計測」，「対象設備と UAV の衝突の回避」，できれば充足すべき要件として「短時間でのタスク達成」，「バッテリー残量の管理」，「UAV の飛行特性の考慮」を挙げた．第1，2章で述べたとおり，対象設備の健全度を評価するためには，対象設備の全領域に関して異常の数・程度を把握する必要がある．また，対象設備や UAV の保全のために，これらの衝突は回避すべきである．そのため，対象設備全表面領域の計測，一定以上の精度での計測および対象設備と UAV の衝突の回避は他の要件よりも優先して充足されなければならない．そこで，経路計画方針の妥当性評価のために，まずは上記の3要件を充足する経路計画法を提案する．

加えて，UAV の定位性能も経路計画段階で考慮されるべきである．UAV の自律移動に関する要素技術（図1.4）の性能を事前に把握できれば，実機においてタスクを達成可能な経路を計画できる可能性がある．本章では初期検討として，「センシング」，「自己位置推定」および「機体制御」は理想化し，UAV は経路に誤差なく追従できると仮定する．

3.2 計測位置導出法

「対象設備全表面領域の計測」, 「一定以上の精度での計測」を充足する計測位置導出法を検討する. 計測位置導出問題を解くための計測に関する制約条件を明確にし, 問題を定式化する. カメラの性能と画像データの要求精度から, 所望の精度で計測するために維持すべき計測対象表面-カメラ間の距離と, その時有効な画像データを収集可能な範囲を明確化する. 明確化された制約条件に従って, 各ポリゴンに対する計測位置導出問題を定式化する. また, 計測位置導出の際に発生する問題を議論し, 基礎的な解決策を提案する.

3.2.1 計測条件の定式化

第2章にて、カメラの焦点距離, 受光部のサイズ, ピクセル数から, 撮影対象-カメラ間の距離と撮影される範囲の関係, その時撮影された画像データの精度を把握可能と述べた. ここでは, 上記の関係をより詳細に議論する. 前提として, 撮影対象領域は平面であり, カメラは平面と対向して撮影するものとする. 一眼レフカメラにおいては, 対象-レンズ間の距離とレンズ-受光部間の距離はレンズの公式に従う. レンズの焦点距離を F , 撮影対象からレンズまでの距離を D , レンズから受光部までの距離を B とすると, 次の式 (3.1) が成り立つ.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{D} + \frac{1}{B} \quad (3.1)$$

また, 撮影対象の大きさを S_D , 受光部に投影される像の大きさを S_B とすると, 次の式 (3.2) が成り立つ.

$$S_D : S_B = D : B \quad (3.2)$$

一般的なカメラと撮影条件においては D が B , F に対して十分大きく, $B \approx F$ とできるため, 次の式 (3.3) が成り立つ.

$$S_D : S_B = D : F \quad (3.3)$$

カメラの受光部を横 L_h , 縦 L_v の長方形 (ただし, $L_h \geq L_v$), 画像データの画素数を横 P_h , 縦 P_v (ただし, $P_h \geq P_v$) とする. なお, 以降の検討は $L_h : L_v = P_h : P_v$ が成り立つ前提で進める. 式 (3.3) より, 撮影可能な最大の範囲は横 $\frac{D}{F} \times L_h$, 縦 $\frac{D}{F} \times L_v$ の長方形領域, 1 画素あたりの実際に撮影される範囲は 1 辺の長さ S_{pxl} が式 (3.4) から求められる正方形領域である.

$$S_{\text{pxl}} = \frac{DL_v}{FP_v} \quad (3.4)$$

以降, S_{pxl} を1画素あたりの実サイズと呼ぶ. 一般的に, F , L_v および P_v は固定値であり, S_{pxl} は D に依存する. そのため, S_{pxl} を特定の値に保つためには, D は式 (3.5) を満たす必要がある.

$$D = \frac{S_{\text{pxl}} F P_v}{L_v} \quad (3.5)$$

平面と対向して一定の距離 D から撮影することで, 1画素あたりの実サイズ, つまり画像の精度が保たれる.

ここで, レンズの歪みの影響を考える. 撮影された画像データは, レンズの影響を受けて画像中心から端に向かって同心円状に大きくなる歪みを持つ. この歪みは画像解析結果に影響を及ぼし, 異常検出が正しく行われたい恐れがある. 各種画像編集ツールを用いて歪みを補正することはできるが, 本研究では画像データから異常検出に有効な円形の領域を抜き出すというアプローチを採る. 画像データの中心から, 最大で半径 r_{cmax} (式 (3.6) より導出) の円領域を抜き出せる.

$$r_{\text{cmax}} = \frac{D L_v}{2F} \quad (3.6)$$

上記領域のうち, 許容可能なサイズの歪みを含む領域を抜き出す係数 c_d (ただし, $0 < c_d \leq 1$) を設定する. 以上より, 画像中心から半径 r_c (式 (3.7) より導出) の円領域を異常検出に有効なデータと定義する.

$$r_c = \frac{D L_v}{2F} \times c_d \quad (3.7)$$

以降, D を計測距離, 中心 c_c , 半径 r_c の円領域を計測範囲と呼ぶ (図 3.1). 画像データに要求される1画素あたりの実サイズが与えられれば, D は式 (3.5) から求められる. 計測時には, UAV は対象設備表面-レンズ間の距離を D に保つ必要がある. また, この時計測範囲と一致する円領域に対して有効な画像データが収集されることとなる.

3.2.2 計測位置導出問題の定式化

前述のとおり明確化された計測条件を基に, 計測位置導出問題を定式化する. あるポリゴンで表現される小領域に対する計測位置を p とおく. なお, 実機では一般に UAV の中心とレンズの中心は一致しない. そのため, p は, 計測のためにレンズが到達すべき位置から UAV・カメラの機構を考慮してオフセットされる必要がある. 本研究では, UAV・カメラ共に大きさを持たず, レンズが到達すべき位置と p は一致するものとみなす.

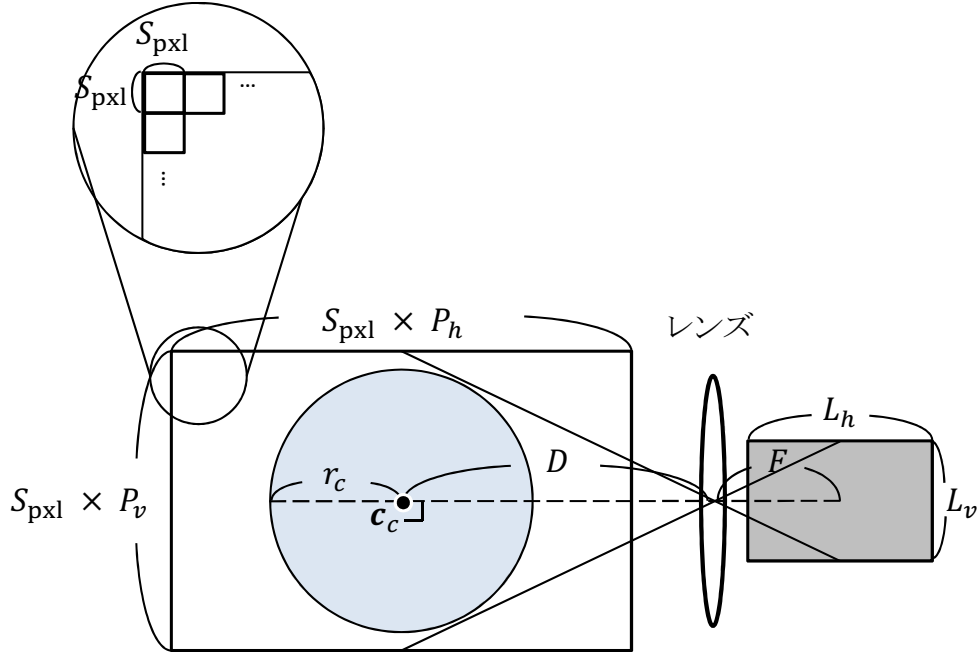


図 3.1. カメラのパラメータと計測範囲の定義

あるポリゴン t の 3 頂点をそれぞれ $v_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $v_2 = (x_2, y_2, z_2)$, $v_3 = (x_3, y_3, z_3)$, 法線を \mathbf{n} とおく. t に対して自身を内包する最小の円 (中心 \mathbf{c}_t , 半径 r_t) を定義する. t が鋭角三角形の場合は外接円, 直角・鈍角三角形の場合は長辺を直径, 長辺の中点を中心とする円となる. ここで, t と計測範囲の位置関係を考える. \mathbf{c}_c と \mathbf{c}_t を一致させることで, t のうち広い領域を計測範囲のレンズ歪みの影響が少ない領域に収められる. また, \mathbf{c}_c からレンズ中心へ向かうベクトルと \mathbf{n} を一致させることで, t と対向して撮影できる. 以上より, \mathbf{p} を式 (3.8) で導出する (図 3.2).

$$\mathbf{p} = \mathbf{c}_t + D\mathbf{n} \quad (3.8)$$

式 (3.8) により, t と対向して一定距離 D から計測するための \mathbf{p} が求められる.

3.2.3 計測位置導出のための 3D モデルの再構成

式 (3.8) で計測位置を導出する際に生じる問題について議論する. 図 3.3 に, 計測位置導出に際して起こり得る問題の例を示す. StL ファイルのポリゴンは, 立体形状を表現するために様々な大きさ・形状を持つ. あるポリゴン t に関して $r_t > r_c$ である場合, t は計測範囲に収まらず, 計測が保証されない領域が発生する (図 3.3(a)). また, r_t が r_c に対して非常に小さい場合, 単位面積あたりに導出される計測位置が

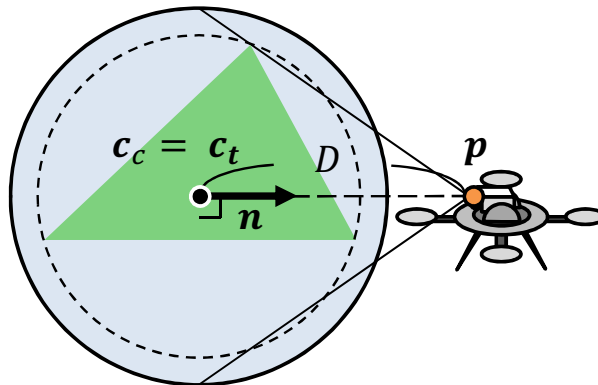


図 3.2. あるポリゴンに対する計測位置の導出

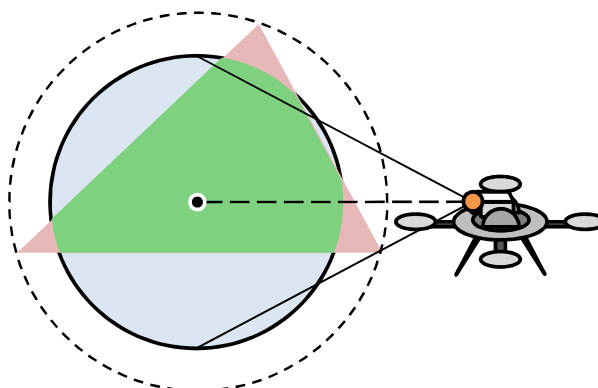
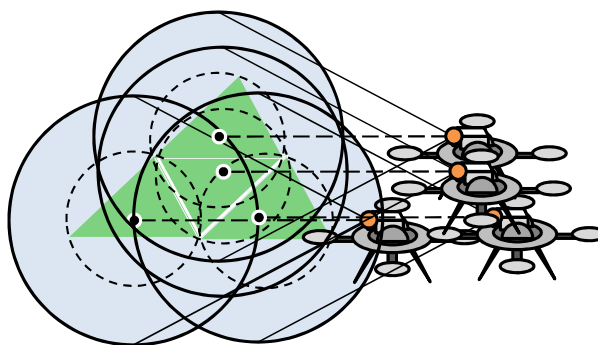
(a) $r_t > r_c$ (b) $r_t \ll r_c$

図 3.3. 再構成が必要なポリゴンの例

多くなる（図3.3(b)）．対象表面全領域の計測という点では問題ないが，作業時間が長くなる，収集される画像データが必要以上に多くなり異常検出やその後のデータ管理の負担が増えるといった問題が発生する．

上記の問題を解消するため，計測範囲に合わせてポリゴンを再構成することを考える．再構成の手段として，計測範囲に収まらないポリゴンの分割，計測範囲に対して小さなポリゴン群の統合が挙げられる．本章においては，対象表面全領域の計測を保証するための基礎的な手法として，ポリゴンの分割について検討する．図3.4にポリゴン分割アルゴリズムのイメージを示す．アルゴリズム内では， $r_t > r_c$ となるポリゴンを，長辺の中点と対頂角を結ぶ線分で分割する．この処理を，分割後のポリゴンが $r_t \leq r_c$ を満たすまで再帰的に繰り返す．

以下，具体的なアルゴリズムを説明する．準備として，分割の必要があるポリゴンを記憶する空の配列 \mathbf{T}_{prc} と，分割の必要がないポリゴンを記憶する空の配列 \mathbf{T}_{div} ，計測範囲と比較すべきポリゴンを記憶する空の配列 \mathbf{T}_{cmp} を用意する． \mathbf{T}_{cmp} 内のポリゴンの枚数を $n = 0$ ， \mathbf{T}_{prc} 内のポリゴンの枚数を $m = 0$ とおく．StL ファイルを構成する全ポリゴン \mathbf{T} を \mathbf{T}_{cmp} に記憶し， n を更新する．

1. \mathbf{T}_{cmp} 内の各ポリゴン $t_{\text{cmp}i} (i = 1, 2, \dots, n)$ に関して， $r_{t_{\text{cmp}i}}$ と r_c を比較する． $t_{\text{cmp}i}$ を， $r_{t_{\text{cmp}i}} \leq r_c$ であれば \mathbf{T}_{div} に， $r_{t_{\text{cmp}i}} > r_c$ であれば \mathbf{T}_{prc} に記憶する．
2. m を更新し， $m = 0$ ならばアルゴリズムを終了する．そうでなければ， \mathbf{T}_{cmp} 内の全ポリゴンを削除し， $j = 1$ として3. へ進む．
3. \mathbf{T}_{prc} 内のポリゴン $t_{\text{prc}j}$ に関して，3 辺の長さ $l_1 = |\mathbf{v}_{j_2} - \mathbf{v}_{j_1}|$ ， $l_2 = |\mathbf{v}_{j_3} - \mathbf{v}_{j_2}|$ ， $l_3 = |\mathbf{v}_{j_1} - \mathbf{v}_{j_3}|$ を算出する．
4. 2 枚のポリゴン t_A ， t_B を生成する． t_A の3 頂点 \mathbf{v}_{A1} ， \mathbf{v}_{A2} ， \mathbf{v}_{A3} と t_B の3 頂点 \mathbf{v}_{B1} ， \mathbf{v}_{B2} ， \mathbf{v}_{B3} は表3.1に示す値，法線 \mathbf{n}_A ， \mathbf{n}_B は両者共に $t_{\text{prc}j}$ の法線 $\mathbf{n}_{\text{prc}j}$ と同値する．その後， t_A ， t_B を \mathbf{T}_{cmp} に記憶する．
5. $j = m$ ならば， \mathbf{T}_{prc} 内の全ポリゴンを削除して1. へ戻る．そうでなければ， $j = j + 1$ として3. へ戻る．

アルゴリズム終了後， \mathbf{T}_{div} に記憶された各ポリゴン t に対し，式(3.8)を用いて計測位置 \mathbf{p} を導出する． \mathbf{T}_{div} に記憶された t はいずれも $r_t < r_c$ を満たすため，UAV が \mathbf{p} に到達することで対応する t で表現される小領域を計測範囲内に収められ，全ての \mathbf{p} を巡回することで対象設備全表面領域を所望の精度で計測できる．

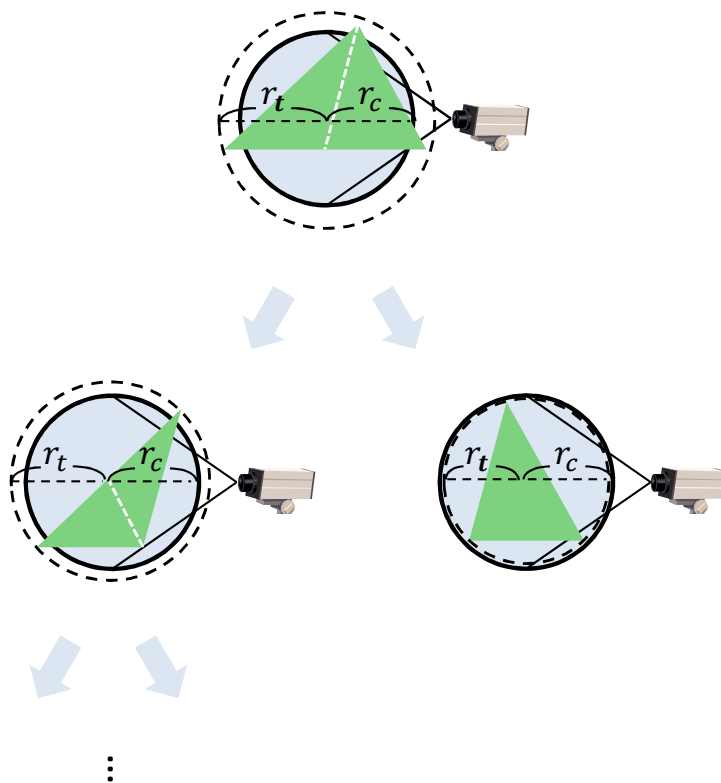


図 3.4. ポリゴン分割のイメージ

表 3.1. l_1, l_2, l_3 の大小関係と t_A, t_B の 3 頂点

IF	\mathbf{v}_{A1}	\mathbf{v}_{A2}	\mathbf{v}_{A3}	\mathbf{v}_{B1}	\mathbf{v}_{B2}	\mathbf{v}_{B3}
$l_1 \geq l_2$ and $l_1 \geq l_3$	\mathbf{v}_{j_1}	$\frac{\mathbf{v}_{j_1} + \mathbf{v}_{j_2}}{2}$	\mathbf{v}_{j_3}	$\frac{\mathbf{v}_{j_1} + \mathbf{v}_{j_2}}{2}$	\mathbf{v}_{j_2}	\mathbf{v}_{j_3}
$l_2 > l_1$ and $l_2 \geq l_3$	\mathbf{v}_{j_1}	\mathbf{v}_{j_2}	$\frac{\mathbf{v}_{j_2} + \mathbf{v}_{j_3}}{2}$	\mathbf{v}_{j_1}	$\frac{\mathbf{v}_{j_2} + \mathbf{v}_{j_3}}{2}$	\mathbf{v}_{j_3}
$l_3 > l_1$ and $l_3 > l_2$	$\frac{\mathbf{v}_{j_3} + \mathbf{v}_{j_1}}{2}$	\mathbf{v}_{j_2}	\mathbf{v}_{j_3}	\mathbf{v}_{j_1}	\mathbf{v}_{j_2}	$\frac{\mathbf{v}_{j_3} + \mathbf{v}_{j_1}}{2}$

3.3 計測位置巡回順決定法

前節にて導出された計測位置群の巡回順の決定法を検討する．第1, 2章で述べたように，この問題は TSP と呼ばれる．TSP では，事前に定義した移動コストを最小化するように目的地の巡回順を決定する．本研究では，UAV と対象設備が衝突せず，なおかつ総作業時間が短くなるような経路の計画を目標とする．そこで，上記の要求を反映するような計測位置間の移動およびその際の移動コストを定義し，その上で巡回順を決定する．

3.3.1 計測位置間の移動

計測位置巡回順決定問題を解くにあたり，あらゆる2計測位置の組み合わせに関して移動コストを定義，算出する．前提として，計測タスクの総作業時間を短くするために，UAV は計測位置間を最短経路で，一定速度 v で飛行すると仮定する．

始点 $\mathbf{p}_{\text{start}}$ から終点 \mathbf{p}_{goal} へ移動するための部分経路の生成法を検討する．まず， $\mathbf{p}_{\text{start}}-\mathbf{p}_{\text{goal}}$ 間に対象設備が存在するかどうかを判定する．判定法としてレイ・トレーシング法 [59] を用いる． $\mathbf{p}_{\text{start}}$ と \mathbf{p}_{goal} を結ぶ線分と StL ファイルを構成する各ポリゴンとの交差を判定する．線分と交差するポリゴンが1枚も存在しない場合は A. に，1枚でも存在する場合は B. に進んで部分経路を生成する．

A. 計測位置間に対象設備が存在しない場合

計測位置間に対象設備が存在しない場合，UAV は計測位置間を結ぶ線分上を飛行する．そのため，部分経路を，式 (3.9) で定義される， $\mathbf{p}_{\text{start}}$ ， \mathbf{p}_{goal} を頂点とした有向グラフ $\mathbf{P}_{\text{s-g}}$ として記憶する．

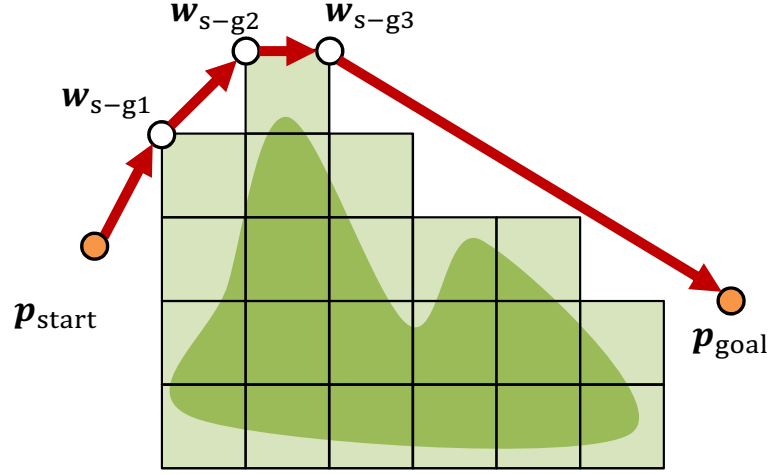
$$\mathbf{P}_{\text{s-g}} = (\{\mathbf{p}_{\text{start}}, \mathbf{p}_{\text{goal}}\}, \{\{\mathbf{p}_{\text{start}}, \mathbf{p}_{\text{goal}}\}\}) \quad (3.9)$$

また， $\mathbf{P}_{\text{s-g}}$ の飛行に要する時間 $t_{\mathbf{P}_{\text{s-g}}}$ を式 (3.10) で求める．

$$t_{\mathbf{P}_{\text{s-g}}} = \frac{|\mathbf{p}_{\text{goal}} - \mathbf{p}_{\text{start}}|}{v} \quad (3.10)$$

B. 計測位置間に対象設備が存在する場合

計測位置間に対象設備が存在する場合，対象設備との衝突を回避するための部分経路を生成する必要がある．第1章で述べたとおり，この問題に関しては多くの既存研究が存在する．本論文では，瀬戸口ら [54] の知見を利用して衝突回避用部分経路を生成する（図 3.5）．以下， $\mathbf{p}_{\text{start}}-\mathbf{p}_{\text{goal}}$ 間に対象設備が存在する場合の部分経路生成アルゴリズムを説明する．

図 3.5. $p_{\text{start}}-p_{\text{goal}}$ 間の衝突回避用部分経路の生成

準備として、対象設備形状を立方体の集合で近似する．空間を任意の幅のグリッドで分割し、この時できる各立方体をセルと呼ぶ．セル群のうち、StL ファイルに記述されたポリゴンが内部に存在するセルのみを構造物セルとして記憶する．また、各構造物セルの全頂点を衝突回避用ウェイポイントとして記憶し、重複するウェイポイントを削除する．衝突回避用ウェイポイント群を \mathbf{W} とおく． p_{start} , p_{goal} , \mathbf{W} を合わせてウェイポイントと呼ぶ．ある2ウェイポイントの組み合わせについて、2点を結ぶ線分が構造物セルを貫通しない場合、その線分をレグ要素として記憶する．この処理を全ての2ウェイポイントの組み合わせに適用する．

レグ要素の選択によって衝突回避用部分経路を生成する．部分経路の生成にはA*アルゴリズム [36] を用いる．A*アルゴリズムは、グラフ探索アルゴリズムの一種であり、ヒューリスティック（先見情報）を用いてコスト最小経路を効率よく生成できる．ここでは、あるウェイポイント w におけるヒューリスティックを、 w から p_{goal} までのユークリッド距離とする．これにより、 p_{start} から p_{goal} への最短のレグ要素の組み合わせ（＝部分経路）を決定できる．この部分経路を、式 (3.11) で定義される、 p_{start} , p_{goal} および $p_{\text{start}}-p_{\text{goal}}$ 間の衝突回避用ウェイポイント w_{s-g} を頂点とした有向グラフ P_{s-g} として記憶する．

$$P_{s-g} = (\{p_{\text{start}}, w_{s-g1}, w_{s-g2}, \dots, w_{s-gn}, p_{\text{goal}}\}, \{\{p_{\text{start}}, w_{s-g1}\}, \{w_{s-g1}, w_{s-g2}\}, \dots, \{w_{s-gn}, p_{\text{goal}}\}\}) \quad (3.11)$$

また、 P_{s-g} の飛行に要する時間 $t_{P_{s-g}}$ を式 (3.12) で求める。

$$t_{P_{s-g}} = \frac{|w_{s-g1} - p_{start}| + |w_{s-g2} - w_{s-g1}| + \dots + |p_{goal} - w_{s-gn}|}{v} \quad (3.12)$$

P_{s-g} の各頂点を順番に巡回することで、UAV は対象設備と衝突せず p_{start} から p_{goal} へ最短時間で到達できる。以上の P_{s-g} および $t_{P_{s-g}}$ を、あらゆる2計測位置の組み合わせに対して導出し、記憶する。

3.3.2 計測位置巡回順の決定

前述の $t_{P_{s-g}}$ を考慮して、最短時間で全計測位置を巡回する問題を TSP として解く。部分経路の生成と同様に TSP にも多くの既存研究が存在し、適切な解法を利用すれば高精度な解を現実時間内に得られる。ここでは、最も単純な手法である最近傍法（以降、NN 法）を用いて巡回順を決定する。

3.4 経路計画法評価のためのシミュレーション

前節までで提案した経路計画法の各要素の妥当性を検証するため、シミュレーション実験を行った。実在するインフラ設備や計測機器を基にシミュレーション条件を設定する。設定した条件に基づいて経路計画法を適用し、計画された経路を検証して提案手法の妥当性を確認する。

3.4.1 シミュレーション条件：対象設備

点検対象となる設備は、橋梁の中でも代表的な形状を持つ、T 型橋脚を持つ桁橋とアーチ橋を想定した。一般的な橋梁は類似した形状を複数連ねた構造をしている。そのため、経路計画方針の原理検証のためには一部領域に対して経路計画すればよいと考え、上部構造や橋脚の一部を計測対象領域とした。以上の前提から、図 3.6 のような2つの3Dモデルを作成した。

3.4.2 シミュレーション条件：計測機器・計測条件

計測用 UAV として S1000+ (DJI 社)、搭載するカメラとして α -7R (SONY) を想定した。S1000+は α -7R に対応したジンバルを持ち、また最大離陸重量も大きい

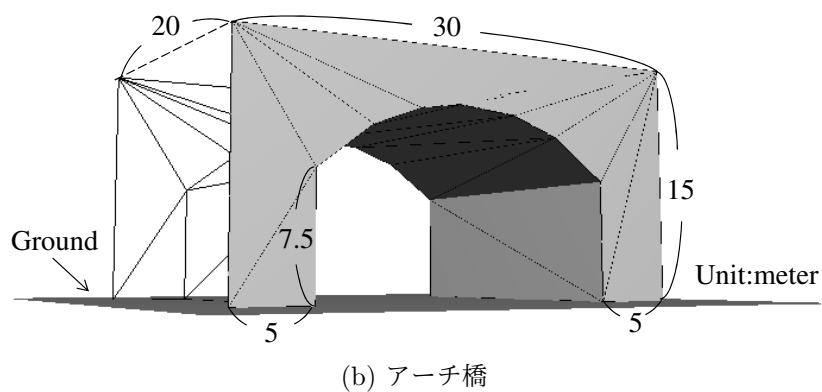
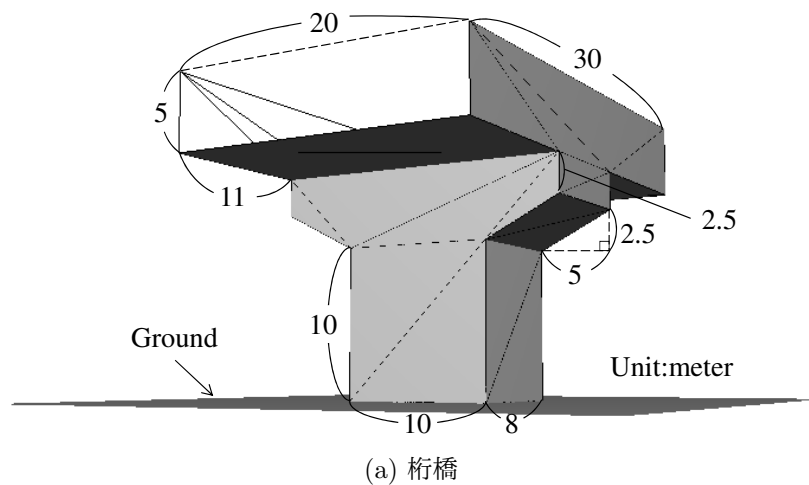


図 3.6. 対象設備の 3D モデル

表 3.2. α -7R の仕様

焦点距離	18mm
受光部のサイズ	35.9mm × 24.0mm
画像データの画素数	7360 × 4912pxl

表 3.3. 計測に関するパラメータ

検出すべきひび割れ幅 [mm]	S_{pxl} [mm]	D [m]	r_c [m]
0.3	1.2	4.42	2.65
0.2	0.8	2.94	1.77

ため、第2章の計測方向に関する制約を満たせると考えられる． α -7Rの仕様を表3.2に示す．

実際の点検基準や異常検出技術から計測条件を設定した．国土交通省が策定した橋梁の損傷判断の基準 [14] に基づくと、ひび割れ幅に関して、鉄筋コンクリート（以降、RC）構造では0.3mm、プレストレスト・コンクリート（以降、PC）構造では0.2mmなら大きい、すなわち深刻な損傷であると判断される．また、小山ら [18] のひび割れ検出技術では、1画素当たりの実サイズが S_{pxl} である画像データから、 $S_{pxl}/4$ 程度の幅を持つひび割れを検出可能である．本シミュレーションではこれらに従い、画像データに要求される精度として、 $S_{pxl} = 1.2, 0.8[\text{mm}]$ の2つを設定した． c_d は、レンズの性能や計測条件等から設定すべきであるが、本シミュレーションでは初期検討として0.9と設定した．それぞれの値と表3.2の値を基に、式(3.5)、(3.7)を用いて D および r_c を表3.3のとおりに導出した．

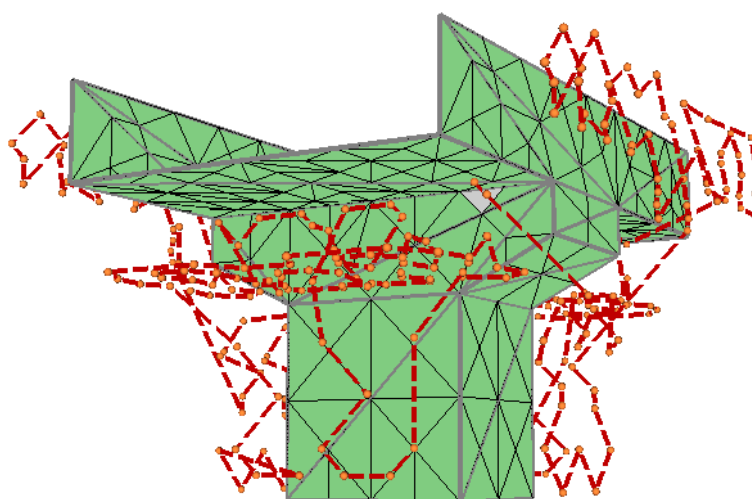
上記に加え、計測タスクに要する時間を評価するための定数を設定した．UAVの移動速度を $v = 1[\text{m/s}]$ 、ある計測位置において定位および計測に要する時間を5[s]とした．以上の数値を利用し、各経路に従って計測タスクを遂行した際の時間を算出した．

3.4.3 経路計画結果

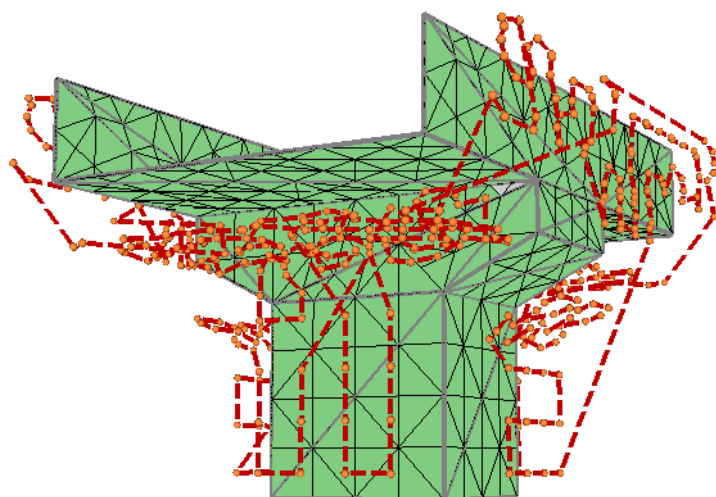
各対象設備・計測条件の組み合わせに対する経路計画結果を議論する．桁橋およびアーチ橋に対する経路を図3.7、3.8に示す．緑色のポリゴンが計測対象領域、橙色の点は計測位置および衝突回避用ウェイポイント、赤色の破線は経路である．なお、今回の条件においては、橋梁の上部構造や地面との接触により物理的に到達不可能な領域に計測位置が導出される場合があった．上記に該当する計測位置は巡回すべき計測位置群から除外し、対応するポリゴンを灰色で示した．

図3.6(a)と図3.7(a)、(b)を比較すると、各ポリゴンが計測範囲に合わせて分割され、分割後のポリゴンに対して計測位置が導出されたことが分かる．また、図3.7(a)と(b)を比較すると、計測条件によってポリゴン分割および計測位置導出に差が生じることが分かる．図3.7(a)、(b)の各ポリゴンは対応する計測位置から計測範囲に収められることが保証されており、全計測位置を巡回することで図3.6(a)に示す全表面領域を計測可能である．図3.7(a)、(b)の赤破線はいずれのポリゴンとも交差していない．すなわち、UAVが位置誤差なく経路に追従して飛行することで、対象設備と衝突せず計測タスクを達成できる．以上の議論は図3.8に関しても同様であり、異なる形状の設備に対しても経路計画可能であることが示された．

経路に追従して計測タスクを遂行する際に要した時間を表3.4に示す．アーチ橋で検出すべきひび割れ幅が0.2mmの場合においては、作業時間が1時間を超える経

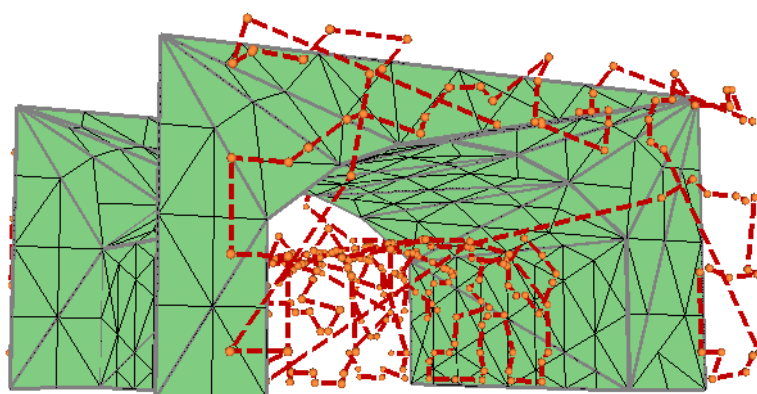


(a) 検出すべきひび割れ幅：0.3mm（計測位置数：370）

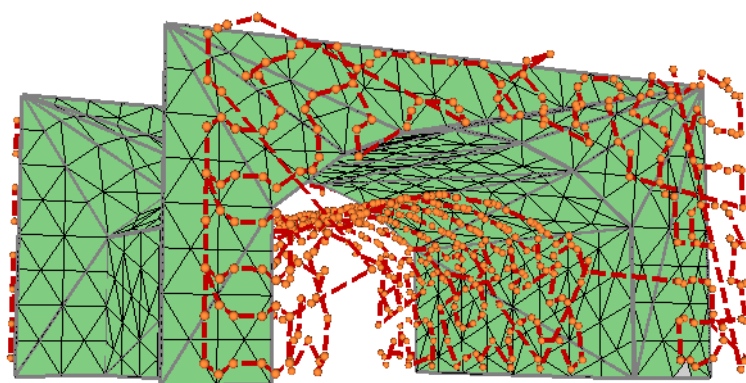


(b) 検出すべきひび割れ幅：0.2mm（計測位置数：648）

図 3.7. 経路計画結果（桁橋）



(a) 検出すべきひび割れ幅：0.3mm（計測位置数：399）



(b) 検出すべきひび割れ幅：0.2mm（計測位置数：920）

図 3.8. 経路計画結果（アーチ橋）

表 3.4. 計測タスクに要する時間 [min:sec]

検出すべきひび割れ幅 [mm]	0.3	0.2
桁橋	42:55	68:01
アーチ橋	42:38	90:37

路が計画された。現行の UAV の稼働時間は一般的に数十分であり、本章で計画された経路を 1 フライトで巡回することは不可能である。実運用においては、バッテリー残量を管理して適宜充電ステーションへ帰還する [53, 54]、複数機を用いて点検するといった対策が必要である。

3.5 実際の運用を考慮して改善すべき問題

前節までにおいて経路計画方針の妥当性を評価した。事前情報を基に収集データの精度を考慮した経路計画法を提案し、異常検出に有効な画像データを収集可能な経路の計画を確認した。結果として、この方針によって「対象設備全表面領域の計測」、「一定以上の精度での計測」を充足可能であることが示された。本節では、経路計画法の実際の運用に向けて改善すべき問題を述べる。

3.5.1 短時間でのタスク達成

「短時間でのタスク達成」の充足に関して、本章では計測位置巡回順の最適化によって対処した。しかし、計測位置導出において計測の効率が考慮されていない場合、巡回順の最適化のみではこの要件を充足できない。

本章の計測位置導出法では、StL ファイルの各三角形ポリゴンにつき 1 つの計測位置を導出する。ある計測位置から複数のポリゴンを計測することを考慮できず、1 回の計測でデータ収集可能な領域を複数回計測する場合がある。そのため、2 節で述べたように収集データの量が増加し、作業時間の増大、異常検出やデータ管理への負担といった問題につながる。そこで、複数のポリゴンの計測を考慮し、分割に加えて統合を含めたポリゴン再構成法を検討する必要がある。

特に、この問題は、図 3.6(b) のアーチ橋のような曲面形状を持つ対象設備において顕著となる。StL ファイルにおいて曲面は多数の微小ポリゴンで近似される。図 3.6(b) においては曲面は多数の細長いポリゴンからなる。曲面領域の効率的な計測のためにはポリゴン再構成の際に曲面の計測を考慮すべきであるが、本章で定式化した計測条件では完全な平面でない領域の計測は考慮できない。

以上より，次章では「短時間でのタスク達成」を充足するための計測条件および経路計画法を検討する．

第4章

収集データの精度と作業効率を両立した経路計画

第3章では、「対象設備全表面領域の計測」、「一定以上の精度での計測」および「対象設備と UAV の衝突の回避」を充足する基礎的な経路計画法の提案により、経路計画方針の妥当性を評価した。この方針に基づき、本章では、これらの要件に加えて「短時間でのタスク達成」も充足する経路計画法を提案し、収集データの精度と作業効率を両立した計測タスクの実現を目指す。

4.1 計測位置導出法

第3章の問題点を解決するために、計測条件と計測位置導出アルゴリズムを改良する。点検対象表面の細微な凹凸や緩やかな曲面の計測を考慮できる新たな計測条件を定式化する。StL ファイルの三角形ポリゴンを微小サイズに分割し、計測条件を基に分割後のポリゴンを統合する。統合されたポリゴン群に対して計測位置を導出する。

4.1.1 ポリゴンの統合のための検討

ポリゴンの統合を考えるにあたり、多数の微小ポリゴンで表現される曲面領域と計測条件の関係を検討する。図 4.1 は、ある曲面領域を近似する2枚のポリゴン t_1 , t_2 を示す。 t_1 , t_2 はそれぞれ異なる平面上に存在し、法線 n_1 , n_2 は異なる方向に向かっている。 t_1 に対して一定距離 D から n_1 と対向して計測することを考慮し、式 (3.8) に従って計測位置 p を導出した場合を考える。 t_2 と計測範囲円は同一平面上に存在せず、 n_2 とカメラ方向 d_c は対向しない。そのため、効率的な計測タスク達

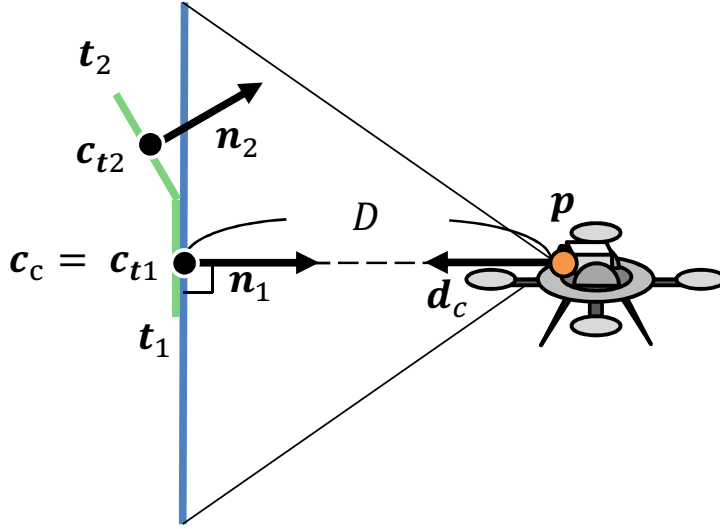


図 4.1. 曲面領域と計測範囲の位置関係

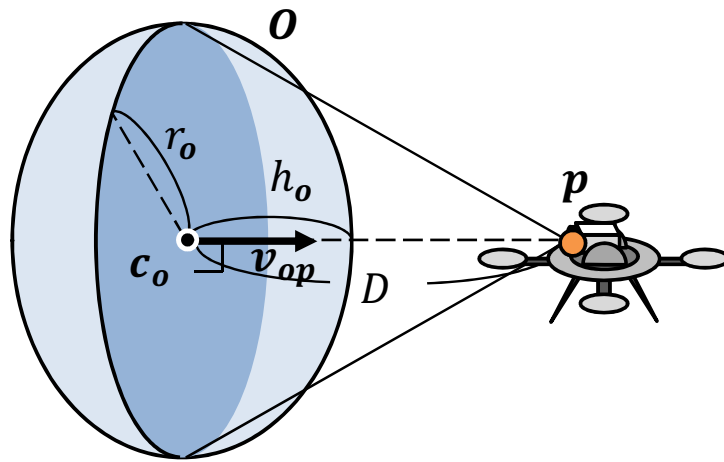
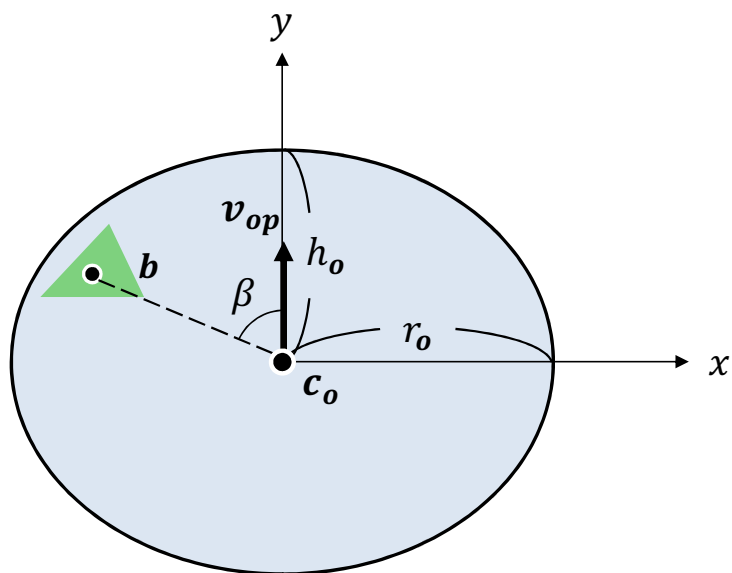
成に向けたポリゴン統合のためには、同一平面上に存在せず、法線方向が一致しないポリゴン群を考慮した計測条件を定式化する必要がある。

4.1.2 曲面の計測を考慮した計測条件の定式化

図 3.1 および式 (3.8) をベースに、曲面を近似するポリゴン群の計測を考慮した計測条件を定式化する。

まず、同一平面上に存在しないポリゴンへ対処するために、立体形状の計測範囲を定義する。本研究においては、図 4.2 のような扁球状の計測範囲 O を定義する。空間上のある位置 p からカメラを特定の方角に向けた場合、 D 離れた位置に存在する c_o を中心とした、赤道半径 r_o 、極半径 h_o である扁球 O の領域から有効な画像データを収集可能とする。 D は式 (3.5) から、 r_o は式 (3.7) における r_c と同様に決定する。 h_o は $r_o/10$ と設定する。 O の極半径方向はカメラ方向と平行、赤道半径方向は垂直になる。また、 c_o から p へ向かうベクトルを v_{op} (ただし、 $|v_{op}| = 1$) とおく。

あるポリゴン t と O の位置関係について述べる (図 4.3)。 t の重心を b とおく。後述するが、本章においてポリゴンの計測可否判定はポリゴンが微小サイズに分割された後に行う。そのため、判定においてはポリゴンの大きさを見捨てる、その位置を b とおく。 c_o と b が存在する平面上に、 c_o を原点、 v_{op} と平行な方向を y 、 v_{op} から時計回りに $\frac{\pi}{2}$ の方向を x とする座標系を定義する。この平面上において、 O の

図 4.2. 楕円体状の計測範囲 O 図 4.3. ポリゴン t と計測範囲 O の位置関係

断面は式 (4.1) で表される楕円となる.

$$\frac{x^2}{r_o^2} + \frac{y^2}{h_o^2} = 1 \quad (4.1)$$

ここで, \mathbf{c}_o から \mathbf{b} へ向かうベクトルと \mathbf{v}_{op} のなす角を β ($0 \leq \beta < \pi$) とおく. このとき, 線分 $\mathbf{c}_o\mathbf{b}$ の x , y 軸方向成分の大きさはそれぞれ $|\mathbf{b} - \mathbf{c}_o|\sin\beta$, $|\mathbf{b} - \mathbf{c}_o|\cos\beta$ となる. これらを式 (4.1) に代入して整理すると, 式 (4.2) となる.

$$|\mathbf{b} - \mathbf{c}_o|\sqrt{((\sin\beta)^2 + (\frac{r_o}{h_o}\cos\beta)^2)} = r_o \quad (4.2)$$

以上より, \mathbf{t} が \mathbf{O} 内に存在する場合, 式 (4.3) が成り立つ.

$$|\mathbf{b} - \mathbf{c}_o|\sqrt{((\sin\beta)^2 + (\frac{r_o}{h_o}\cos\beta)^2)} \leq r_o \quad (4.3)$$

次に, ポリゴンの法線と計測方向の関係を検討する. 図 4.4 に, ポリゴンの実サイズと収集画像上でのサイズの関係を示す. 図 4.3 と同様の座標系において, ポリゴン \mathbf{t} の実サイズを l , 収集画像上でのサイズを l_i , \mathbf{n} と \mathbf{v}_{op} のなす角度を α ($0 \leq \alpha \leq \pi$) とおく. $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ である場合, l_i は式 (4.4) で求められる.

$$l_i = l \cos\alpha \quad (4.4)$$

l_i は α が $\frac{\pi}{2}$ に近いほど 0 に近づく. 言い換えると, 収集画像中の同じサイズとして撮影された物体について, 実サイズが大きくなる. つまり, カメラ方向と対向せずに計測された領域は収集画像中の 1 画素あたりの実サイズ S_{pxl} が大きくなり, 検出すべきサイズの異常を見落とす恐れがある. また, $\frac{\pi}{2} < \alpha \leq \pi$ である場合, \mathbf{t} はカメラに対して裏となる表面領域である. 表面領域とカメラの位置関係からそのような \mathbf{t} は物理的に計測不可能である. そこで, α に対する閾値 α_t ($0 \leq \alpha_t < \frac{\pi}{2}$) を設定する. $\alpha = \alpha_t$ であるポリゴンの収集画像上でのサイズは $l \cos\alpha_t$ となる. そのため, 計測条件の定式化においては, α_t を設定した後に, $\cos\alpha_t$ やその他の影響を考慮して S_{pxl} , D , r_o および h_o を設定する.

以上より, ある \mathbf{p} に位置する UAV が特定の方向にカメラを向けたとき, 式 (4.3) を満たし, かつ $\alpha \leq \alpha_t$ であるポリゴンを計測可能とする.

4.1.3 初期ポリゴン配置への依存を解消した計測位置導出法

前述のとおり定式化された計測条件を基に, 以下の手順でポリゴンを分割・統合し, 統合されたポリゴン群に対して計測位置を決定する. 本章では, ポリゴンの統合にクラスタリングを用いるものとし, 計測位置導出法のフローを以下に示す (図 4.5).

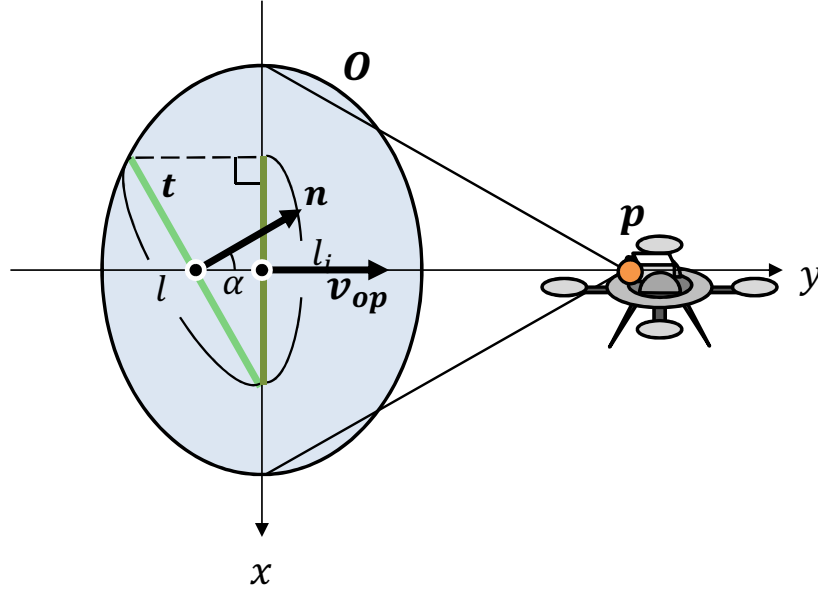


図 4.4. 計測方向のずれと画像上でのサイズの関係

1. 各ポリゴンを微小サイズに分割する．分割法は第3章と同様であり， r_t が一定以下になるまで再帰的に分割する．
2. 計測条件を基にポリゴン群をクラスタリングする．
3. クラスタ毎に1つの計測位置を決定する．

クラスタリング法の1つとして k -means++法 [60] が存在する． k -means++法は， n 個のデータから成るデータ群を k 個のクラスタ $\mathbf{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ (ただし， $2 \leq k \leq n$) に分類する非階層型クラスタリング法であり，データ群は \mathbf{C} についての評価関数を最小化するようにクラスタリングされる．この手法は，クラスタリング終了後の各クラスタのサイズがおおむね同等になるという特徴を持つ．所望の精度を保持し，なおかつ効率的な計測タスク達成を考えると，クラスタ，すなわち1つの p から計測可能な領域が O と近いサイズであることが望ましい．そのため，本章では k -means++法を用いてポリゴンをクラスタリングする．

計測タスク達成のための評価関数の設定について検討する．本研究においてデータ群は分割後の n 枚のポリゴン群であり， $\mathbf{T}_{\text{div}} = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ とおく．また，クラスタ $C_j (j = 1, 2, \dots, k)$ に属する m 枚 ($m \leq n$) のポリゴン群を $\mathbf{T}_j = \{t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jm}\}$ とおく．前述の計測条件を反映するために，各 C_j に対して t_{ji} ($i = 1, 2, \dots, m$) の重心 b_{ji} および法線 n_{ji} に関する中心 b_{C_j} ， n_{C_j} (ただし， $|n_{C_j}| = 1$) を合わせてク

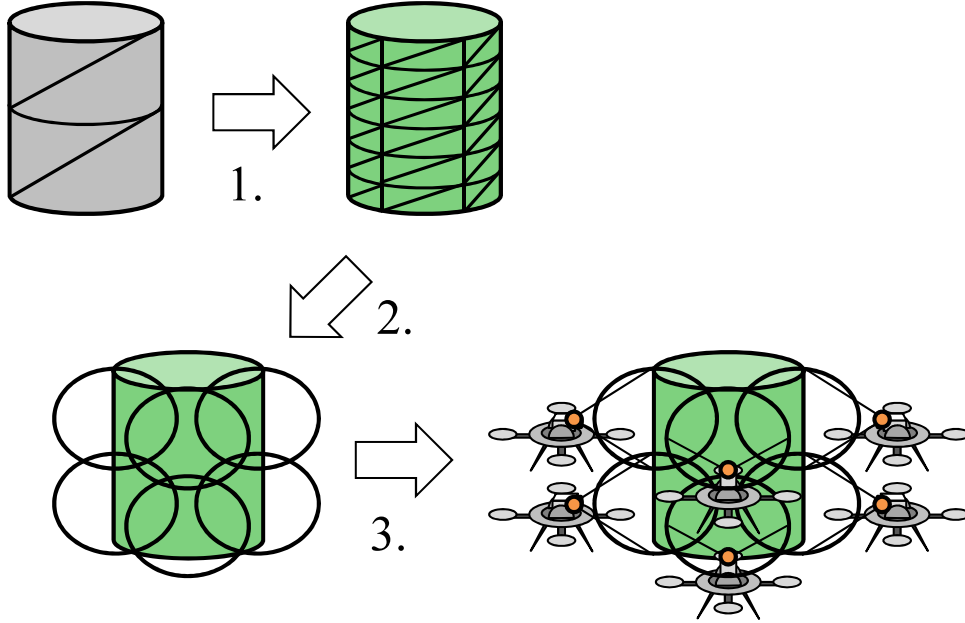


図 4.5. 計測位置導出法のフロー

ラスタ中心 $\mathbf{V}_j = (\mathbf{b}_{C_j}, \mathbf{n}_{C_j})$ とし、それぞれ式 (4.5), (4.6) で定義する.

$$\mathbf{b}_{C_j} = \frac{\sum_{i=1}^m \mathbf{b}_{j_i}}{m} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{n}_{C_j} = \frac{\sum_{i=1}^m \mathbf{n}_{j_i}}{|\sum_{i=1}^m \mathbf{n}_{j_i}|} \quad (4.6)$$

ある C_j について, \mathbf{b}_{C_j} を \mathbf{c}_{oj} , \mathbf{n}_{C_j} を \mathbf{v}_{opj} として一意に定まる計測範囲 \mathbf{O}_j を考える. 以降では, \mathbf{t}_i が \mathbf{O}_j に対して式 (4.3) を満たし, かつ $\alpha \leq \alpha_t$ であるかどうかを基準に評価関数を設定する.

\mathbf{t}_i と \mathbf{V}_j についての評価関数 $e(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j)$ を式 (4.7) で定義する.

$$e(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j) = w \sqrt{e_b^2(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j) + c_s e_n^2(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j)} \quad (4.7)$$

$e_b(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j)$ (式 (4.8)) は \mathbf{t}_i - \mathbf{V}_j 間の位置関係の評価値である. \mathbf{t}_i が \mathbf{O}_j 内に存在する場合, 式 (4.3) から $e_b(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j) \leq r_o$ (以降, 条件 I) が成り立つ.

$$e_b(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j) = |\mathbf{b}_i - \mathbf{b}_{C_j}| \sqrt{((\sin \beta)^2 + (\frac{r_o}{h_o} \cos \beta)^2)} \quad (4.8)$$

$e_n(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j)$ (式 (4.9)) は \mathbf{t}_i の法線と計測方向との差を評価する値である. \mathbf{t}_i と \mathbf{O}_j に関して $\alpha \leq \alpha_t$ が成り立つ場合, $e_n(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j) \leq 1 - \cos \alpha_t$ (以降, 条件 II) が成り立つ.

$$e_n(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j) = 1 - \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_{C_j} \quad (4.9)$$

c_s は3Dモデルの規模を考慮して $e_n(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j)$ を補正する値である． $e_b(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j)$ は3Dモデルの規模に応じて様々な範囲の値をとるが， $e_n(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j)$ はいかなる場合においても $0 \leq e_n(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j) \leq 2$ となる．そこで，3Dモデルの規模を基に c_s を決定し， $e_n(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j)$ のとり得る値を $e_b(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j)$ に近づける． w (式(4.10)) は計測可否条件に対するポリゴンへのペナルティである．ある \mathbf{t} が条件 I, II のどちらかを満たさない場合は $e(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j)$ に $w_p(> 1)$ を乗算する．これにより，各ポリゴンに両条件の成立を促し，クラスタリングの収束を早める．

$$w = \begin{cases} 1 & \text{if } e_b(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j) \leq r_o \text{ and } e_n(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j) \leq 1 - \cos\alpha_t \\ w_p & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.10)$$

以上で定義した評価関数を基にした k -means++法のアロリズムを以下に示す．

1. k 個の初期クラスタ中心を決定する．

- (a) 初期クラスタ中心の候補となるデータ群を $\mathbf{T}_{\text{tmp}} = \mathbf{T}_{\text{div}}$ ，これまでに決定された初期クラスタ中心の数を $k_{\text{tmp}} = 0$ とする．
- (b) $k_{\text{tmp}} = 1$ とする． \mathbf{T}_{tmp} の中からランダムに $\mathbf{t}_{\text{tmp}_i}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) を1つ選び， $\mathbf{b}_{C_1} = \mathbf{b}_{\text{tmp}_i}$ ， $\mathbf{n}_{C_1} = \mathbf{n}_{\text{tmp}_i}$ として \mathbf{V}_1 を決定する．その後，選択された $\mathbf{t}_{\text{tmp}_i}$ を \mathbf{T}_{tmp} から除外する．
- (c) 各 $\mathbf{t}_{\text{tmp}_i}$ について，各 \mathbf{V}_j ($j = 1, 2, \dots, k_{\text{tmp}}$) との $e(\mathbf{t}_{\text{tmp}_i}, \mathbf{V}_j)$ を求め，各 $\mathbf{t}_{\text{tmp}_i}$ における最小値 $\min(e(\mathbf{t}_{\text{tmp}_i}, \mathbf{V}_j))$ を記憶する．
- (d) $k_{\text{tmp}} = k_{\text{tmp}} + 1$ とする． \mathbf{T}_{tmp} の中から，式(4.11)で求められる確率 $P(i)$ に従って $\mathbf{t}_{\text{tmp}_i}$ ($i = 1, 2, \dots, n - k_{\text{tmp}} + 1$) を1つ選び， $\mathbf{b}_{C_{k_{\text{tmp}}}} = \mathbf{b}_{\text{tmp}_i}$ ， $\mathbf{n}_{C_{k_{\text{tmp}}}} = \mathbf{n}_{\text{tmp}_i}$ として $\mathbf{V}_{k_{\text{tmp}}}$ を決定する．その後，選択された $\mathbf{t}_{\text{tmp}_i}$ を \mathbf{T}_{tmp} から除外する．

$$P(i) = \frac{\min(e(\mathbf{t}_{\text{tmp}_i}, \mathbf{V}_j))^2}{\sum_{i=1}^{n-k_{\text{tmp}}+1} \min(e(\mathbf{t}_{\text{tmp}_i}, \mathbf{V}_j))^2} \quad (4.11)$$

- (e) $k_{\text{tmp}} = k$ であれば初期クラスタ中心の決定を終了し，2. へ進む．そうでなければ(c)に戻る．

2. 各 \mathbf{t}_i に関して，現在所属している C_j を記憶 (1. の直後であればこの手順はスキップ) する．その後，各 \mathbf{t}_i と各 \mathbf{V}_j に関して $e(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j)$ を求め， \mathbf{t}_i を $e(\mathbf{t}_i, \mathbf{V}_j)$ が最も小さい C_j に所属させる．
3. 2. において1. の直後でなく，なおかつ全ての \mathbf{t}_i に関して記憶した C_j と現在所属する C_j が一致する場合，クラスタリングを終了する．そうでない場合は
4. に進む．

4. 各 C_j に関して式 (4.5), (4.6) 用いて V_j を導出し, 2. に戻る.

本研究において k は計測位置数となり, 事前に決定することは困難である. そこで, 以下の手順でクラスタリングを繰り返して最適な k の値を決定する.

I. $k = k_0$ とする.

II. クラスタ数を k として T_{div} をクラスタリングする.

III. 各 t_i と各 V_j に関して $e_b(t_i, V_j)$ および $e_n(t_i, V_j)$ を求める. $e_b(t_i, V_j) \leq r_o$ かつ $e_n(t_i, V_j) \leq 1 - \cos\alpha_t$ となる V_j が1つもない t_i が存在すれば, $k = k + 1$ として2.に戻る. そうでなければクラスタリングの繰り返しを終了する.

以上より, 最小限の k 個のクラスタを決定できる.

全クラスタリング処理が終了した後, 各 C_j に対応する計測位置 p_j を式 (4.12) で求める.

$$p_j = b_{C_j} + Dn_{C_j} \quad (4.12)$$

導出された計測位置群に対して第3章と同様に巡回順を決定することで, 「対象設備全表面領域の計測」, 「一定以上の精度での計測」, 「対象設備と UAV の衝突の回避」および「短時間でのタスク達成」を充足する経路を計画できる.

4.2 経路計画法評価のためのシミュレーション

本章の手法によって「短時間でのタスク達成」が充足されることを確認するため, シミュレーション実験を行った. 第3章のシミュレーションと同様に, 実在するインフラ設備や計測機器を基に条件を設定した. 設定した条件に基づいて第3章・本章それぞれの手法で経路を計画した. 各経路に従った計測シミュレーションにより, タスクの効率が改善されたかどうかを検証した.

4.2.1 シミュレーション条件

点検対象となる設備は第3章と同様のものを想定し, 図 3.6 に示す2つの3Dモデルを用いた. 計測機器・条件についても同様に, 小山ら [18] の手法を用いて対象設備表面の幅 0.3mm および 0.2mm のひび割れを検出するために, α -7R を搭載した S1000+ で画像データを収集するとした. α_t に関して, 収集画像上でのサイズが実サイズの 0.9 倍になる方向差までを許容するものとし, $\alpha_t = \arccos(0.9) = 25.8[^\circ]$ と設

表 4.1. 計測に関するパラメータ

検出すべきひび割れ幅 [mm]	S_{pxl} [mm]	D [m]	r_o [m]	h_o [m]
0.3	1.08	3.98	2.39	0.239
0.2	0.72	2.65	1.59	0.159

定した．本シミュレーションでは初期検討として，ひび割れの検出において α の影響は収集画像上でのサイズのみとした．そのため，幅 0.27mm および 0.18mm のひび割れ検出と同等の精度で計測タスクを実行することで， $\alpha \leq \alpha_t$ である領域に対して所望の画像データを収集できるとした．以上より，画像データに要求される精度として $S_{\text{pxl}} = 1.08, 0.72$ [mm] の 2 つを設定した．これらの数値から，各パラメータを表 4.1 のとおりに導出した．

その他計測位置導出に関するパラメータを設定する．ポリゴンが小さく分割されるほど高精度にクラスタリングできる一方，計算時間が増加する．本シミュレーションでは各ポリゴンが計測範囲と比べ十分小さいサイズとなるように，内包する最小円の半径について， O の赤道半径 r_o の 1/10 を目安とした．全ポリゴンを，要求精度が 1.08mm の場合は 0.239m，0.72mm の場合は 0.159m 以下になるまで再帰的に分割した．初期クラスタ数 k_0 は，対象設備の表面領域に対する必要最小限の計測を想定して求めた．深澤ら [45] の知見より，ある平面領域を一辺が r_o の正六角形で充填することを想定し， k_0 を式 (4.13) より求めた．

$$k_0 = \left\lceil \frac{2(\text{StL ファイルの全ポリゴンの総面積})}{3\sqrt{3}r_o^2} \right\rceil \quad (4.13)$$

c_s は，絶対座標系において全 t の頂点がとり得る x, y, z 各軸成分の最大値を $x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}$ ，最小値を $x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}$ として式 (4.14) から求めた．

$$c_s = \left(\frac{|x_{\max} - x_{\min}| + |y_{\max} - y_{\min}| + |z_{\max} - z_{\min}|}{6} \right)^2 \quad (4.14)$$

また， $w_p = 10$ とした．

計測位置巡回順の決定および計測タスクに要する時間の評価についても第 3 章と同様に，UAV の移動速度を $v = 1$ [m/s]，ある計測位置において定位および計測に要する時間を 5[s] とした．

4.2.2 計測タスクのシミュレーション

経路計画の後，以下に従って計測タスクのシミュレーションを実施した．シミュレーションの前に，本章の手法によって分割された微小ポリゴン群 \mathbf{T}_{div} の各 t_i に，自身が計測された回数を記憶する変数 $c_i = 0$ を定義し， $j = 1$ とする．

表 4.2. 第3章の経路計画法検証のためのパラメータ

検出すべきひび割れ幅 [mm]	S_{pxl} [mm]	D [m]	r_o [m]	h_o [m]
0.3	1.2	4.42	2.65	0.265
0.2	0.8	2.94	1.77	0.177

1. 計測位置 p_j に対応する計測範囲 O_j に対して c_{oj} を b_{C_j} , v_{op_j} を n_{C_j} として一意に定まるクラスタ中心 V_j を定義する.
2. V_j と T_{div} の位置関係から, $e_b(t_i, V_j) \leq r_o$ かつ $e_n(t_i, V_j) \leq 1 - \cos\alpha_t$ となる t_i について $c_i = c_i + 1$ とする.
3. $j = k$ ならシミュレーションを終了する. そうでなければ $j = j + 1$ として1.に戻る.

第3章・本章それぞれの手法で計画された各経路について計測タスクのシミュレーションを実施した. 計測対象となる T_{div} は, 第3章・本章それぞれの手法で対象となる3Dモデルと検出すべきひび割れ幅から対応させた. 本章の手法において, p に対する O は自明である. 一方, 第3章の手法においては定式化された計測条件が異なるため, 本シミュレーションのために p に対して O を定義する. 図3.2と図4.2の比較から, c_o は c_c と, v_{op} は c_c から p へ向かう大きさ1のベクトルと一致させる. これによって, D は表3.3と同値となる. また, r_o は表3.3における r_c と同値, h_o は r_c の1/10とする. 以上の数値を表4.2にまとめた. さらに, 第3章の手法では各ポリゴンに対してカメラ方向と対向するように p を導出したため, 計測対象となるポリゴンに関して暗に $\alpha = 0$ が成り立っていた. そこで, 数値の切り捨てによる計算誤差を考慮して $\alpha_t = 0.1[^\circ]$ と設定した. 計測シミュレーションの後, 経路ごとに c_i の平均および標準偏差を算出, 比較した.

加えて, 各経路における計測位置数, 各経路を巡回した際に要した時間および計測結果を比較した.

4.2.3 シミュレーション結果

各対象設備・計測条件の組み合わせに対する経路計画結果を議論する. 桁橋およびアーチ橋に対する経路を図4.6, 4.7に示す. 緑色のポリゴンは計測対象領域, 橙色の点は計測位置, 赤色の破線は経路である. なお, 今回の条件においては, 全ての計測位置が物理的に到達可能な領域に導出された.

図3.7と同様に, 図3.6(a)と図4.6(a), (b)を比較すると, 分割されたポリゴンが計測範囲に合わせてクラスタリングされ, 各クラスタに対して計測位置が導出され

表 4.3. 計測タスクに要する時間 [min:sec]

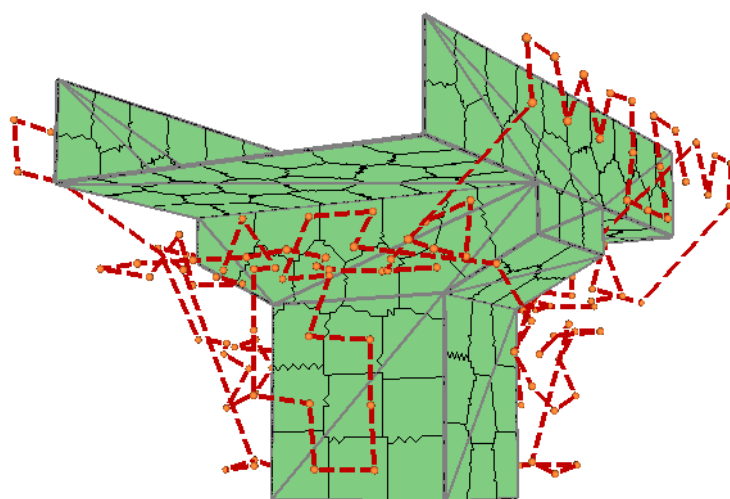
検出すべきひび割れ幅 [mm]	0.3	0.2
桁橋	22:26	44:05
アーチ橋	20:47	37:15

たこと、図 4.6(a) と (b) を比較すると、計測条件によってポリゴン分割および計測位置導出に差が生じることが分かる。図 4.6(a), (b) の各クラスタは対応する計測位置から計測範囲に収められることが保証されており、全計測位置を巡回することで図 3.6(a) に示す全表面領域を計測可能である。一方、図 4.6 を図 3.7 と比較すると、(a), (b) とともに計測位置数が減少した。ポリゴンの分割およびクラスタリングによって、より計測範囲形状を考慮してポリゴンを再構成できたためである。以上は図 4.7 に関しても同様であり、異なる形状の設備に対しても計測条件を保持しつつ計測位置数を削減可能であることが示された。また、経路に追従して計測タスクを遂行する際に要した時間を表 4.3 に示す。表 3.4 と比較すると、本章の手法によって全ての場合において時間が短縮されたことが分かる。

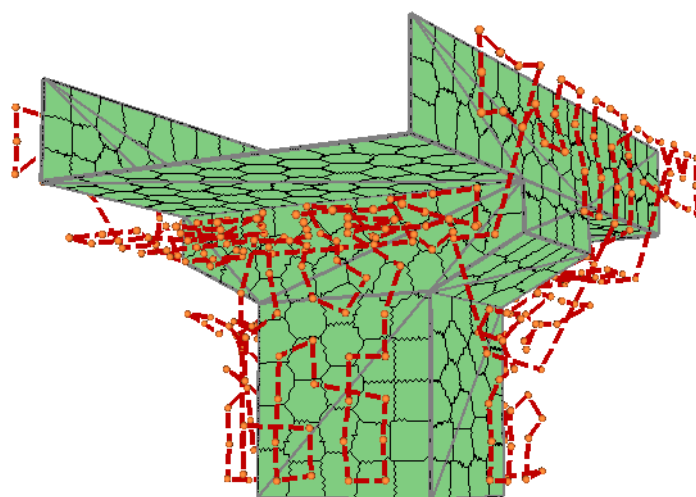
図 4.8 に計測シミュレーションの例を示す。青色のポリゴンは 1 度でも計測されたポリゴンを示す。図 4.8 のように、 p と対応した O について計測条件を満たすポリゴンが計測されたと見なされた。図 4.9 に、各経路における c_i の平均および標準偏差を示す。横軸は各条件（対象設備_手法_検出すべきひび割れ幅）における経路、縦軸は c_i の平均、棒上の黒線は標準偏差をそれぞれ示す。なお、本シミュレーションにおいてはいずれの場合も $c_i = 0$ となる t_i は存在しなかった。つまり、「対象設備全表面領域の計測」、「一定以上の精度での計測」についてはどちらの手法でも充足可能と示された。一方、図 4.9 にみられるように、本章の手法で計画された経路は、第 3 章の経路と比較して全ての場合において c_i の平均および標準偏差が小さくなった。本章の手法によって重複した計測が解消され、表 4.3 と併せて「短時間でのタスク達成」を充足できたことが示された。

上記の計測位置数、タスク達成時間や c_i の改善は、特にアーチ橋の場合に顕著である。アーチ橋の曲面領域を構成する細長いポリゴンに対して、第 3 章の手法では多くの計測位置が導出された。一方、本章の手法においては、扁球状の計測範囲と α_t を設定してクラスタリングしたことによって緩やかな曲面をまとめた計測を考慮でき、結果として計測位置数を大きく減少できた。

以上より、提案手法によって「対象設備全表面領域の計測」、「一定以上の精度での計測」、「対象設備と UAV の衝突の回避」および「短時間でのタスク達成」が可能な経路の計画をシミュレーションにて確認できた。

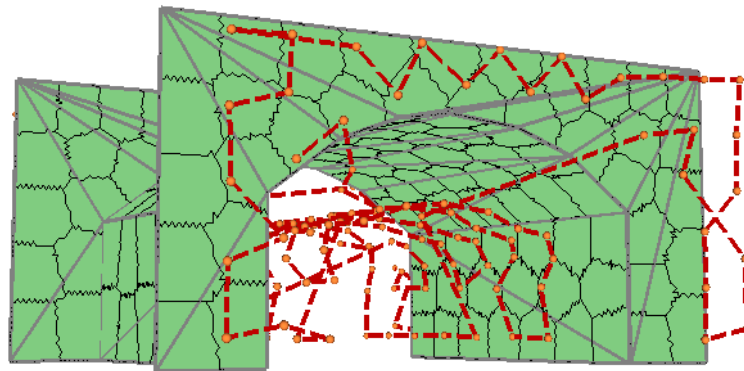


(a) 検出すべきひび割れ幅：0.3mm（計測位置数：163）

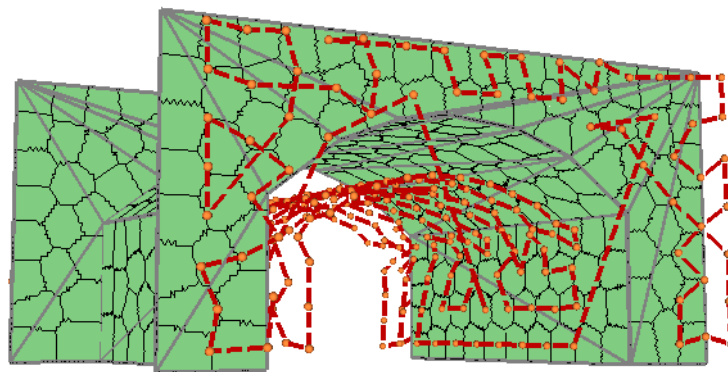


(b) 検出すべきひび割れ幅：0.2mm（計測位置数：366）

図 4.6. 経路計画結果（桁橋）



(a) 検出すべきひび割れ幅 : 0.3mm (計測位置数 : 156)



(b) 検出すべきひび割れ幅 : 0.2mm (計測位置数 : 312)

図 4.7. 経路計画結果 (アーチ橋)

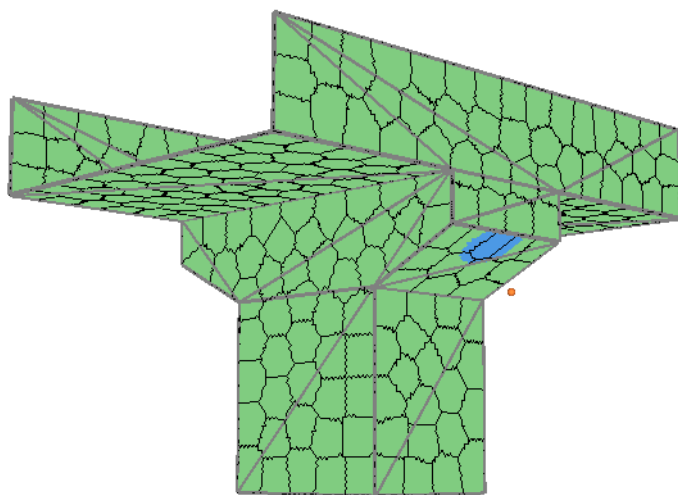


図 4.8. 計測シミュレーションの例

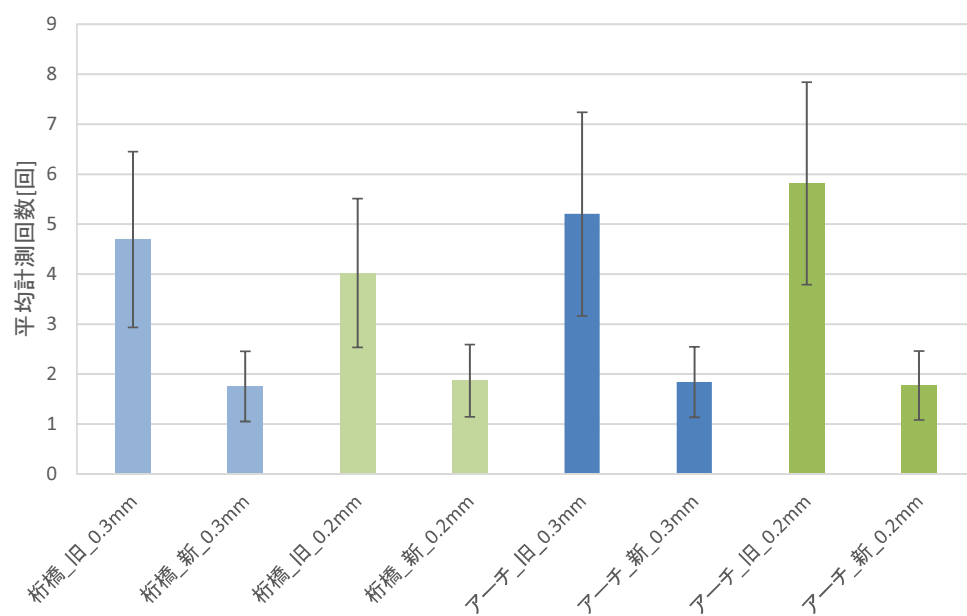


図 4.9. 各対象・条件・経路における計測結果

4.3 社会実装に向けて検討すべき問題

前節までにおいて、「対象設備全表面領域の計測」、「一定以上の精度での計測」および「短時間でのタスク達成」を充足するための経路計画法を提案し、シミュレーションにて有効性を確認した。一方、経路計画法の社会実装に向けては様々な検討すべき課題が存在する。例として、図 3.7, 3.8, 4.6, 4.7 の経路は、UAV の速度を一定として移動時間（＝計測位置間の距離）を最短化するように計画された。一方、UAV の飛行特性は考慮されておらず、実際に飛行した際に短時間でタスクを達成可能であることが保証されていない。その他、実際には特定の方向にカメラを向けられない機体も存在する。その場合にはカメラ方向の制限を考慮した計測位置を導出する必要がある。

本論文においては、社会実装のために、実在する対象設備への手法の適用、実環境での計測タスク達成の確認が特に重要であると考えた。次章では、上記事項に関するこれまでの取り組みと今後の計画について述べる。

第5章

社会実装を想定した評価・検証

第4章にて、対象設備全表面領域を所望の精度で効率的に計測するための UAV の経路計画法を提案した。しかしながら、実際のインフラ設備点検に適用するにはまだ課題も多い。本章では、社会実装、すなわち、実際の点検への適用に向けた課題とこれまでの取り組みについて述べる。

5.1 社会実装に向けて検討すべき課題

第1, 4章にて述べた社会実装への課題についてより詳細に議論する。第1章にて、本研究における社会実装を、実在する対象設備に経路計画法を適用し、計画された経路に沿って UAV が実環境中を飛行することで計測タスクを達成することとした。この目標に向けて、本研究では図5.1に示す課題を解決すべきと考えた。図5.1の全項目を充足することで、実環境中の設備に対して実機を用いて所望の計測タスクを達成可能であり、提案手法を社会実装できると証明される。これらの課題の内、第4章までで理想的な環境において所望の計測タスクを達成するための経路計画法を検討してきた。

従来研究においても、図5.1の各項目に関して検討がなされた。例えば、表4.3に示す通り、本研究で設定した条件では、 $30\text{m} \times 20\text{m} \times 20\text{m}$ 程の構造物の計測に20～40分を要する。現行の UAV のバッテリー持続時間は数十分であり、大規模なインフラ設備の計測を1フライトで達成することは現実的でない。この問題に対して、Guerrero [53] らはバッテリー残量を考慮して基地に戻るための経路をフライト前に計画する手法を提案した。瀬戸口ら [54] は、フライト中にバッテリー残量を管理し、バッテリー切れを起こす前に基地に戻るよう経路を修正する手法を提案した。また、UAV の性能について、Guerrero らの経路計画法では、環境中の風を把握した上で機体の飛行特性を考慮して UAV の軌道を生成できる。

ここで、図5.1の「実環境・実機を考慮した経路計画」と「現実時間内での経路計

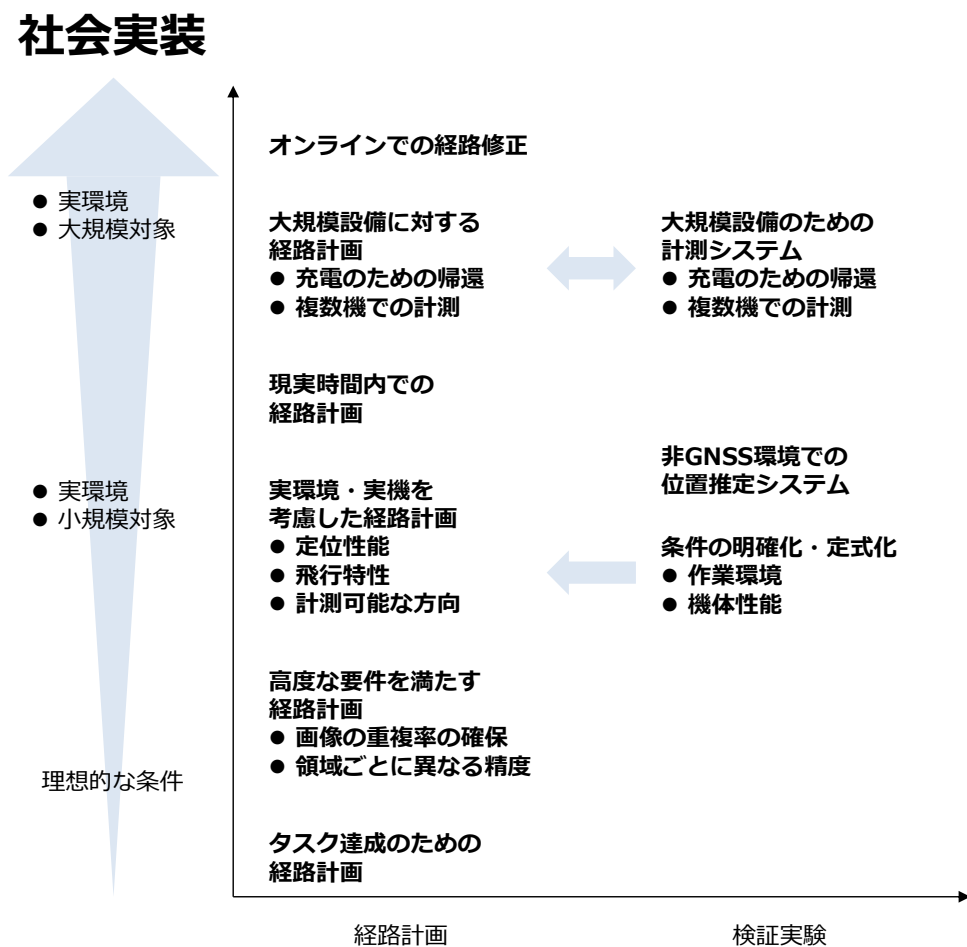


図 5.1. 社会実装に向けて解決すべき課題

画」に着目する。社会実装のためには実環境を想定した経路計画，および実環境でのタスク達成の確認のための検証実験が必要である。実環境を想定する場合，経路計画・検証実験どちらにおいても UAV の定位性能を考慮しなければならない。また，大規模な設備に対して現実時間内に経路を計画できることを確認するため，手法の計算量を検証すべきである。以上より，本研究では，大規模設備に手法を適用するための計算量の明確化，および実環境における機体の位置誤差を考慮した経路計画・検証実験に取り組む。次節以降で，これらについての活動および計画を述べる。

5.2 大規模設備に対する手法の適用

提案手法はオフラインでの経路計画を前提としており，オンラインでの計画のようリアルタイム性は要求されない。しかし，経路計画法の社会実装においては，実在する設備に対して実時間内での計算が求められる。そこで，経路計画法の計算量を明確化し，大規模設備に対する手法の適用可能性を検討する。

5.2.1 計測位置導出法の計算量の概算

経路計画プロセスの中で，本節にて計算量を明確化するプロセスについて述べる。本研究の経路計画法は，大きく計測位置導出と計測位置巡回順決定に分けられる。この内，計測位置巡回順決定の計算量は TSP の計算量と見ることができ，これは用いる解法によって大きく異なる。また，計測位置導出に関しても，ポリゴン分割の計算量は StL ファイルの元のポリゴンの大きさによって大きく異なる。そのため，本節ではポリゴンのクラスタリングの計算量に着目する。

第4章の計測位置導出アルゴリズムから計算量を概算する。一般的な k -means++ 法の計算量は，クラスタ数を k ，1回のクラスタリングにおけるループ数を l ，クラスタ対象のデータ数を n とおくと $O(kln)$ ， l を一定とすれば $O(kn)$ である。本手法では k の決定においてクラスタリングを繰り返すため，計算量は $O(k^2n)$ となる。さらに，計測条件が同じ場合，面積（≒微小ポリゴン数）あたりに導出されるべき計測位置数は等しいと考えられるため， $k \propto n$ と見なせる。よって，計算量を $O(n^3)$ と概算した。

5.2.2 3D モデルの規模と計算時間の比較

規模の異なる 3D モデルに対する経路計画によって提案手法の計算量を評価した。経路計画は Intel(R) Core(TM) i7-7770 CPU @ 3.60GHz 8GB RAM で行った。点検

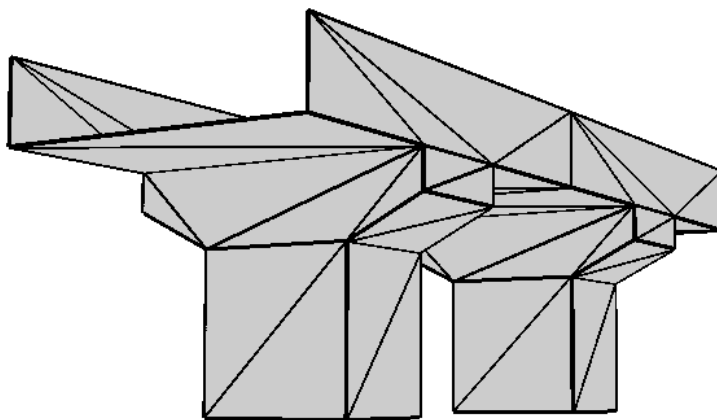


図 5.2. 2個連ねた 3D モデル (モデル B)

表 5.1. 計測に関するパラメータ (計算量評価)

S_{pxl}	D	r_o	h_o	α_t
1.00mm	5.00m	1.95m	0.195m	15.0°

対象となる設備は第3, 4章と同様のものを想定し, 図 3.6(a)(b) に示す 3D モデルを用いた. また, 各モデルを複数個連ねて規模の異なる 3D モデルを作成した. 図 5.2 は, 図 3.6(a) のモデルを 2 個連ねたモデルである. 図 5.2 のように, 図 3.6(a)(b) のモデルを 2, 3, 4 個連ねた 3D モデル, 計 6 種類の 3D モデルを新たに作成した. 計測に関するパラメータは表 5.1 のとおりに, その他条件は第 4 章と同様に設定した. 以上の各条件で計測位置を導出し, 計算時間を算出・比較した.

各モデルに対する計算時間を図 5.3, 5.4 に示す. 両図から, 計測位置導出の計算量はおおよそ $O(n^{3.3})$ となり, 概算よりもやや大きな値が得られた. この結果から, 大規模な設備に対しては経路計画のために膨大な計算時間が予測される. 実在する設備には, 瀬戸大橋のように全長が 10km 近くに及ぶものも存在する. そのような設備に対して経路計画する際は, 3D モデルを小領域に分割し, 各領域に対して手法を適用する必要がある.

5.3 実験計画

第 4 章のシミュレーションにて, 計画された経路を UAV が誤差なく追従し, 計測位置にて指定された方向に誤差なくカメラを向けて撮影することで, 対象設備全表面領域の画像データを所望の精度で収集可能であると示された. 一方, 実環境・実機においては, 様々な要因から機体の位置に誤差が発生する. この場合, 計測位置

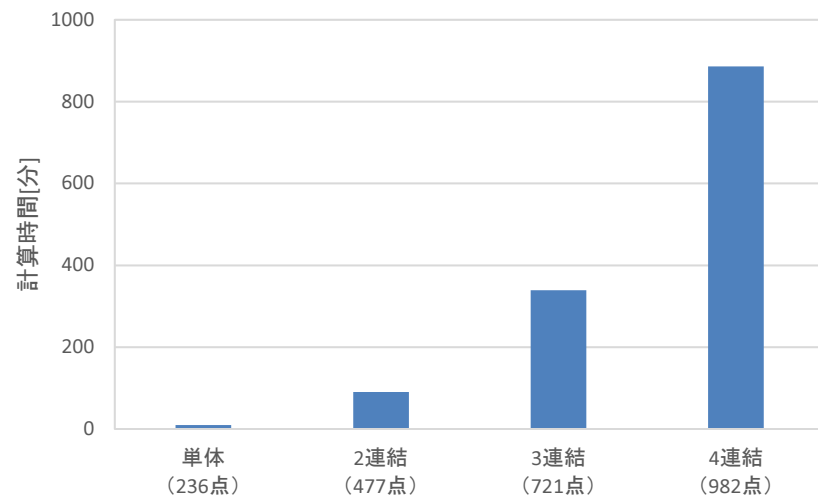


図 5.3. 3D モデルの規模と計算時間の比較（桁橋）

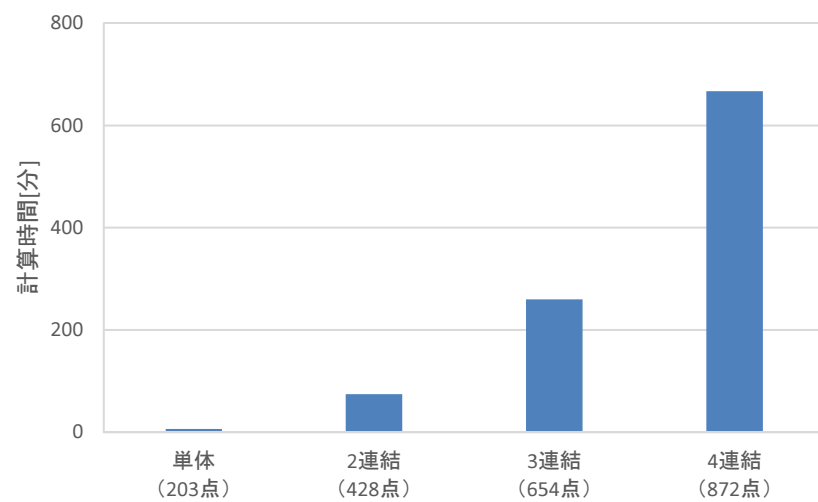


図 5.4. 3D モデルの規模と計算時間の比較（アーチ橋）

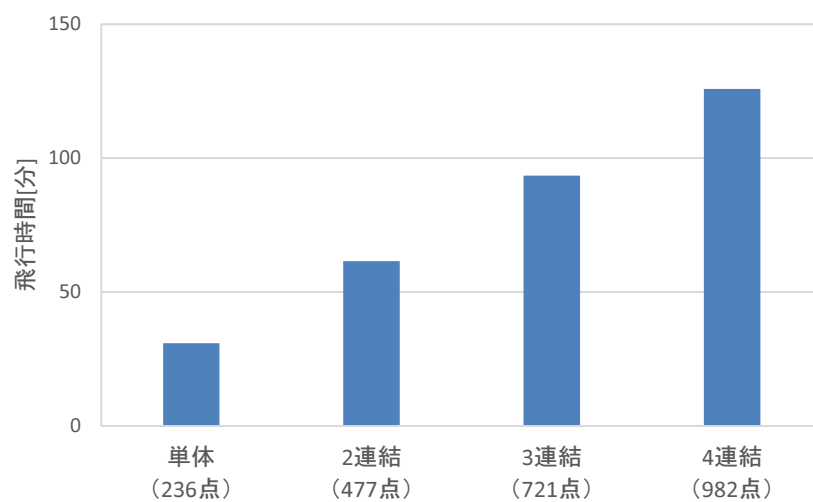


図 5.5. 3D モデルの計測に要した時間の比較（桁橋）

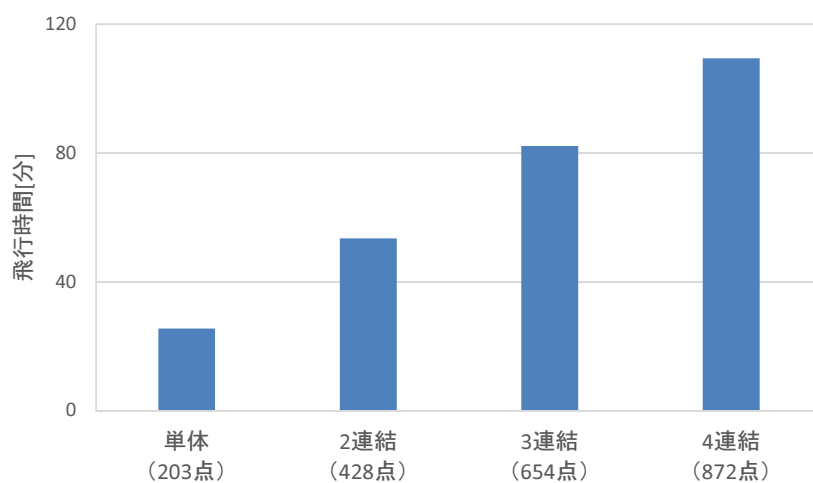


図 5.6. 3D モデルの計測に要した時間の比較（アーチ橋）

から本来計測すべき領域を計測できない、また、カメラと対象表面が遠ざかったことにより所望の精度で計測できない恐れがある。そこで、位置誤差が発生する環境において提案手法の有効性を検証する実験に取り組む。なお、実環境では位置だけでなく、UAVの姿勢やジンバルの角度にも誤差が生じる。本章では初期検討として、姿勢・角度誤差の影響が少ない条件で検討を進める。

検証実験の実施計画を立てる。実環境において経路計画や計測タスクに影響を及ぼし得る問題を予測・検証する。その後、まずは理想的な条件から始め、徐々に実際の点検作業に近づけるように段階的に実験内容を検討する。

5.3.1 実環境における検証実験のロードマップ

図 1.4 に示す自律移動システムを考える。UAVの定位に関する要素技術は、大きく「センシング」、「位置推定」および「機体制御」に分けられる。UAVの位置誤差を検討するにあたって、これらの要素技術の影響を切り分けて考える。ここで、位置推定性能が定位に与える影響を考える。例として、UAVがある計測位置 p に定位する動作を挙げる。UAVは自身の位置を推定して p との差を把握し、機体を制御して自身を p に近づける。自身の位置を正確に推定できれば、適切な制御量・操作量を算出して機体を p 付近に移動させられる。一方、位置推定が困難な場合は、自身の位置と p の差を把握できない。そのため、適切な制御量・操作量を算出できず、定位の精度が大きく低下する。従って、位置推定およびそのためのセンシングの性能は自律移動システム全体への影響が大きいと考えられる。

前述の検討を基に、実機実験に関する計画を立てる。初めに、理想的なセンシング・位置推定が可能と考えられる環境にて、機体制御に起因する位置誤差が計測タスクに与える影響を検証する。これによって、少なくとも、センシング・位置推定が容易な環境において計測タスクを達成可能かどうかを明確にする。次に、センシング・位置推定に起因する位置誤差が計測タスクに与える影響を検証する。この検証においてはUAVの定位が不安定になりやすく、予期せぬ動作によって周囲に危険を及ぼす恐れがある。そのため、まずは実環境を模擬した小規模な実験環境を屋内に構築し、周囲への影響を最小限に留めた上で実験を行う。その後、実際の計測タスクと同等の規模・条件で実験を行う。以上から、本章では実機実験を大きく3つのステップに分けて検討・実施する。

実環境における検証実験のロードマップを図 5.7 のように定める。実験の各段階において、対処すべき問題に従って経路を計画・修正、UAVの自律移動システムを改良し、検証実験を実施する。

実験 1. 安定した自己位置推定が可能な環境での平面形状領域の計測

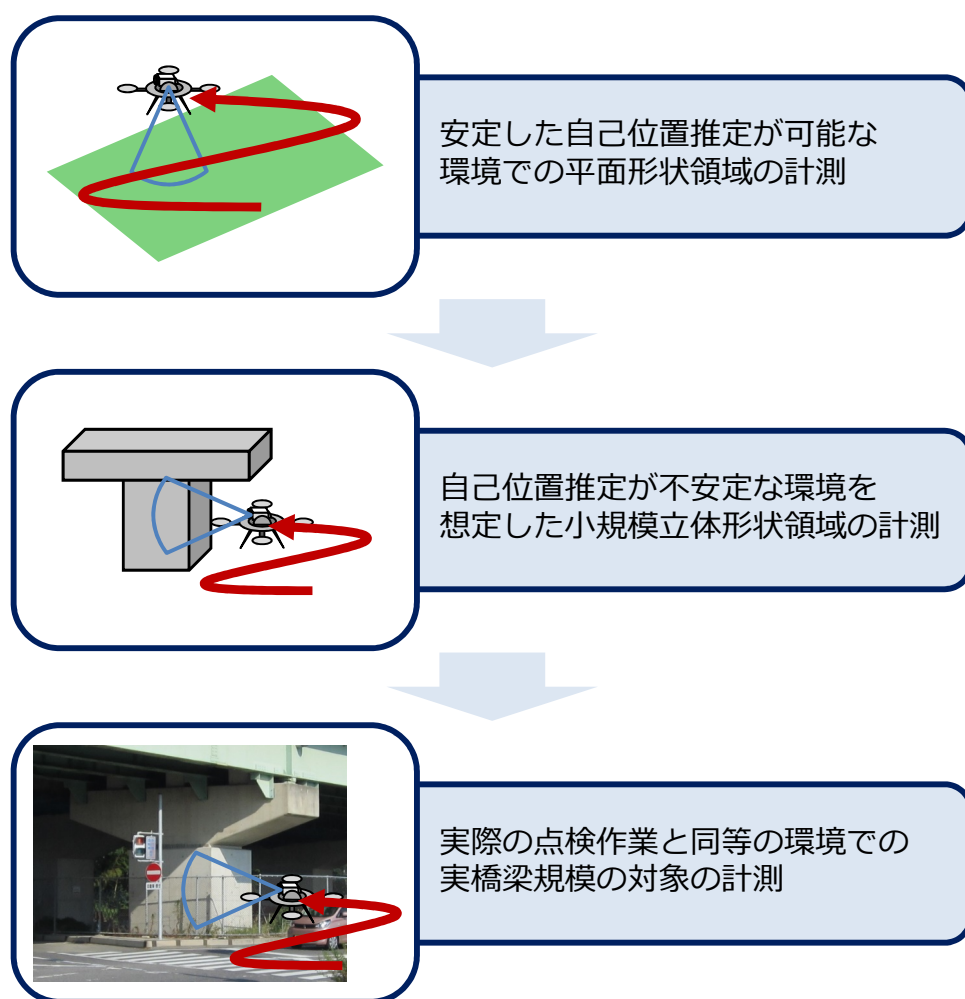


図 5.7. 実環境における検証実験のロードマップ

センシング・位置推定が理想的に行えるとみられる環境の下、機体制御に起因する位置誤差の影響を検証する。一方、実環境・実機においては、理想的な環境においても位置推定に誤差が生じる。例えば、GNSSを用いた自己位置推定では、衛星からの電波を良好に受信できる環境においても数 m 程度の誤差が発生し得る。そこで、以下の2段階に分けて実験を行う。

- 実験 1-1：理想的な UAV を想定した検証実験

カメラを持った実験者を UAV に見立てて計測実験を行う。屋内に平面形状の計測対象領域を設定する。外部カメラを用いた計測用カメラの位置推定システムを構築し、環境中で発生する位置誤差を把握する。把握した位置誤差を考慮して経路を計画する。実験者がカメラを持ち、経路に追従させながら対象領域を計測させる。

- 実験 1-2：UAV 実機を用いた検証実験

遮蔽物が存在せず、衛星信号を遮断・マルチパスなく受信できる環境に、平面形状の計測対象領域を設定する。実験環境にて事前に UAV を飛行させ、環境中で発生する位置誤差を把握する。把握した位置誤差を考慮して経路を計画・修正する。経路に従って UAV を飛行、対象領域を計測させる。

いずれの実験においても、収集画像および諸データから提案手法の有効性を検証する。

実験 2. 自己位置推定が不安定な環境を想定した小規模立体形状領域の計測

センシング・位置推定に起因する位置誤差の影響を検証する。実環境での実橋梁規模の実験の前段階として、屋内に作成した小規模な環境にて実験を行う。GNSSを用いた自己位置推定を模擬した位置推定が可能なシステムを環境中に構築する。また、橋梁を模した実物モデルを環境中に設置する。GNSSを用いた自己位置推定が困難と考えられる領域においても UAV が飛行可能となるように、位置推定を補助するシステムを構築する。実験 1 と同様に、機体制御に起因する位置誤差を考慮して経路を計画する。経路に従って UAV を飛行、対象領域を計測させ、収集画像および諸データから提案手法の有効性を検証する。

実験 3. 実際の点検作業と同等の環境での実橋梁規模の対象の計測

実験の最終段階として、実際の計測タスクと同等の規模・条件で実験を行う。実橋梁と同等の規模を持つ構造物を計測対象とする。実験 2 と同様に、GNSSを用いた自己位置推定が困難と考えられる領域における位置推定を補助する

システムを構築する。実験 1 と同様に、機体制御に起因する位置誤差を考慮して経路を計画する。経路に従って UAV を飛行、対象領域を計測させ、収集画像および諸データから提案手法の有効性を検証する。

以降では、各段階に関する実際の取り組み、計画・見通しを述べる。

5.4 実験 1-1：理想的な UAV を想定した検証実験

実環境における検証実験の初期段階として、UAV の定位をできる限り理想化した条件で計測実験を行う。カメラを持った実験者を UAV に見立て、屋内の平面領域を計測する。

5.4.1 実験条件

実験環境は名古屋大学構内の輪講室（図 5.8），計測対象は輪講室内のホワイトボード（図 5.9, 3.56m × 1.16m）とした。計測用カメラは HERO 4（GoPro 社）を用いた。画像データの要求精度は $S_{pxl} = 0.2[\text{mm}]$ とし、表 5.3 のとおりに各パラメータを設定した。

本実験では定位を可能な限り理想化させるため、実験者がカメラを持って経路に追従させながら計測した。カメラの位置は、外部カメラを用いた位置推定システム [61] によって推定した。以下でシステムの概要を説明する。図 5.10 に示すように、計測用カメラには AR マーカーを印刷したアタッチメントが搭載されている。また、図 5.8 に示すように、環境中にも AR マーカーを設置した。環境中に固定された外部カメラから環境全体を撮影し、得られた画像データから計測用カメラ-環境間の相対位置を推定する。実験者は、位置推定結果を参考に、環境中に定義された経路に追従しながら各計測位置にて計測用カメラで画像データを収集する。収集された画像データから計測範囲内の領域を抜き出した。全計測位置から収集されたデータを解析し、計測対象全領域の所望の精度での計測の成否を評価した。

5.4.2 位置誤差への対処

前述の位置推定システムの推定精度を検証する。図 5.11 に、実験環境中の 45 点で位置推定した際の誤差の分布を示す。各点における真の位置はレーザー距離計 DISTO S910（Leica 社）を用いて取得し、システムから得られた推定位置と比較した。DISTO S910 の主な性能を表 5.2 に示す。本条件においては、位置誤差の最大値、最小値、平均値はそれぞれは 28.39cm, 2.18cm, 13.07cm であった。本節の冒



図 5.8. 実験環境（輪講室）



図 5.9. 計測対象のホワイトボード

表 5.2. DISTO S910 の仕様

測距精度	$\pm 1.0\text{mm}$
垂直方向精度	$\pm 0.1^\circ$
垂直方向精度	$\pm 0.1^\circ$



図 5.10. AR マーカーを搭載した HERO 4

頭で例に挙げた GNSS を用いた自己位置推定と比較して，極めて高い精度で定位が可能である．

上記の位置誤差への対処法を検討する．前述のとおり，UAV に位置誤差が発生した場合には，本来計測すべき領域を計測できない，所望の精度で計測できない恐れがある．一方，作業環境で発生する位置誤差が事前に把握できる条件においては，経路計画段階で位置誤差を計測に関するパラメータに反映可能と考えた．そこで，位置誤差が UAV と計測対象の位置関係に与える影響を考慮して経路を計画する．以降では，UAV に発生する位置誤差を，計測対象表面と水平・垂直な成分に分けて検討する．

計測対象表面と水平な位置誤差

計測対象表面と水平に位置誤差が発生した場合，本来計測すべき領域から平行移動された領域が計測される．誤差が発生する方向が一定であれば計測位置の座標をオフセットすればよいが，この方法は水平面上のあらゆる方向に発生する誤差には対処できない．そこで，予測される位置誤差量だけ縮小された計測範囲（図 5.12）を定義して経路計画を行う．水平方向の位置誤差許容量

表 5.3. 計測に関するパラメータ（実験 1-1）

S_{pxl}	D	r_o	h_o	α_t
0.2mm	70.0cm	45.9cm	4.59cm	0.0°

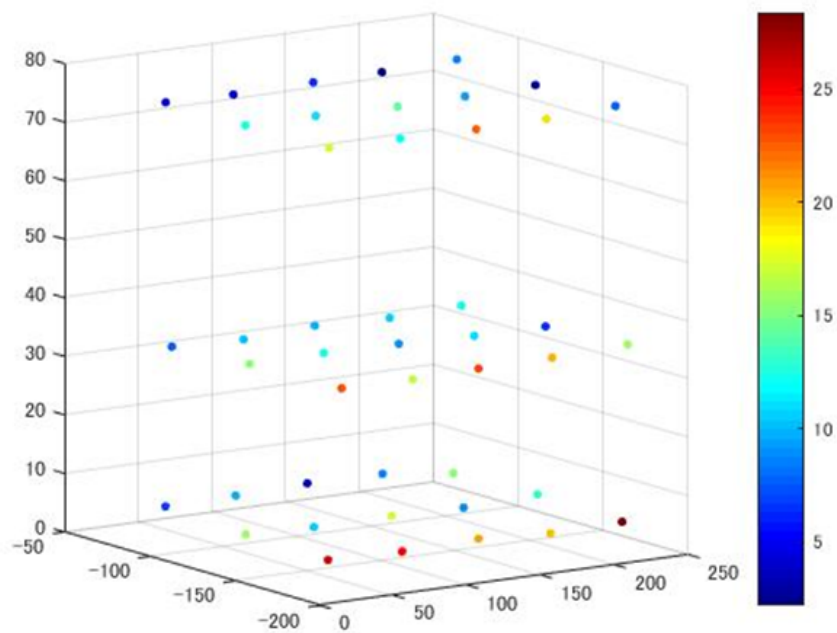


図 5.11. 誤差分布（単位：cm）

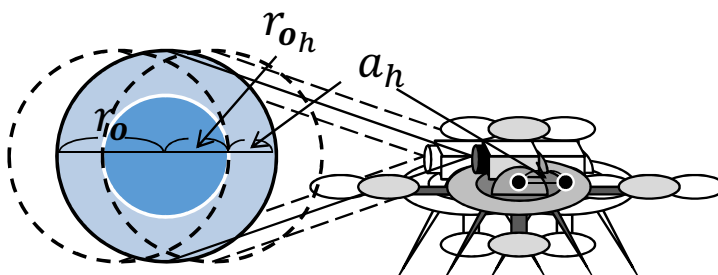


図 5.12. 水平方向の位置誤差への対処

a_h を設定し，位置誤差を許容した計測範囲の赤道半径を $r_{oh} = r_o - a_h$ で求める．発生した位置誤差が a_h 以下の場合，赤道半径 r_{oh} の範囲は計測可能であり，全領域の計測が保証される．

計測対象表面と垂直な位置誤差

計測対象表面と垂直に発生する位置誤差を，表面に近づく場合と表面から離れる場合に分けて検討する．

表面に近づく場合，実際の計測において D が縮小される．これによって式 (3.7) における r_c ，すなわち r_o も縮小され，実際に計測される範囲が狭まる．そこで，予測される位置誤差量に応じて縮小された計測範囲を定義して経路計画を行う．水平方向の位置誤差許容量 a_v を考慮した赤道半径 r_{ov} は式 (5.1) で求められる．

$$r_{ov} = \frac{D - a_v}{F} \times \frac{L_v}{2} \times c_d. \quad (5.1)$$

表面から離れる場合，収集画像中の1画素当たりの実サイズが大きくなるため，収集画像全体が無効なデータとなる．これを防ぐために，予測される位置誤差量だけ計測距離を縮小して計測範囲を決定する．水平方向の位置誤差許容量 a_v を考慮した計測距離を， $D_a = D - a_v$ で求める． D_a を基に他のパラメータを設定することで，要求精度を確実に保持可能な経路を計画できる．

以上の検討を基に計測条件を再考する．本実験において，計測対象の形状は平面であり，カメラは対象と一定距離を保って移動する．これに加えて，カメラを移動させるのは人間であり，環境中の特徴から対象と垂直な方向に関しては人間側で高精度に位置合わせが可能と考えられる．そのため，本実験においては水平方向の誤差のみを考慮して計測条件を定式化する．本位置推定システムにおける位置誤差の平均値は 13.07cm である．この数値から， a_h を 13.07cm，26.14cm に設定して計測条件を定式化した．また，比較対象として， a_h を 0.00cm とした数値も算出した．以上の各条件において経路を計画し，経路に沿った計測の結果を比較した．

表 5.4. 計測失敗領域の割合 (実験 1-1)

a_h [cm]	0.00	13.07	26.14
計測失敗領域 [%]	6.86	0.00	0.00

5.4.3 実験結果

各条件における経路計画結果を図 5.13 に示す. 緑色のポリゴンは計測対象領域, 橙色の点は計測位置である. 位置誤差を考慮した場合には計測範囲が縮小され, 計測位置がより多く導出された. 各計測位置から収集した画像中の有効なデータの範囲を図 5.14 に示す. 緑円の範囲が, 有効なデータとして抽出された. 図 5.14 に従って, 有効な画像データを収集できた領域を図 5.15 に示す. 白領域は, 本来計測されるべきであったが計測されなかった領域である. 各条件における計測漏れ領域の割合を表 5.4 に示す. 図 5.15, 表 5.4 より, 位置誤差を考慮して計測条件を定式化することで, 全領域を計測可能となることが示された.

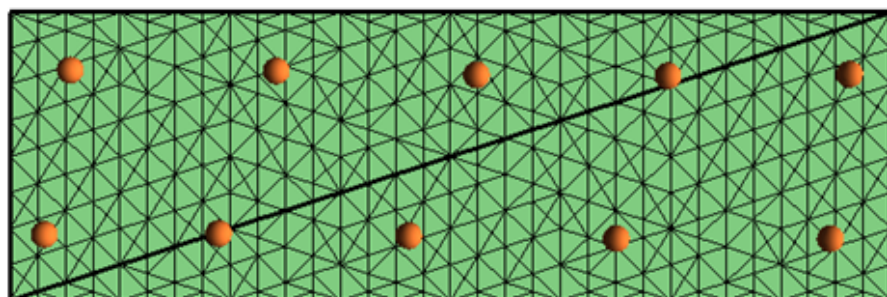
以上より, UAV の定位をできる限り理想化した条件においては, 本手法によって所望の計測タスクを達成可能な経路を計画できることを確認できた.

5.5 実験 1-2 : UAV 実機を用いた検証実験

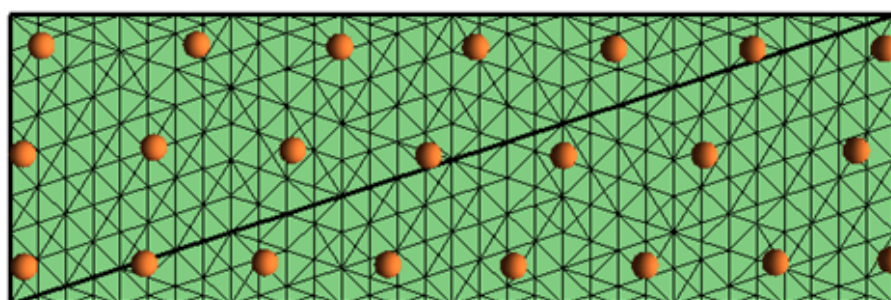
実験 1-1 にて実環境での基礎的な有効性を確認できた. 本節では UAV 実機を用いた, より実際の点検作業に近い条件での検証実験について述べる.

5.5.1 使用する UAV

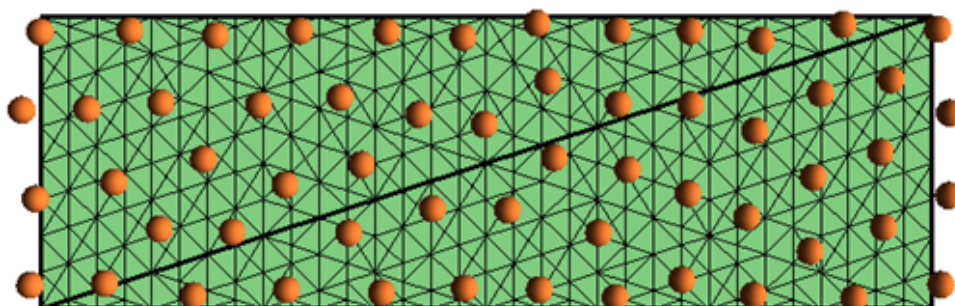
本節の検証実験において, UAV 本体は S1000+, フライトコントローラは A3 (どちらも DJI 社) を用いた. A3 には, 水平・鉛直方向の位置推定のためにそれぞれ GNSS・気圧計が内蔵されている. 前述のとおり, GNSS を用いた自己位置推定では数 m 単位で誤差が発生する. また, 気圧計を用いた高度推定は, 高精度な推定が困難である, 気圧の変化に大きく影響されるといった問題を持つ. そのため, 上記の機器の組み合わせではインフラ設備点検において求められる計測タスクの達成は困難と考えられる. 本実験では初期検討として, 一般に入手可能な UAV でどの程度計測タスクを達成可能か検証する.



(a) a_h : 0.00cm (計測位置数 : 10)



(b) a_h : 13.07cm (計測位置数 : 22)



(c) a_h : 26.14cm (計測位置数 : 58)

図 5.13. 計測位置 (実験 1-1)

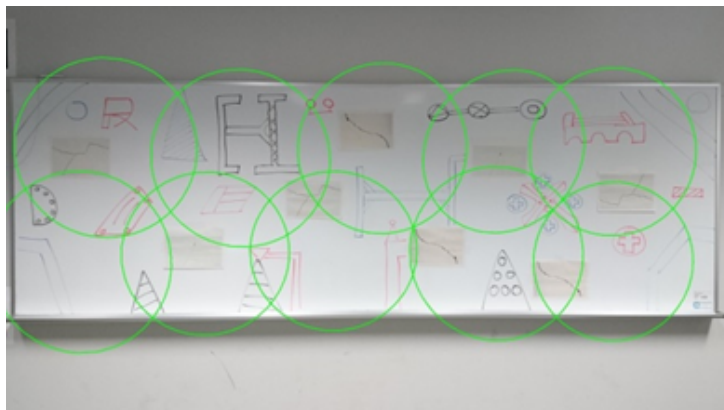
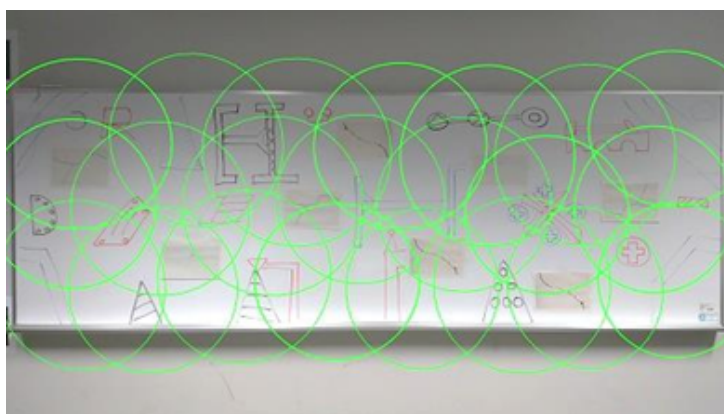
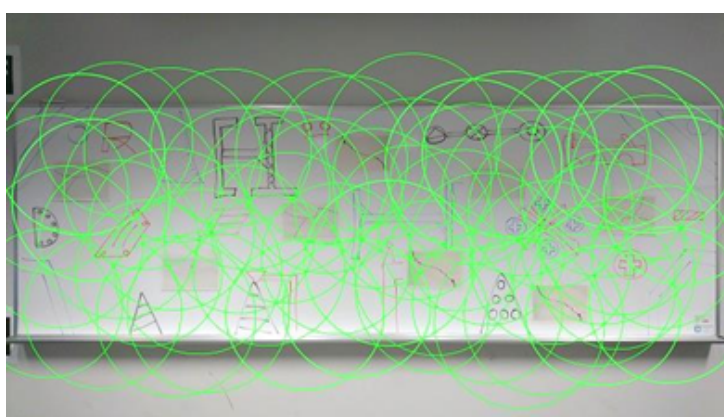
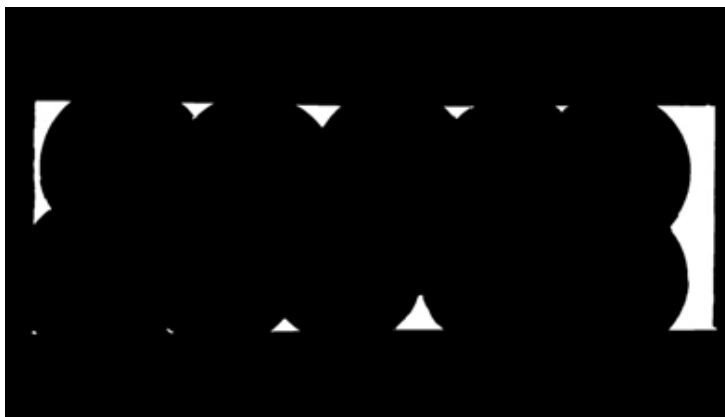
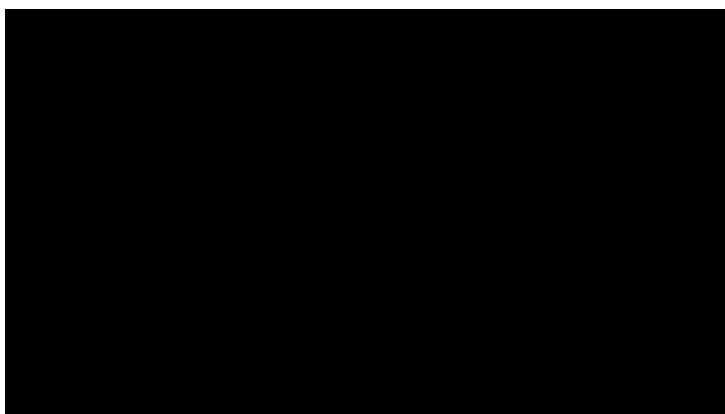
(a) $a_h : 0.00\text{cm}$ (b) $a_h : 13.07\text{cm}$ (c) $a_h : 26.14\text{cm}$

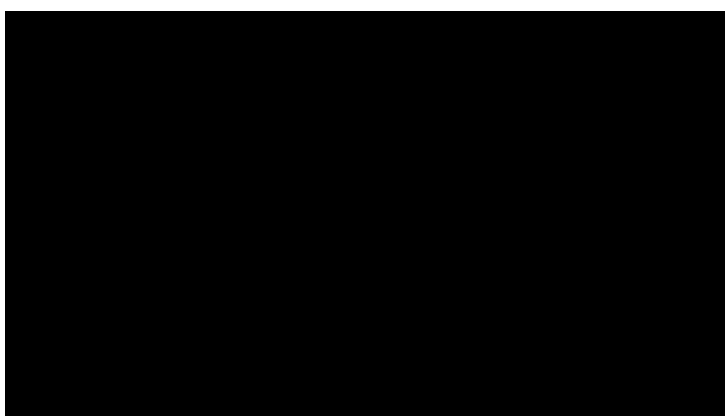
図 5.14. 画像データが収集された範囲 (実験 1-1)



(a) $a_h : 0.00\text{cm}$



(b) $a_h : 13.07\text{cm}$



(c) $a_h : 26.14\text{cm}$

図 5.15. 解析結果（実験 1-1）

5.5.2 実機に発生する位置誤差

検証実験にあたり、実験環境にて実機に発生する位置誤差を検討した。位置誤差が発生する原因は大きく分けて、機体制御性能に起因する誤差、センシング・位置推定に起因する誤差と考えられる。以降で、それぞれの誤差の解析および誤差への対処法を述べる。

機体制御性能に起因する誤差

まず、機体制御性能に起因する位置誤差を検討するための予備実験を実施した。図 5.16 に、実験の様子を示す。実験環境は、愛知工業大学構内の広場とした。実験当日の天気は晴れ、飛行中の風速は最大で 4.3m/s であった。ホバリングの指令に従って飛行中の UAV の位置を DISTO S910 で測定し、得られたデータから位置誤差を解析した。実験の大まかなフローは以下のとおりである。

1. UAV を所定の位置、レーザー距離計を UAV から南へ 10m 離れた位置に設置する。
2. UAV を離陸させ、地上 5m の位置でホバリングさせる。UAV が所定の高度へ達したら、レーザー距離計を用いて UAV の位置を測定する。
3. UAV が所定の高度へ達してから 1 分が経過したら、UAV を着陸させる。以上のフライトを数回繰り返す。

実験で収集された位置データの解析法を述べる。ある 1 フライトにおいて 1 番目に測定された UAV の位置を基準位置とする。2 番目以降に測定された位置に関して、基準位置との南北方向（正：南方向）、東西方向（正：東方向）、鉛直方向（正：鉛直上方向）の距離の差を求める。以上を全フライトのデータについて行い、得られた距離の差、すなわち位置誤差を各方向ごとに解析する。

図 5.17 に、本実験で得られた全ての UAV の位置を示す。各軸は各方向、赤点は測定された UAV の位置を示す。なお、基準位置は南北方向 = 0[m]、東西方向 = 0[m]、鉛直方向 = 0[m] の座標にある。本実験では、12 回のフライトで 123 点を測定できた。図 5.17 の各位置を解析した結果を図 5.18 に示す。横軸は各方向、縦軸は正負を考慮した位置誤差の平均、棒上の黒線は標準偏差をそれぞれ示す。図 5.18 に見られるように、本実験の条件においては、UAV に発生する位置誤差は特定の方向に偏らず、ランダム性が強いという結果が得られた。また、環境に対して垂直方向（鉛直方向）の誤差は水平方向（南北、東西方向）よりも小さくなることが分かった。



図 5.16. 位置誤差測定実験の様子

以上の誤差への対処法を検討した．南北，東西方向の位置誤差の標準偏差はそれぞれ0.264m，0.255mであった．これらの数値の二乗和平方根から，環境中の水平方向においては0.367mまでの位置誤差が頻出すると仮定した．また，垂直方向に関しては水平と比べて位置誤差が小さく，実計測においては無視できると考え．以上より， a_h を0.0cm，18.4cm，36.7cmとして，それぞれ経路計画した．

センシング・位置推定に起因する誤差

次に，センシング・位置推定に起因する位置誤差を検討するための予備実験を実施した．S1000+は，GNSS，気圧高度計，IMUを用いて自己位置を推定する．これらの装置の中で，位置推定性能に関してはGNSSが支配的であると考えた．そのため，GNSSによる位置推定性能を検証する予備実験を行った．

実験の概要を以下で述べる．Google Mapsを用いて環境中のある地点の緯度・経度を記録し，真の値とする．その後，実際の環境にてUAVやタブレットを用いて緯度・経度を測定し，真の値と比較した．以上の実験を，名古屋大学構内の第三グリーンベルト，豊田講堂前の広場，愛知工業大学構内の広場のそれぞれ複数の地点に対して行った．

結果の概要を説明する．測定値と真の値の誤差は，各環境，各時間帯で大きく異なっていた．そのため，機体制御性能に起因する誤差のようにモデル化し，経路計画段階で影響を組み込むことは困難であると判断した．そこで，計測実験におけるフライト前に経路を修正するという対策をとった．環境内にあら

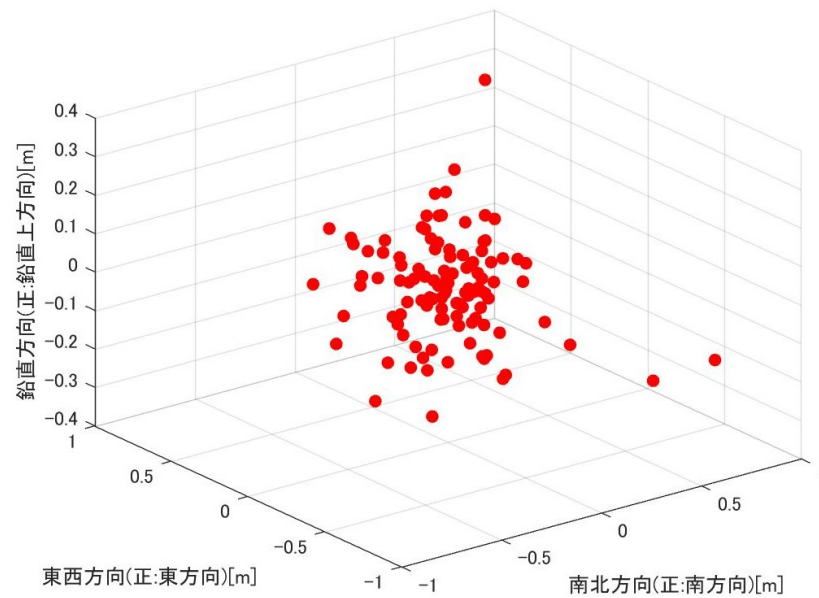


図 5.17. 計測された UAV の座標

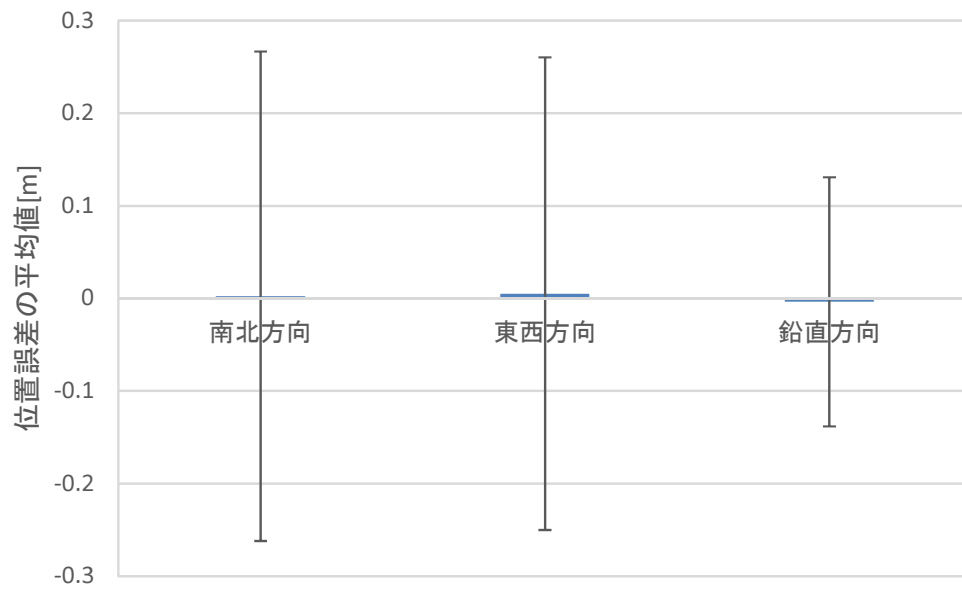


図 5.18. 位置誤差の解析結果

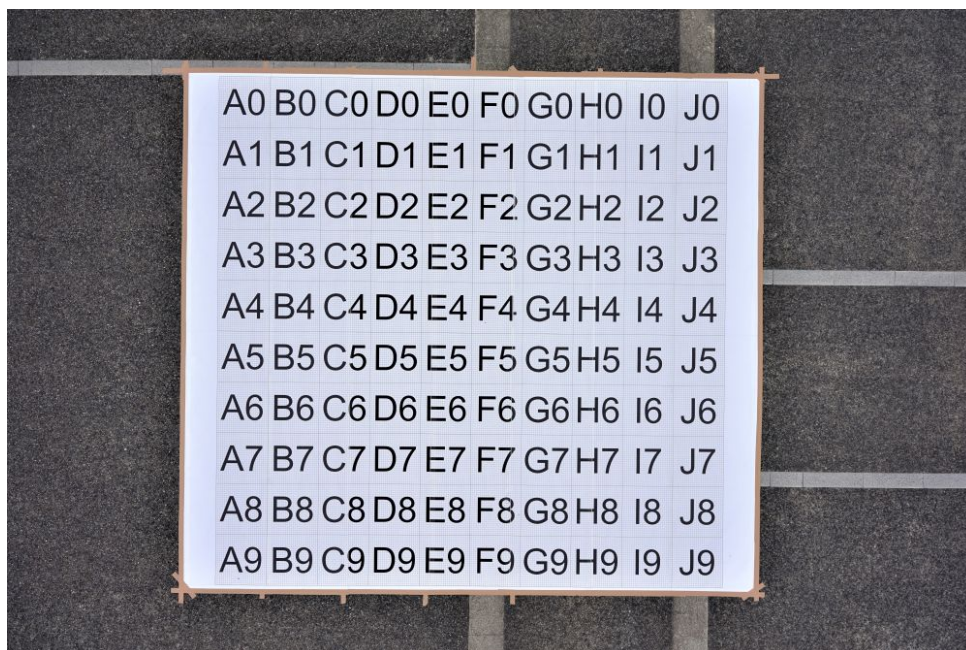


図 5.19. 計測対象の平面領域

はじめ基準点を定め，Google Maps を用いて緯度・経度の真の値を記録する．フライト前に基準点で緯度・経度を測定し，真の値との誤差を算出する．算出された誤差を基に，計画された経路をオフセットする．オフセットされた経路に追従することで，指定された領域を大きく外れることなく飛行できると考えた．

5.5.3 実験条件

予備実験の結果を考慮して計測実験を実施した．実験環境は名古屋大学豊田講堂前の広場，計測対象は $5\text{m} \times 5\text{m}$ の平面領域（図 5.19）とした．計測用カメラは α -7R を用いた．ただし，第 3，4 章と異なり，レンズの焦点距離は 35mm とした．UAV に対し，図 2.4 に示す z_u 正方向に固定してカメラを搭載した．画像データの要求精度は $S_{\text{pxl}} = 0.5[\text{mm}]$ とし，表 5.5 のとおりに各パラメータを設定した．本実験では UAV を完全に自律飛行させることができなかったため，SDK を用いて人間による操縦を補助するアプリケーションを作成した．このアプリケーションは，フライト前に計画された経路を読み込む．フライト中に移動の指令を与えると，経路上で次に到達すべき計測位置まで飛行し，計測位置にて計測の指令を与えて画像データを収集する．これを，全計測位置で計測するまで続ける．実験中の様子を図 5.20 に示す．

表 5.5. 計測に関するパラメータ (実験 1-2)

S_{pxl}	D	r_o	h_o	α_t
0.5mm	3.58m	1.11m	0.111m	0.0°

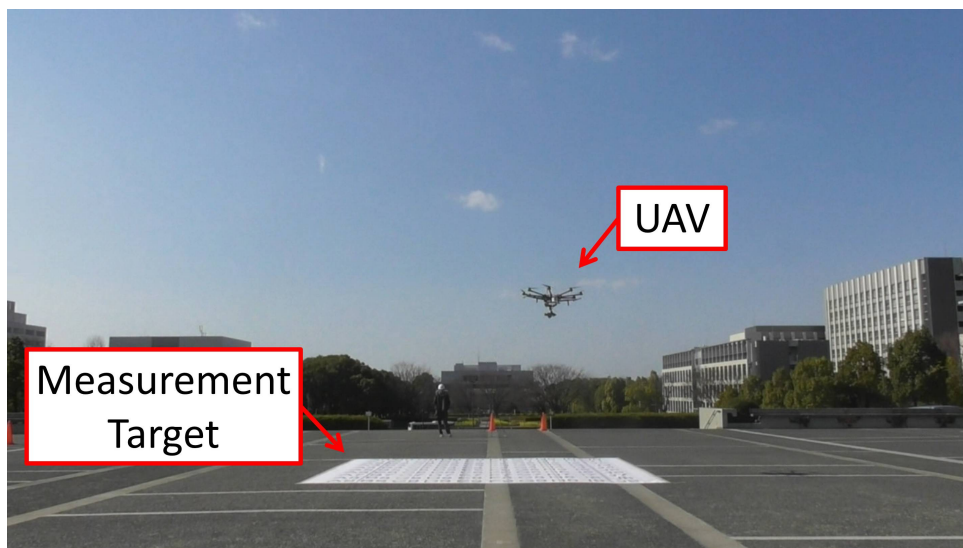


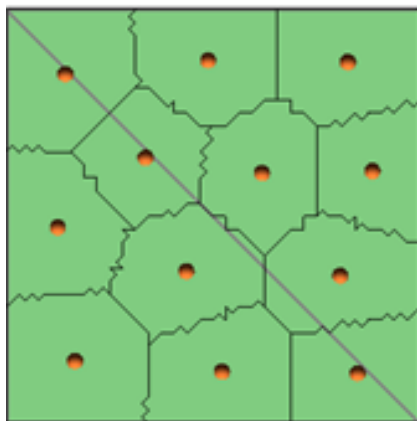
図 5.20. 計測実験の様子

5.5.4 実験結果

各条件における経路計画結果を図 5.21 に示す。緑色のポリゴンは計測対象領域、橙色の点は計測位置である。実験 1-1 と同様に、 a_h を考慮した計測位置が導出された。各フライトで収集した画像データから計測範囲内の領域を抽出して並べた結果を図 5.22 に示す。青領域は、本来計測されるべきであったが計測されなかった領域である。各条件における計測漏れ領域の割合を表 5.6 に示す。実験 1-1 と異なり、全ての条件において計測漏れが発生した。

図 5.22 を見ると、実際に計測された範囲が計測対象とした範囲と比較して一定方向にずれていたことが分かる。フライト前に GNSS に起因する位置誤差を測定して経路を修正したものの、フライト中に誤差の大きさ・方向が変化したため、所望の領域周辺を飛行できなかったと考えられる。従って、実環境で実機を用いて所望の計測タスクを達成するためには、センシング・位置推定性能の向上が必要である。

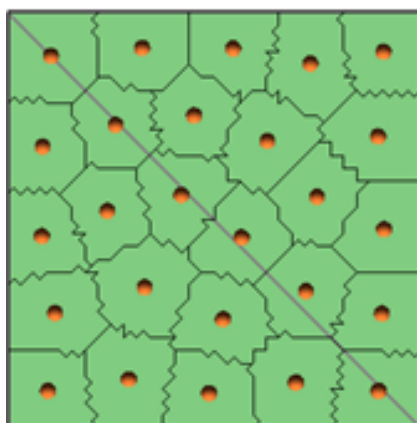
また、図 5.22(a), (c) を見ると、収集された各画像において計測範囲に収まった領域の大きさが変化していたことが分かる。原因は、高度方向に累積した位置誤差であった。図 5.23 に、実験中の UAV の高度に関する内部ログを示す。横軸はフライト開始からの経過時間、縦軸は高度を示す。図 5.23 に見られるように、高度の指



(a) $a_h : 0.0\text{cm}$ (計測位置数 : 12)



(b) $a_h : 18.4\text{cm}$ (計測位置数 : 16)



(c) $a_h : 36.7\text{cm}$ (計測位置数 : 26)

図 5.21. 計測位置 (実験 1-2)

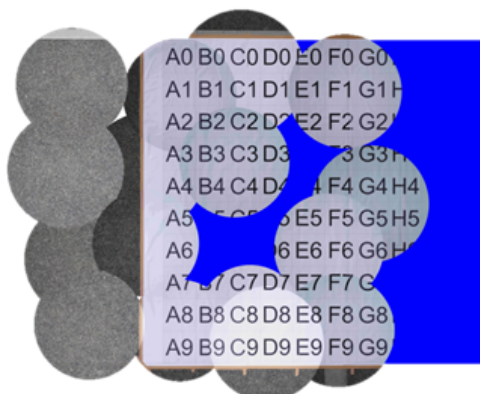
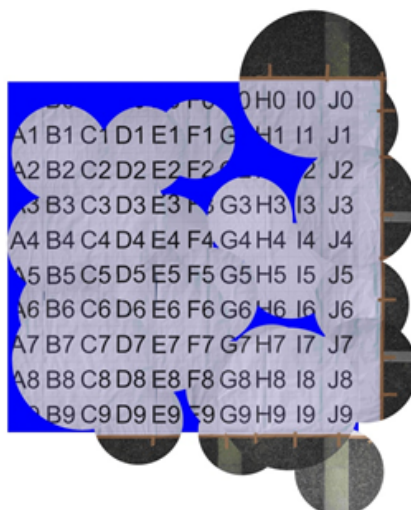
(a) $a_h : 0.0\text{cm}$ (b) $a_h : 18.4\text{cm}$ (c) $a_h : 36.7\text{cm}$

図 5.22. 計測結果 (実験 1-2)

表 5.6. 計測失敗領域の割合 (実験 1-2)

a_h [cm]	0.0	18.4	36.7
計測失敗領域 [%]	31.4	34.7	13.5

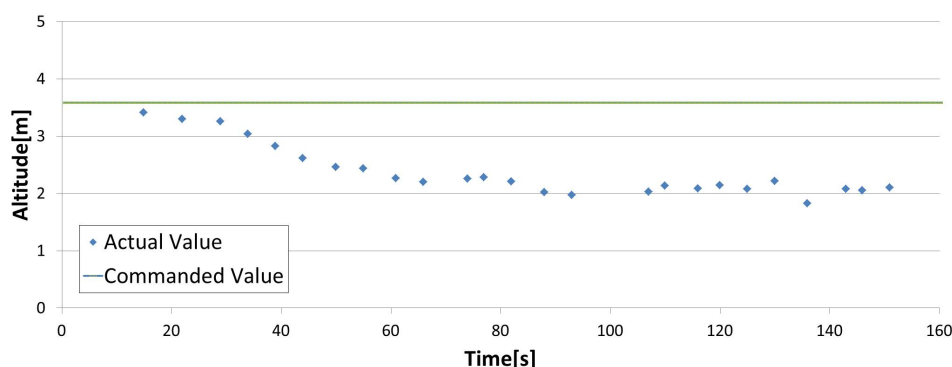


図 5.23. 高度方向の累積誤差

令値は常に 3.58m であったものの、実際の高度は時間とともに低下する傾向にあった。この高度低下は目視によっても確認できた。一方、予備実験においてこのような挙動は見られなかったため、経路計画段階で対処できなかった。高度が低下するとカメラ-計測対象間の距離 D が縮まり、式 (3.7) から導かれるように有効なデータを収集可能な範囲が狭まった。UAV 側で高度の低下を認識していたにもかかわらず高度を補正するように動作しなかったのは、制御量・操作量の算出が正しく行われなかったことが原因の可能性がある。現段階では調査が及ばないため可能性に留めるが、仮にそうであった場合には位置推定のみならず自律移動システム全体を見直す必要がある。

5.5.5 実験 1 のまとめと今後の課題

実験 1 では、センシング・位置推定が理想的に行えるとみられる環境で平面領域を計測した。実験 1-1 の結果から、UAV に発生する位置誤差を把握可能な環境においては、計画された経路に沿って飛行することで所望の計測を達成できることが示された。一方、実験 1-2 の結果から、一般に入手可能な UAV はインフラ設備点検に求められる位置制御性能を有していないことが明らかになった。この問題の解決策の一つとして、リアルタイムキネマティック GNSS (以降、RTK-GNSS) の利用が挙げられる。RTK-GNSS とは、地上に設置された基地局と移動局が受信した衛星電波から移動局の位置を推定するシステムである。RTK-GNSS の導入によって cm 単

位の精度で位置を推定でき、遮蔽物のない環境においては計測タスクを達成可能と考えられる。一方、通常のGNSSと同様に、RTK-GNSSも衛星電波の遮断やマルチパスによって位置推定が困難となるため、立体構造物付近では他の位置推定システムが必要となる。

5.6 今後の実験計画

実験1に関するこれまでの取り組みと今後の課題を述べた。以降では、実験2および実験3に関する現在の計画・展望を述べる。

5.6.1 実験2. 小規模立体形状領域の計測

センシング・位置推定に起因する位置誤差の影響の検証にあたり、まずは屋内に構築された模擬的な環境で実験する。図5.24に、現在構築を予定している実験環境のイメージを示す。本計画では、実際の橋梁点検に対しておよそ1/10の規模となる、高さ2.5m×幅3.5m×奥行き3.5mの環境を構築する。環境中央部に、橋梁を模した実物モデルを配置し、計測対象とする。UAVは、Shenzhen Ryze Technology社のTello EDUを用いる。UAVの定位のために、GNSSを用いた自己位置推定の代わりにDepthカメラを用いた位置推定システムを構築した。環境上部に複数のDepthカメラを配置し、得られた深度情報を統合してUAVの位置を推定する。このシステムは、UAVを観測可能なカメラが多いほど位置推定精度が向上する、UAVが全カメラから完全に遮蔽される領域においては位置推定が不可能であるといった、GNSSを用いた自己位置推定と似た特徴を持つ。そのため、橋梁モデルの上部構造の真下付近においては、位置推定精度が著しく低下すると予測される。

このような環境において自己位置推定のために、カメラ[62–65]やレーザ距離計[66–69]を用いた自己位置推定システムが開発されてきた。しかし、カメラは照度変化の影響を大きく受ける、レーザ距離計は機器が重い、どちらの機器においても特徴抽出が困難な領域では位置推定精度が低下するといった問題がある。そこで、本実験では、複数の位置推定補助用機体（以降、補機）を用いた位置推定手法[70]を導入する。補機群は、環境中のDepthカメラによって自身の絶対位置を、自身に搭載されたカメラによって自身とタスク遂行のための機体（以降、主機）との相対位置を推定する。その後、主機は補機群の位置情報を統合し、自身の位置を推定する。この手法により、環境内のあらゆる領域で主機の位置を推定できると考えられる。

上記位置推定システムを用いた場合の主機の定位性能を測定し、その結果を考慮して経路を計画・修正する。その後、経路に従ってUAVを飛行、対象領域を計測さ

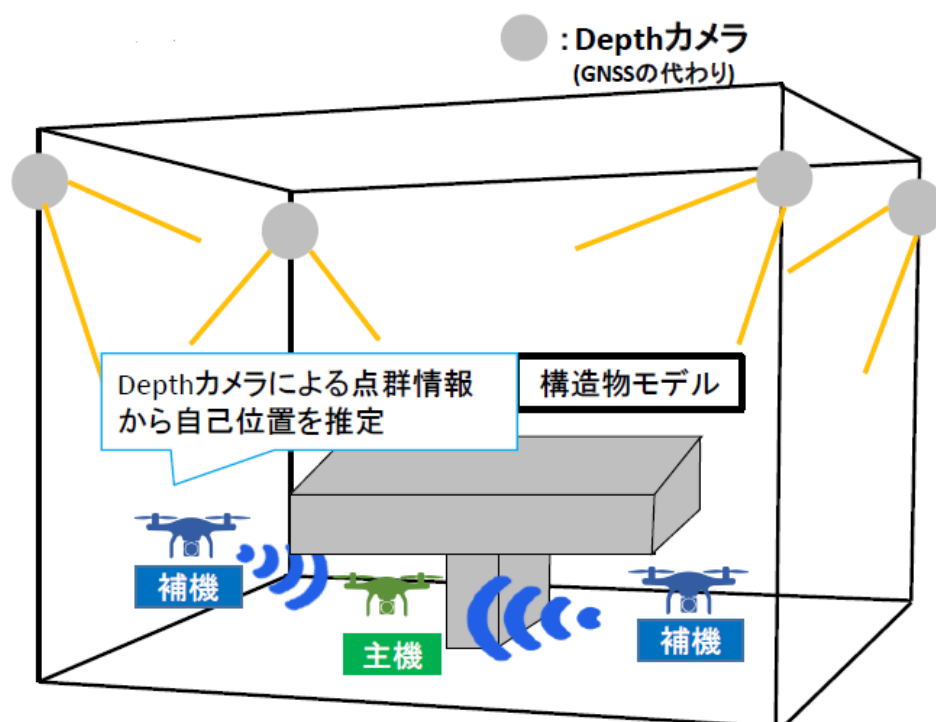


図 5.24. 構築中の実験環境

せ、収集画像および諸データから、センシング・位置推定が困難な環境における提案手法の有効性を検証する。

5.6.2 実験 3. 実橋梁規模の対象の計測

実環境での実験の最終段階として、実際のインフラ設備点検と同等の規模・条件で実験を行う。本実験は、株式会社デンソーとの共同研究の一環として実施する見通しである。図5.25に、実験を予定している環境および対象：福島ロボットテストフィールド内の試験用橋梁 [71] を示す。この試験用橋梁は、長さ 50m、道路幅 10m、桁下高 5m と、実際の橋梁と同等の規模を持つ。また、各所にコンクリートのひび割れ、鋼材の亀裂等の異常が再現されており、収集した画像データの評価に有用である。UAV は、HDC02 [23] (デンソー) の利用を予定している。この機体は、搭載されたプリズムと外部のトータルステーションを用いた位置推定システムにより、橋梁の桁下空間のような GNSS の利用が困難な環境においても安定した位置推定が可能である。また、ジンバルを介したカメラの搭載により、様々な方向からの撮影が可能である。以上の条件にて経路を計画し、経路に沿って計測を行うことによって、実際の点検と同等の環境での手法の有効性を検証する。



図 5.25. 橋梁を模した実験施設（写真：福島ロボットテストフィールド）

5.7 本章のまとめ

本章では，提案手法の社会実装に向けた取り組みについて述べた．提案手法の社会実装のために，計算量の明確化と実環境での検証実験に着手すべきと判断した．手法の計算量について，計測位置導出に要する計算量を明確化し，大規模な設備へ手法を適用する目途が立った．実環境での検証実験について，実規模の環境での有効性の確認までのロードマップを作成した．また，UAV の定位をできる限り理想化させた条件にて所望の計測タスクを達成可能であることを確認した．

社会実装のためには，センシング・位置推定性能を考慮した条件での検証実験が必要である．今後は，橋梁点検現場を模した小規模および実際の点検と同等規模の環境での検証実験に取り組む．

第6章

結論

本章では，本研究で得られた成果をまとめ，今後の課題について述べる．

6.1 本研究の成果

本研究では，インフラ設備の長期安全利用に向けた維持管理作業効率化のための，UAV を用いたインフラ設備自動点検システムの実現を目指している．UAV に関する技術課題の中でも計測タスク達成のための経路の計画に着目した．計測タスクは単純な点間の移動とは異なるタスクであり，旧来一般的であった経路計画法を直接適用できない．インフラ設備点検および立体構造物計測のための経路計画に関する従来研究では，計測のためのウェイポイント導出とウェイポイント巡回順決定に落とし込んで問題を解いていた．一方，これらの手法は収集データの精度に関する検討が不十分であり，所望の精度で計測できない恐れがあった．そこで，本研究では，対象設備全表面領域の画像データを所望の精度で収集するための経路計画問題に取り組んだ．ウェイポイント導出において対象設備と UAV の位置関係を厳密に検討することで，所望の精度を保持して計測が可能であると考えた．

経路計画法の確立のために，以下のような活動を行った．

問題設定

経路計画問題を解くにあたって，取り扱う問題と必要な事前情報を明確にした．ひび割れやさびを検出する近接目視点検の代替を目的とし，収集データは一定精度以上の画像データとした．必要な事前情報として，対象設備の形状，画像データの要求精度，機器の性能・制約を設定した．対象設備の形状は，StL ファイル形式の 3D モデルを用いる．画像データの要求精度は，検出すべき異常と使用する異常検出技術に基づいて決定する．UAV は，ジンバルを介してカメラを搭載したマルチロータ型の機体を想定する．

以上の前提から，対象設備全表面領域を一定精度で効率的に計測するためのウェイポイント（計測位置）を導出し，計測位置の巡回順を決定することで，所望の計測タスクを達成するための経路を計画できると考えた．

経路計画法

問題設定・事前情報を基に，経路計画法を提案した．まず，要求精度とカメラの仕様を基に計測要件を定式化する．一定精度を保持して計測可能な対象設備表面からの距離（計測距離）と，その時データ収集可能な範囲（計測範囲）を定義する．計測範囲形状を考慮して，StL ファイルを構成するポリゴン群を分割・クラスタリングにより再構成し，各クラスタに対して計測位置を導出する．その後，対象設備との衝突の回避，飛行時間最短化を考慮し，計測位置の巡回順を決定する．以上の手順で計画された経路に沿って飛行することで所望の計測タスクを達成可能であることをシミュレーションにて確認した．

社会実装を想定した評価・検証

提案手法の社会実装に向けて解決すべき課題を図5.1のように設定した．その上で，本研究にて取り組む課題を，大規模設備に対する手法の適用のための検討，実環境における手法の有効性の確認とした．

規模の異なる3Dモデルに対して経路計画し，計測位置導出法の計算量を明確化した．その後の検討によって，大規模設備に対する手法の適用可能性を示した．

提案手法の有効性を実環境で確認するための実験ロードマップを作成した．UAVの自律移動技術や周辺環境が計測タスクに及ぼす影響を考え，3つの段階に分けて実験を計画した．まずは，理想的なセンシング・位置推定が可能と考えられる環境での平面領域を対象とした計測実験に取り組み，2つの実験を実施した．

1つは，UAVの自律移動をできる限り理想化した環境での計測実験である．屋内に実験環境を構築し，人間がカメラを移動させて平面領域を計測する．環境中の位置推定システムの精度を考慮して，発生が予測される位置誤差に対処した経路を計画した．誤差の考慮によって，対象全領域を計測可能であると確認できた．

もう1つは，UAV実機を用いた屋外環境での計測実験である．UAVに発生する誤差を機体制御に起因する成分とセンシング・位置推定に起因する成分に分けて検証した．機体制御に起因する誤差は前述の実験と同様に，センシング・位置推定に起因する誤差はフライト前の誤差計測と経路のオフセットで対処し

た．計測実験の結果から，センシング・位置推定が容易と考えられる環境においても，定位のために経路計画以外で対処が必要であると結論付けた．

6.2 今後の課題

これまでに，タスク達成のための経路計画法を提案し，大規模設備に手法を適用する際の計算量について検討した．加えて，実環境での検証実験のためのロードマップを作成し，理想的な環境における実験を実施した．一方，社会実装のためには図 5.1 に示す他の問題を解決する必要がある．以下で，各問題の概要とそれに対する検討を述べる．

6.2.1 検証実験

提案手法の社会実装のためには，実環境での検証を続ける必要がある．現在，より実際の計測タスクに近い環境での実験を計画している．まずは，実環境の 1/10 程度の規模の実験環境を構築し，橋梁を模した立体構造物の計測実験を行う．複数補機を用いて GNSS に依存せず位置を推定するシステムを用いることで，環境中のあらゆる領域にて定位が可能であり，計測タスクを遂行可能と考えられる．その後，実橋梁と同等規模の実験施設にて計測実験を行う．

6.2.2 経路計画

本研究では，計測に対する最低限の要件である「対象設備全表面領域の計測」，「一定以上の精度での計測」，「対象設備と UAV の衝突の回避」および「短時間でのタスク達成」を充足する経路計画法を提案した．一方，社会実装に向けて考慮すべき要件は他にも存在し，経路計画に関する更なる検討が必要である．

高度な要求の充足

本研究では，画像データの要求精度は対象設備の全領域において一定とした．しかし，実際の橋梁は一様な物体ではなく，領域ごと画像データの要求精度が異なる場合も考えられる．例えば，橋梁定期点検要領 [14] では，鋼材の防食機能の劣化評価には 1～5mm 程度の大きさのさびが基準とされる．このようなさびの検出に必要な画像データの精度は，前章までで想定したコンクリート部分のひび割れ検出とは異なる．各領域に要求される最低限の精度で計測することで，効率的なタスク達成を実現できる．この要求に応えるためには，計測要件の定式化や計測位置導出に関して再考する必要がある．

また、提案手法では、3Dモデルを構成するポリゴンを少なくとも一度計測するように計測位置を導出した。一方、異常が検出された箇所の明確化や点検結果の管理のために、計測した画像データを貼り付けた3Dモデルを作成する場合がある。この場合、隣り合う画像データは一定以上の重複率を確保しなければならない。この課題に関しては、要求される重複率を考慮して縮小された計測範囲を設定することで解決できる可能性がある。

飛行特性の考慮

経路計画において、UAVは計測位置間を一定速度で移動し、計測位置で静止して計測すると設定した。一方、実際の利用においては、UAVを移動させながら連続で計測させる場合がある。この場合、UAVが滑らかに飛行できるような経路、例えば、高度一定で地面と平行な移動が多い経路、急峻な方向転換が少ない経路が求められる。この問題は、計測位置巡回順の決定において、高度および移動方向の変化を考慮したコストを設定することで解決できる可能性がある。ここで、図4.6、4.7を見ると、隣接する計測位置同士では高度が異なる場合が多い。計測位置は対象設備全体を一定以上の精度で計測するために、計測位置巡回順の決定とは独立に導出された。このような計測位置に対しては、前述の要求を満たすように巡回順を決定できない恐れがある。そこで、計測位置導出の段階でUAVの飛行特性を考慮する必要がある。

計測可能な方向の考慮

第2章では、UAVはあらゆる方向を計測可能と仮定した。しかし、実機においては機構や積載可能重量に起因してこの前提が成り立たず、計測不可能な方向が生じる。対象設備を様々な方向から計測するためには、カメラの搭載位置を変えて複数回計測する必要がある。提案手法では、各計測位置における計測方向が定義されている。そこで、UAVの機構と計測方向を考慮して計測位置群を分類し、分類された群ごとに巡回順を決定するというアプローチが考えられる。その他、計測可能な方向を制限した計測条件を設定して計測位置を導出するという策も挙げられる。

複数機での計測

本研究では、単独のUAVによる計測を想定したが、実点検においては1フライトで計測タスクを達成できない、タスク達成に時間を要するといった問題が発生する。これらの問題の解決のために、複数のUAVの同時利用という策が挙げられる。前述の計測可能な方向の考慮についても、カメラの搭載位置が異なる複数のUAVを用いることで効率的な計測が期待できる。複数機を想定する場合、各機の飛行時間の均等化によるタスク全体の効率化、UAV同士の衝

突回避を考慮して経路計画する必要がある．AGV 群の経路についてはこれまでに様々な検討 [72, 73] がなされており，これらの知見を利用して計測用 UAV 群の経路を計画可能と考えられる．

参考文献

- [1] 久保大輔. 無人航空機システム (ドローン) の歴史と技術発展. 計測と制御, Vol. 56, No. 1, pp. 12-17, 2017.
- [2] ヤマハ発動機株式会社. ストーリー : 28 産業用無人ヘリコプター「R-50」の開発 - ヤマハヒストリー. 企業情報,
(<https://global.yamaha-motor.com/jp/profile/history/stories/0028.html>, 2019 年 11 月 14 日閲覧).
- [3] 瀬下隆, 伊藤淳士, 澁谷幸憲, 西脇健太郎. 3. UAV リモセンの農業への活用研究. 写真測量とリモートセンシング, Vol. 55, No. 1, pp. 38-41, 2016.
- [4] 村上拓彦. UAV を利用した森林リモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 38, No. 3, pp. 258-265, 2018.
- [5] 農林水産省. 平成 30 年度 食料・農業・農村白書. 2019.
- [6] 丹羽昌平, 杉浦一郎. VTOL 実験機とその制御. 計測と制御, Vol. 25, No. 8, pp. 729-736, 1986.
- [7] 橋口宏衛. ドローン技術の背景, 仕組み, 発展. 電子情報通信学会誌, Vol. 101, No. 12, pp. 1162-1166, 2018.
- [8] Parrot. Parrot AR.Drone 2.0 Elite Edition.
(<https://www.parrot.com/jp/doron/parrot-ardrone-20-elite-edition>, 2019 年 11 月 14 日閲覧).
- [9] DJI. Phantom 1 - DJI 初の小型レディトゥフライ垂直離着陸機となる空撮用統合マルチローター機体.
(<https://www.dji.com/jp/phantom>, 2019 年 11 月 14 日閲覧).
- [10] 国立社会保障・人口問題研究所. 日本の将来推計人口 (平成 29 年推計) . 2017.

- [11] 内閣府. 令和元年版高齢社会白書. 2019.
- [12] インプレス総合研究所. ドローンビジネス調査報告書 2019【インフラ・設備点検編】. 2018.
- [13] 国土交通省. 平成 25 年度 国土交通白書. 2014.
- [14] 国土交通省. 橋梁定期点検要領. 2019.
- [15] 国土交通省. 道路メンテナンス年報. 2015.
- [16] 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.
- [17] 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, 15-00443, 2016.
- [18] 小山哲, 丸屋剛, 堀口賢一, 澤健男. ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発. 土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）, Vol. 68, No. 3, pp. 178-194, 2012.
- [19] 後藤悟史, 麻生稔彦, 宮本文穂. 画像処理とパターン認識手法を利用した耐候性鋼材のさび外観評価. 土木学会論文集 F, Vol. 62, No. 4, pp. 674-683, 2006.
- [20] 溝上善昭, 小林義弘, 和泉遊以, 阪上隆英. 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による鋼床版デッキプレートーUリブ間の溶接部に生じる疲労亀裂の遠隔検出. 鋼構造論文集, Vol. 22, No. 87, pp. 87_47-87_56, 2015.
- [21] 園田佳巨, 渡邊達郎. 回転式打音検査の欠陥検出能力に関する定量的評価. 構造工学論文集 A, Vol. 59A, pp. 682-692, 2013.
- [22] 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）の具体化について. 平成 26 年 11 月 26 日定例会見資料, 2014.
- [23] 株式会社デンソー. UAV を活用した橋梁点検・測量システム. 第 9 回インフラ検査・維持管理展. 2017.
- [24] 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（土工編）（案）. 2018.

- [25] 西松建設. UAV（ドローン）による空中写真測量の検証事例. 技報 41 号, 2018.
- [26] 総務省. 平成 29 年版 情報通信白書. 2017.
- [27] 富士通株式会社. 知創の杜（フォーカスシリーズ）ケーススタディ「最適化技術を活用した物流戦略における意思決定支援」. 2018.
- [28] 株式会社日立製作所. AI や IoT を活用し、実効性の高い配送計画を立案する「Hitachi Digital Solution for Logistics/配送最適化サービス」を提供開始. ニュースリリース, 2019.
- [29] 楽天株式会社. ドローン物流サービスの事例と今後の展望. 第 9 回産業構造審議会新産業構造部会開催資料, 2016.
- [30] 日本経済新聞. アマゾン、ドローン配送を開始へ 数カ月以内に.
(<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO45750120W9A600C1000000/>,
2019 年 11 月 14 日閲覧), 2019.
- [31] 国土交通省. 無人航空機の飛行に関する許可・承認申請書（様式）. 2019.
- [32] 野波健蔵. ドローン技術の現状と課題およびビジネス最前線. 情報管理, Vol. 59, No. 11, pp. 755-763, 2017.
- [33] 梅本和希, 池田拓也, 松野文俊. スライディングモード制御によるマルチロータ型 UAV のロバスト追従制御. 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 2, pp. 170-176, 2014.
- [34] 堀田克也, 山田学, 大羽達志. バックステッピング法に基づく 4 ロータ小型ヘリコプタの適応追従制御. 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 2, pp. 177-184, 2014.
- [35] 大橋臨, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵. 自律移動ロボットのロバストな位置推定のための相関係数による多数決センサ選択と統合. 計測自動制御学会論文集, Vol. 55, No. 7, pp. 439-446, 2019.
- [36] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimal Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, Vol. ssc-4, No. 2, pp. 100-107, 1968.

- [37] J. Chuang, and N. Ahuja. An Analytically Tractable Potential Field Model of Free Space and Its Application in Obstacle Avoidance. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART B: CYBERNETICS*, VOL. 28, NO. 5, pp. 729-736, 1998.
- [38] 奥田裕之, 能登紀泰, 田崎勇一, 鈴木達也. 個人適合型ポテンシャル法に基づく障害物回避アシスト制御. 自動車技術会論文集, Vol. 44, No. 3, pp. 895-901, 2013.
- [39] 彌城祐亮, 江口和樹, 岩崎聡, 山内由章, 中田昌宏. ポテンシャル法によるロボット製品の障害物回避技術の開発. 三菱重工技報, Vol. 51, No. 1, pp. 40-45, 2014.
- [40] M. Held, and R. M. Karp. A Dynamic Programming Approach to Sequencing Problems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 10, No. 1, pp. 196-210, 1962.
- [41] 前川景示, 玉置久, 喜多一, 西川緯一. 遺伝アルゴリズムによる巡回セールスマン問題の一解法. 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 5, pp. 598-605, 1995.
- [42] 株式会社マブコン. UAV 飛行計画コース設計 — Galleries.
(https://www.mapcom.tokyo/galleries/pickup_1/, 2019 年 11 月 15 日閲覧).
- [43] 大浦工測株式会社. UAV (ドローン) 測量 — 技術・サービス.
(<https://www.oura.co.jp/service/uav/>, 2019 年 11 月 15 日閲覧).
- [44] 倉林大輔, 太田順, 新井民夫, 吉田英一. 掃引作業における移動ロボット群の動作計画. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, 2, pp. 181-188, 1998.
- [45] 深澤佑介, Trevai CHOMCHANA, 太田順, 湯浅秀男, 新井民夫, 浅間一. 格子点配置を用いた自律移動ロボットによる環境掃引経路計画. 計測自動制御学会論文集, Vol. 39, 11, pp. 1054-1060, 2003.
- [46] ITmedia NEWS. 「ルンバ」の動きは“ランダム”ではない——米 iRobot、コリン・アングル CEO の哲学.
(<https://www.itmedia.co.jp/lifestyle/articles/1411/11/news106.html>, 2019 年 11 月 14 日閲覧).
- [47] DJI. Spreading Wings S1000+ フライトするデジタル一眼レフカメラ.
(<https://www.dji.com/jp/spreading-wings-s1000-plus>, 2019 年 11 月 14 日閲覧).

- [48] DJI. DJI、赤外線カメラ搭載のドローン「MAVIC 2 ENTERPRISE DUAL」を発表. プレスリリース, 2018.
- [49] DJI. Zenmuse XT - 赤外線イメージング技術を大きく向上.
(<https://www.dji.com/jp/zenmuse-xt>, 2019 年 11 月 14 日閲覧).
- [50] 市川明彦, 阿部雄樹, 池田貴公, 大原賢一, 岸川純平, 芦澤怜史, 大道武生, 沖野晃久, 福田敏男. マニピュレータを搭載した橋梁点検用 UAV—第 2 報: UAV 搭載用打音装置の研究—. 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 7, pp. 613-619, 2019.
- [51] 宮本文穂, 浅野寛元, 江本久雄, 勝島龍郎. RC 橋維持管理支援システム (J-BMS RC 版) の開発と実橋への適用. 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol. 71, No. 3, pp. 105-124, 2015.
- [52] 鈴木太郎, 明比建, 増渕拓馬, 天野嘉春. 複数の GNSS アンテナ搭載 UAV を用いた高精度位置姿勢推定と精密三次元計測. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A2-09a4, 2016.
- [53] J. A. Guerrero, and Y. Bestaoui. UAV Path Planning for Structure Inspection in Windy Environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, No. 69, pp. 297-311, 2013.
- [54] 瀬戸口和穂, 東野伸一郎, 満武勝嗣. 小型回転翼 UAV による災害現場撮影用パースプランニング. 航空宇宙技術, Vol. 15, pp. 23-32, 2016.
- [55] 国立研究開発法人科学技術振興機構. 研究開発成果実装支援プログラム.
(<https://www.jst.go.jp/ristex/implementation/>, 2020 年 1 月 17 日閲覧).
- [56] 塚田義典, 田中成典, 窪田諭, 中村健二, 岡中 秀騎. 点群データを用いた橋梁の 3 次元モデルの生成に関する研究. 知能と情報, Vol. 27, No. 5, pp. 796-812, 2015.
- [57] 3D Systems, Inc. Stereolithography Interface Specification. part number 50065-S01-00, 1989.
- [58] 社団法人日本コンクリート工学協会. コンクリート診断技術 '02 基礎編. pp. 89, 2002.
- [59] 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.

- [60] D. Arthur, and S. Vassilvitskii. **k-means++**: The Advantages of Careful Seeding. *Proceedings of the 18th Annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, pp. 1027-1035, 2007.
- [61] Chen Po-Cheng. Drone Positioning in Real 3D Environment with Visual AR Marker Pose Estimation System. *Graduation Thesis, Department of Engineering Undergraduate G30 Program, Nagoya University*, 2017.
- [62] M. W. Achtelik, M. Achtelik, S. Weiss, and R. Siegwart. Onboard IMU and monocular vision based control for mavs in unknown in-and outdoor environments. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2011)*, 2011.
- [63] A. Masselli, and A. Zell. A novel marker based tracking method for position and attitude control of MAVs. *Proceedings of International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (IMAV)*, 2012.
- [64] L. R. G. Carrillo, A. E. D. López, R. Lozano, and C. Pégard. Combining stereo vision and inertial navigation system for a quad-rotor UAV. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 65, No. 1-4, pp. 373-387, 2012.
- [65] G. Chowdhary, E. N. Johnson, D. Magree, A. Wu, and A. Shein. GPS-denied indoor and outdoor monocular vision aided navigation and control of unmanned aircraft. *Journal of Field Robotics*, Vol. 30, No. 3, pp. 415-438, 2013.
- [66] 藤岡駿, 久保大輔, 土屋武司. LIDAR を用いた非 GPS 環境下におけるドローンのオンボード飛行制御. 交通・物流部門大会講演論文集. 25, p. 2303. 一般社団法人日本機械学会, 2016.
- [67] 鈴木智. 非 GPS 環境における小型無人航空機の自律制御. 計測と制御, Vol. 56, No. 1, pp. 18-23, 2017.
- [68] S. Shen, N. Michael, and V. Kumar. Autonomous multi-floor indoor navigation with a computationally constrained MAV. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2011)*, 2011.
- [69] M. Nieuwenhuisen, D. Droschel, M. Beul, and S. Behnke. Autonomous navigation for micro aerial vehicles in complex gnss-denied environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 84, No.1-4, pp. 199-216, 2016.

- [70] K. Maeda, Y. Funabara, S. Doki, K. Doki. Flight Path Planning of Multiple UAVs for Robust Localization near Infrastructure Facilities. *44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2018)*, 2018.
- [71] 福島ロボットテストフィールド. インフラ点検・災害対応エリア | 施設・設備と使用料.
(<https://www.fipo.or.jp/robot/facility/infrastructure.html>, 2019 年 12 月 24 日閲覧).
- [72] 平野智一, 太田順, 井上康介, 倉林大輔, 新井民夫. 未知環境における移動ロボット群の経路学習. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 66, No. 642, pp. 522-529, 2000.
- [73] 小林裕介, 吉本昌弘, 根和幸, 福島宏明, 松野文俊, 守井知之, 北河満, 辻滋, 吉川浩一. 複数の移動ロボット群のすれ違いを考慮した編隊制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 35, No. 1, pp. 78-84, 2017.

発表業績

学会誌等 (2 件)

- 麻晃太郎, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵. UAV によるインフラ設備外観の自動点検システムの実現に向けた三次元モデルに基づく状態データの精度を考慮した計測位置算出. 計測自動制御学会論文集, Vol. 53, No. 3, pp. 229-235, 2017.
- 麻晃太郎, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵. 無人飛行体によるインフラ設備外観自動点検システムのための状態データの精度と作業効率を考慮した計測位置決定. 計測自動制御学会論文集, Vol. 55, No. 5, pp. 386-392, 2019.

国際会議 (3 件)

- K. Asa, Y. Funabara, S. Doki and K. Doki. Measuring Position Determination for Realization of Automatic Inspection using UAV. *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, TTC - SIP 5 5, 2016.
- K. Asa, Y. Funabara, S. Doki and K. Doki. Measuring Position Determination for Accurate and Efficient Visual Inspection using UAV. *2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, TuC4.5, 2017.
- K. Asa, Y. Funabara, S. Doki and K. Doki. Evaluation in Real World of the Measuring Position Determination for Visual Inspection using UAV. *44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, TT10 - 1 1, 2018.

その他 (9 件)

- 麻晃太郎, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵. UAV による外観点検システムの自動化 -構造物の三次元モデルからの点検経路の自動生成-. ロボティクス・メカ

トロニクス講演会 2015, 2P1-O03, 2015.

- 麻晃太郎, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵. 構造物の三次元モデルを用いた UAV による外観点検用飛行経路の自動生成. 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演会, 3G3-2, 2015.
- 麻晃太郎, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵. 計測機器の特性を考慮したインフラ設備外観点検システムのための無人飛行体の軌道計画. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2P1-10a4, 2016.
- 麻晃太郎, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵. インフラ設備外観点検に用いる無人飛行体の操縦支援システム-外観データ収集のための計測位置・姿勢の教示-. 平成 28 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演会, F1-1, 2016.
- 麻晃太郎, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵. 無人飛行体を用いたインフラ設備外観点検システムのための計測位置算出法. 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演会, 2I2-5, 2016.
- 麻晃太郎, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵. インフラ設備外観自動点検システムのためのベクトル量子化を利用した無人飛行体の計測位置決定. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 1P1-C01, 2017.
- 麻晃太郎, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵. 精度を考慮した構造物外観計測に用いる無人飛行体の経路計画. 第 17 回建設ロボットシンポジウム, P1-3, 2017.
- 麻晃太郎, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵. 対象構造物の三次元モデルと計測条件を基にした外観計測用無人飛行体の経路計画. 第 44 回東海ファジィ研究会, P3-04, 2018.
- 麻晃太郎, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵. 無人飛行体を用いた構造物外観自動計測システムのための経路生成法の計算量評価. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2A1-B01, 2018.

謝辞

本研究を行うにあたり，終始御指導を賜りました，名古屋大学大学院工学研究科情報・通信工学専攻 教授 博士（工学） 道木慎二先生に深く感謝いたします。

本論文をまとめるにあたり，貴重なご助言を賜りました，名古屋大学大学院工学研究科情報・通信工学専攻 教授 博士（工学） 藤井俊彰先生，名古屋大学未来社会創造機構モビリティ領域機械・情報分野 教授 博士（工学） 河口信夫先生，愛知工業大学情報科学部情報科学科 教授 博士（工学） 中條直也先生に，深く感謝の意を表します。

本研究に対し，貴重な御指導，御助言を賜りました，愛知工業大学工学部電気学科電子工学専攻 准教授 博士（工学） 道木加絵先生に心より感謝いたします。

本研究を含め，ロボットの制御全般について，日頃から貴重かつ多大なる御指導を頂きました，名古屋大学大学院工学研究科情報・通信工学専攻 助教 博士（工学） 舟洞佑記先生にここに改めて感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり，日頃より有益な御助言，御協力を頂きました，名古屋大学大学院工学研究科情報・通信工学専攻博士後期課程3年 嶋岡雅浩氏，同2年 今井幸司氏，大橋臨氏，キムジンス氏，同1年 赤塚弘恭氏，王シン氏，博士前期課程2年 太田和希氏，二村拓未氏，福岡瑞規氏，本田翔大氏，同1年 北村健太郎氏，木村圭佑氏，呉偉桐氏，中井喬太氏，堀翔太氏，山口紘生氏，工学部電気電子・情報工学科4年 小櫻崇雅氏，中川滉貴氏，正岡真一氏，文精奎氏に深く感謝いたします。

最後に，本研究を私生活の面から支え，私に多大な理解を示して頂きました家族に感謝を表し，謝辞の締めくくりとさせていただきます。