

関西大学審査学位論文

i-Construction の実現に向けた  
3次元データの利活用技術に関する研究

Research on Utilization Technology of Three-Dimensional Data  
for Realization of i-Construction

平成30年 9月

櫻井 淳

関西大学大学院総合情報学研究科



## 要旨

我が国の建設業界では、現場の技術者が、古くから 2 次元図面を基に 3 次元情報を解釈して施工している。しかし、最近の地物は複雑である上、日中のみならず夜間の供用中の施工を強いられている。また、少子化と高齢化に伴って熟練者の担い手の不足が懸念される。そのため、工期が延長することや、施工不良に伴う品質低下が生じる可能性がある。したがって、これらの課題を緩和するために、2 次元図面を用いるのではなく、3 次元情報の必要性が議論されてきた。その利点としては、建設現場の作業効率化と生産性向上が期待できる上、これまで成し得なかった施工対象物の全数検査の品質管理が可能となる。

こうした状況下で、国土交通省では、トータルステーション (TS: Total Station) を用いた出来形管理 (以下, TS 出来形管理) やマシンコントロール・マシンガイダンス (以下, MC/MG) に関する 3 次元情報化施工を推進してきた。その中でも地上レーザスキャナのレーザ計測技術や小型無人飛行機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) の写真測量技術で取得される点群データを活用して、測量、設計、施工、検査、維持管理の建設生産プロセス全体で 3 次元データの利活用を目指した i-Construction の取り組みが注目されている。レーザ計測は、測距可能な範囲に限られるが、高精度な測量成果を得ることができることに加えて夜間計測も可能である。一方、UAV の写真測量は、天候、日照時間や飛行可能エリアなどの条件を満たす必要があるが、短時間かつ広範囲の計測ができる点に特徴がある。これらの機器を使い分けながら、作業効率化と生産性向上のための新たな技術開発のみならず運用ルールの確立が求められている。

本研究は、これらの背景を踏まえて、3 次元データの利活用で最も効果が期待できる施工、検査、維持管理の事業段階に着目し、3 次元データの流通、現場の正確な可視化と災害発生時の状況把握、そして全数検査を目指した新たな方法について技術開発を行うものである。

### (1) 施工段階における 3 次元データの作成作業を省力化する手法の提案

情報化施工技術として、TS 出来形管理では、2 次元の発注図に基づいて道路中心線形や横断面形状などを含む 3 次元設計データが作成されている。一方、MC/MG では、機械の自動制御のために面を含む 3 次元データを利用しており、その作成過程で 3 次元ポリラインが作成されている。これは、断面変化箇所を延長方向に繋いだ折れ線のことであり、2 次元の発注図に基づいて作成している。これらの技術は、一つの工事現場に併せて適用される場合があるが、それぞれで活用される 3 次元データが個々に作成されており、作業の重複や負荷が生じている。これは、データのフォーマットや使用用途が異なり、それぞれを連携した活用方法が考えられていないためである。そのため、MC/MG と TS 出来形管理で二重化している 2 次元の発注図からの 3 次元データの作成作業を一元化できれば、作業の省力化につながる。

そこで、本研究では、MC/MG で作成される 3 次元ポリラインから TS 出来形管理の 3 次元設計データに変換することで、異なるフォーマット間のデータを交換する流れを構築する。そして、

実証実験において、提案手法で生成した 3 次元設計データの精度を検証し、技術者との協議により提案手法の有用性を示した。また、3 次元設計データの生成時間を計測し、作成作業の大幅な省力化が可能であることを実証した。

## (2) 地上レーザスキャナを用いた施工状況の把握を効率化する手法の提案

施工段階において、地上レーザスキャナを常設し、日々の地表面の変化量を算出することで、工程管理や出来高算出への活用が期待される。しかし、計測された点群データは建機や樹木などの点が混在するため、これらを除去して地表面の点を抽出するフィルタリング処理が必要となる。既存研究では、最下点抽出法、ローラ法、傾斜を用いた手法、領域拡張法を用いた手法、標高差に着目した手法や平坦度算出による手法が提案されている。しかし、これらの手法を施工現場に適用する際には、法面などの傾斜がある地表面の点を正しく抽出できない課題、整地されていない地表面の点を正しく抽出できない課題、建機に隠れた地表面の点を抽出できない課題の 3 つの課題がある。

そこで、本研究では、平坦部と傾斜部でグリッドサイズを変化させることに着目し、傾斜のある地表面の点群データを抽出する手法を考案した。また、常設された地上レーザスキャナが 1 日に複数回計測できる特徴に着目し、連続的に計測された 2 時期の点群データを用いて、移動体のオクルージョンにより欠損した地表面を補完する手法を開発した。そして、実証実験において、加古川流域の河川土工の計測データを用いて、提案手法の有用性を実証した。これは、常設のレーザスキャナから対象地物を正確に計測できるために出来高算出の効率化が期待できる。

## (3) 地上レーザスキャナを用いた出来形計測を効率化する手法の提案

地上レーザスキャナは、地上からの計測であるため、工事対象物や障害物によるオクルージョンが多く発生する。そのため、施工現場全体の 3 次元データを取得するためには、異なる位置から複数回に分けて計測する必要がある。しかし、計測された点群データをそのまま重畳した場合、膨大な点数となり解析処理の際に負荷がかかる。また、計測された点群データの測定精度はレーザ入射角や計測距離に依存するため、機器の設置位置によっては、同一地点に対して測定精度の異なる点が混在する。そのため、点群データを間引くための既存手法として、内挿補間により格子状のグリッドデータを生成する手法、空中ノイズなどの疎な外れ値を除去するフィルタリング手法や、地表面の最下点を優先的に抽出する手法がある。しかし、これらは、点群データ自体の位置関係や密度などの特徴に着目した手法であるため、機器の設置位置の違いによって精度の異なる点が混在する問題を解決することはできない。

そこで、本研究では、点群データの特徴に加えて、計測位置の情報を用いることで、地上レーザスキャナの多地点計測において最確値を抽出し、出来形計測を効率化する手法を提案する。そして、実証実験において、施工技術総合研究所の道路土工の模擬現場で計測し、

提案手法により地物形状の品質が向上することを実証した。これにより、レーザスキャナの特性を踏まえて最確値を選択し、納品検査の品質を保証する。

#### (4) UAV 写真測量を用いた出来形計測を効率化する手法の提案

i-Construction に係る規程では、UAV で撮影した写真を用いて写真測量技術で生成した点群データの要求精度が現在までの試行成果と機器性能に基づき決定されている。しかし、点群データの精度は、UAV の計測条件や写真測量ソフトウェアの解析パラメータに依存するため、現場の状況に応じて適切に設定する必要がある。既存研究では、撮影高度、写真ラップ率や対空標識の枚数といった UAV の計測条件の違いによる影響が明らかにされている。一方、解析パラメータに関しては、設定条件の違いにより人的・時間的コストと精度が変化すると考えられるが、既存研究では分析されていない。

そこで、本研究では、UAV の写真測量の誤差要因の影響を体系的に整理し、計測方法や解析方法の作業規程を提案する。そして、実証実験において、地上レーザスキャナと同様の道路土工の模擬現場において、作業規程の手順に従って出来形計測の品質保証を確認した。これにより、実務の経験を問わず、納品検査のための 3 次元データを生成し、生産性の向上に寄与する。

#### (5) UAV 写真測量を用いた災害時の状況把握を効率化する手法の提案

災害現場では、流木、土砂堆積や二次災害のリスクによって人が立ち入れないケースが発生するため、UAV 写真測量で生成された点群データを用いて、災害規模の把握や災害復旧への活用が試みられている。しかし、災害発生時には、人の立ち入り制限により対空標識を設置できないため、平常時と同様の解析パラメータを使用できない状況となる。これにより、点群データを地理座標系に変換できない問題がある。その解決手段として、地形に標定点を設置せず、カメラの主点位置座標(撮影位置)を GNSS 衛星から計測する方法がある。しかし、正確な計測には専用の高価な記録装置が必要となる。また、通常の機材では高さ方向の誤差が大きいという課題がある。

そこで、本研究では、平常時の地物の位置情報を取得する方法として、国土地理院が無償公開している航空写真地図と航空レーザ測量成果があることに着目して、災害時のターゲットを設置できない条件下において UAV 写真測量により点群データを生成する手法を提案する。そして、実証実験において、奈良県吉野郡で発生した大規模な土砂災害現場において、提案手法が防災・減災対策に有用であることを実証した。これにより、現地に立ち入ることなく点群データを生成し、災害規模を迅速に把握することが可能となり、防災・減災を支援する。

以上の研究成果より、本論文では、i-Construction の実現に向けて、施工、検査、維持管理の各段階において 3 次元データを利活用する手法を提案した。そして、実務で活用される設計データや、実現場で計測した点群データを用いて実証実験を行い、提案手法の有効

性を確認した。本研究成果の今後の展開としては、実務者の協力の下、実務への適用を行い、実務者の意見を取り入れてより実用的な手法に改善する。また、適用工種や分野を拡大し、分野横断的な手法の確立を目指す。

# 目次

第 1 章 緒論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.2 i-Construction の実現に向けた現状の取組みと課題.....	1
1.2.1 3 次元データの社会的なニーズ.....	1
1.2.2 3 次元データの利活用に関する取組み.....	2
1.2.3 3 次元データの i-Construction への活用にて解決すべき課題.....	4
1.3 研究の目的 .....	5
1.3.1 研究対象 .....	5
1.3.2 課題の解決に向けた方策.....	5
1.4 本論文の構成 .....	7
第 2 章 研究の流れ .....	9
2.1 研究の適用対象 .....	9
2.2 3 次元データの特徴調査.....	9
2.2.1 情報化施工で使用される設計データ .....	9
2.2.2 計測機器から取得される点群データ .....	11
2.2.3 3 次元データが保持する情報.....	13
2.3 既存研究の課題と対応方針.....	14
2.3.1 施工段階における 3 次元データ作成作業を省力化する方策 .....	14
2.3.2 施工段階における地上レーザスキャナを用いた施工状況の把握を効率化する方策 ..	15
2.3.3 検査段階における地上レーザスキャナを用いた出来形計測を効率化する方策 ...	18
2.3.4 検査段階における UAV 写真測量を用いた出来形計測を効率化する方策.....	19
2.3.5 維持管理段階における UAV 写真測量を用いた災害時の状況把握を効率化する方 策 .....	20
2.4 本研究の全体像 .....	20
第 3 章 施工段階における 3 次元データ作成作業の省力化手法の提案 .....	23
3.1 研究の概要 .....	23
3.2 既存システムへの導入.....	24
3.3 提案手法の概要 .....	26
3.3.1 属性付き 3 次元ポリラインの作成.....	27
3.3.2 パラメータ設定機能.....	30
3.3.3 3 次元設計データ生成機能.....	31
3.4 実証実験 .....	33
3.4.1 実験計画 .....	33

3.4.2.3 次元設計データ生成精度の評価.....	33
3.4.3 次元設計データ生成時間の調査.....	37
3.5 提案手法の課題と解決策.....	39
3.6 まとめ.....	42
第4章 地上レーザスキャナを用いた施工状況把握の効率化手法の提案.....	43
4.1 研究の概要.....	43
4.2 提案手法の概要.....	44
4.2.1 地表面点群データ抽出機能.....	45
4.2.2 地表面点群データ補完機能.....	47
4.3 実証実験.....	49
4.3.1 実験計画.....	49
4.3.2 実験環境.....	50
4.3.3 パラメータの設定.....	51
4.3.4 実験1. 横断面の可視化による評価.....	53
4.3.5 実験2. 地表面抽出精度の評価.....	54
4.3.6 実験3. 地表面補完精度の評価.....	57
4.4 提案手法におけるパラメータの検証.....	59
4.4.1 実験概要.....	59
4.4.2 実験結果と考察.....	60
4.5 まとめ.....	66
第5章 地上レーザスキャナを用いた出来形計測の効率化手法の提案.....	69
5.1 研究の概要.....	69
5.2 施工現場で計測した点群データの課題分析.....	70
5.2.1 計測実験の概要.....	70
5.2.2 一地点からの計測結果と課題.....	73
5.2.3 多地点計測時の点群データ重畳における課題分析.....	74
5.3 提案手法の概要.....	77
5.3.1 重畳フィルタリング機能.....	78
5.3.2 白線フィルタリング機能.....	81
5.4 実証実験.....	83
5.4.1 実験計画.....	83
5.4.2 実験データ.....	84
5.4.3 実験1. 重畳フィルタリングの精度評価.....	84
5.4.4 実験2. 白線フィルタリング機能の精度評価.....	87
5.4.5 実験3. 出来形管理の適用可能性の評価.....	88
5.5 まとめ.....	91



第 6 章 UAV 写真測量を用いた出来形計測の効率化手法の提案.....	93
6.1 研究の概要 .....	93
6.2 UAV の計測手法の誤差要因の分析.....	94
6.2.1 調査概要 .....	94
6.2.2 撮影機材の調査.....	96
6.2.3 撮影高度の調査.....	97
6.2.4 ターゲット位置と個数の調査.....	98
6.2.5 写真ラップ率の調査.....	99
6.2.6 UAV 空中写真測量の計測精度の評価.....	100
6.3 写真測量ソフトウェアの解析パラメータの分析.....	103
6.3.1 調査概要 .....	103
6.3.2 解析パラメータの調査実験.....	104
6.4 分析結果に基づいた UAV 写真測量の計測・解析手法の考案.....	110
6.4.1 事前準備 .....	111
6.4.2 当日の行動.....	113
6.4.3 解析処理 .....	115
6.5 まとめ .....	118
第 7 章 UAV 写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法の提案.....	119
7.1 研究の概要 .....	119
7.2 提案手法の概要 .....	120
7.2.1 スケール変換.....	120
7.2.2 対応点取得.....	121
7.2.3 座標系変換.....	122
7.3 実証実験 .....	123
7.3.1 実験計画 .....	123
7.3.2 スケール変換の精度検証.....	124
7.3.3 座標系変換の精度検証.....	126
7.4 災害時の UAV 写真測量の活用方法.....	128
7.4.1 概要 .....	128
7.4.2 提案手法による点群データの生成.....	129
7.4.3 提案手法の点群データを用いた活用例.....	130
7.5 まとめ .....	131
第 8 章 総括 .....	133
参考文献 .....	137
謝辞 .....	143



# 第1章 緒論

## 1.1 研究の背景

近年、レーザやカメラの技術革新に伴い、道路や河川の建設現場及び災害現場などの地形を正確に計測する技術が注目されている。例えば、地上レーザスキャナを用いて、レーザ照射により対象物までの距離を計測するレーザ測量技術[1]や、デジタルカメラを搭載した無人航空機（UAV：Unmanned Aerial Vehicle）を用いて、複数の写真から疑似点群データを生成する写真測量技術[2][3]がある。これらの登場により、点と線で地形を表現していた時代から、3次元の面で地形を取得することが容易に可能となった。さらに、これらの計測機器により取得した点群データと、2次元図面をもとに生成した3次元設計データとの差分から、体積計算や干渉チェックが可能[4][5]となる。そのため、3次元データは、建設現場における測量[6][7]のみならず、河川、橋梁や鉄道施設などの構造物の点検[8][9]、屋内や市街地の景観シミュレーションや工事現場の安全管理などの様々な用途で利用が検討[10]されている。特に、土木分野においては、i-Construction[11]-[13]の取組みが始まり、建設生産プロセス全体の3次元データの利活用を目指している。しかし、3次元データは、利用用途に応じて計測機器による点群データの取得・加工や、設計データの生成が必要となる。そのため、3次元データの更なる高度利用に資するためには、3次元データを効率的に利活用するための技術開発が欠かせない。そこで、著者は、これまで土木分野の i-Construction の実現に向けて、3次元データなどの利活用研究[14]-[23]に取り組んできた。

## 1.2 i-Constructionの実現に向けた現状の取組みと課題

### 1.2.1 3次元データの社会的なニーズ

我が国では、建設業就業者の高齢化に伴って将来的な担い手の不足が懸念されることから、建設現場の生産性の向上が重要である。こうした状況を踏まえ、国土交通省では、施工の効率化のために、マシンコントロール・マシンガイダンス[24][25]（以下、MC/MG）やトータルステーション（TS：Total Station）を用いた出来形管理[26]（以下、TS 出来形管理）に代表される情報化施工[27]-[29]を鋭意推進してきた。また、2016年度より、ICTの全面的な活用に向けて、i-Construction の取組みが実施されている。建設生産プロセスにおける従来方法、情報化施工と i-Construction の全体像を図 1-1 に示す。



図 1-1 i-Constructon の取組み  
(引用 : <http://www.frs-co.jp/iconstruction>)

従来方法では、設計図をもとに丁張りを設置して施工を行い、書類で検査するといったように、全ての段階で2次元図面が用いられていた。それに対し、情報化施工では、設計段階で作成された2次元図面を用いて、施工段階で3次元データを作成してMC/MGなどの技術に活用されている。さらに、i-Constructonの施策では、UAVの写真測量技術や地上レーザスキャナのレーザ測量技術を活用して、測量・調査、設計、施工、維持管理に至る建設生産プロセス全体で一貫した3次元データの利活用を目指している。

UAVによる写真測量は、天候、日照時間や飛行可能エリアなどの条件を満たす必要があるが、短時間かつ広範囲の計測が可能な特徴がある。一方、地上レーザスキャナによるレーザ測量は、UAVによる写真測量と比べて計測範囲が限定されるが、高精度な測量や夜間計測が可能な利点がある。そのため、現場ごとに適した計測機器が用いられ、それぞれの作業効率化と生産性向上のための技術開発が切望されている。

### 1.2.2 3次元データの利活用に関する取り組み

施工、検査、維持管理の各段階において3次元データを活用する取り組みを調査し、本研究が目指すi-Constructonの作業効率化と生産性向上のための課題を明らかにする。

## (1) 施工段階における既存の取組み

施工段階に着目すると、情報化施工技術として MC/MG と TS 出来形管理が実施されている。前者は、3次元データを用いて機械の自動制御やオペレータの操作を支援する技術であり、三角形の集合体である不整三角形網（TIN：Triangulated Irregular Network）で構成される3次元データを利用している。また、そのデータを3次元ポリライン化して施工状況を管理するシステム[29]も提案されている。一方、後者は、巻尺・レベルに代わって TS を用いて工事目的物が発注図に示す形状に対して適合することを検査する手法であり、要領に基づいて出来形管理項目などを含む3次元設計データが作成されている。この技術は、平成25年度より10,000 m<sup>3</sup>以上の土工を含む直轄工事において使用することが原則[31]とされている。これらの情報化施工技術で必要となる3次元データは、フォーマットや使用用途が異なり、それぞれを連携した活用方法が考えられていない。そのため、施工現場では、複数の情報化施工技術が一つの工事に適用[32]される場合があるが、それぞれの3次元データが個々に作成されており、作業の重複や負荷が生じている問題[33]-[35]が指摘されている。

また、施工中においては、施工現場に地上レーザスキャナを常設し、日々の地表面の変化量を算出することで、工程管理や出来高算出への活用[36][37]が期待される。しかし、計測された点群データには、地上レーザスキャナで計測された点群データに建機や樹木などの地表面以外の点が含まれるため、これらを除くことで地表面を抽出するフィルタリング処理が必要となる。また、建機などの移動体によって地表面の点が欠損する課題[38]がある。

## (2) 検査段階における既存の取組み

検査段階に着目すると、地上レーザスキャナおよび UAV の写真測量を用いた土工の出来形管理要領[37][39]が国土交通省より公表されており、これらの要領に準拠して出来形計測および出来形管理が実施されている。

地上レーザスキャナを用いた出来形管理では、地上からの計測であるため、工事対象物や障害物によるオクルージョンが多く発生する。そのため、施工現場全体の3次元データを取得するためには、異なる位置から複数回に分けて計測する必要[40][41]がある。その際、地上レーザスキャナを複数位置に設置して計測した結果には、同一地点に対して精度の異なる点が混在する。地上設置型レーザスキャナの計測精度は、レーザ入射角や計測距離などに依存[42][43]し、機器の設置位置によっては、同一地点に対して5m先から計測された点と100m先から計測された点が混在する課題がある。

一方、UAV の写真測量を用いた出来形管理では、要領において、UAV による空中写真測量の要求精度が現在までの試行成果と機器性能に基づき決定されている。しかし、UAV 写真測量で生成される点群データの精度は、UAV の計測条件や写真測量ソフトウェア[44]の解析パラメータに影響するため、現場の状況に応じて適切に設定する必要がある。

### (3) 維持管理段階における既存の取組み

維持管理段階に着目すると、レーザスキャナを用いた地表面の変位計測[45]-[47]や、UAVなどを用いた災害対応への活用[48]-[52]が試みられている。

UAVを用いた災害対応への活用方法として、災害現場では、流木、土砂堆積や二次災害のリスクによって人が立ち入れないケースが発生するため、UAVの画像・映像撮影により被災状況を把握[48]-[50]する取組みがある。さらに、UAV写真測量や航空レーザ測量により取得された3次元データを用いて、災害前後の土量を算出して災害規模の把握や災害復旧に向けた基礎資料への活用[51][52]が試みられている。しかし、災害発生時には、人の立ち入り制限により標定点を設置できないため、UAV写真測量で3次元データを生成する際に、標定点の活用など、平常時と同様の解析パラメータを使用できない状況となる。これにより、点群データのスケールと座標系に再現できない課題がある。

#### 1.2.3 3次元データのi-Constructionへの活用にて解決すべき課題

前述の調査および分析結果により、施工、検査、維持管理の各段階において、作業効率化と生産性向上のために、3次元データを用いた取組みが実施されている。一方で、それぞれの段階において課題があることが明らかとなった。そこで、本研究で解決すべき課題は、以下の5項目とした。

- 施工段階において、情報化施工の3次元データが個々に作成されており、作業の重複や負荷が生じていること  
MC/MGとTS出来形管理で二重化している3次元データの作成作業を一元化できれば、作業の省力化につながると考えられる。したがって、MC/MGで作成される3次元ポリラインからTS出来形管理の3次元設計データに変換することで、異なるフォーマット間のデータを交換する流れを構築する必要がある。
- 施工段階において、地上レーザスキャナで計測された点群データから地表面の点を抽出する必要があること  
施工現場の地上レーザスキャナで計測された点群データを用いて、工程管理や出来高算出を行うために、建機や樹木などの地表面以外の点を除去し、建機などの移動体によって欠損した地表面を補完する必要がある。
- 検査段階において、地上レーザスキャナを用いて多地点からの計測時、同一地点に対して測定精度の異なる点が混在すること

多地点のレーザスキャナから取得した点群データを重畳した場合、精度の異なる点が混在する。したがって、3次元モデル生成時に計測特性を考慮して高精度な点を選択する手法が必要となる。

- 検査段階において、UAV 写真測量の解析パラメータに関して最適な値を検討する必要があること

UAV 写真測量は、計測条件が適切な場合でも、解析パラメータの違いにより精度や人的・時間的コストが変化する可能性がある。したがって、写真測量ソフトウェアの解析パラメータに着目して、種々の条件の違いによる精度や人的・時間的コストの影響を明らかにする必要がある。

- 維持管理段階の災害対応において、UAV 写真測量で生成した点群データのスケールと座標系を再現できないこと

災害発生時には、人の立ち入り制限により対空標識を設置できないため、点群データのスケールと座標系を再現できない。したがって、対空標識を設置せずに、UAV 写真測量により点群データを生成する手法が必要となる。

## 1.3 研究の目的

### 1.3.1 研究対象

前項で整理した課題を解決するために、本研究では、施工段階における 3 次元データ作成作業の省力化手法と地上レーザスキャナを用いた施工状況把握の効率化手法、検査段階における地上レーザスキャナおよび UAV 写真測量を用いた出来形計測の効率化手法、維持管理段階における UAV 写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法の 5 つを提案する。これにより、施工、検査、維持管理の各段階における業務の省力化と効率化への貢献を目指すものである。

### 1.3.2 課題の解決に向けた方策

本稿では、課題の解決に向けた方策について考察する。本研究の課題と目的を図 1-2 に示す。

施工	<p><b>①施工段階における3次元データ作成作業の省力化手法の提案</b></p> <p>【課題】3次元データを個々に作成しており、作業の重複や負荷が生じていること。</p> <p>【目的】異なるフォーマット間のデータを交換する流れを構築すること。</p>	<p><b>②地上レーザスキャナを用いた施工状況把握の効率化手法の提案</b></p> <p>【課題】施工現場で計測時、建機や植生を除去して地表面の点を抽出する必要があること。</p> <p>【目的】傾斜のある地表面の点群データを抽出し、移動体で欠損した地表面を補完すること。</p>
	<p><b>③地上レーザスキャナを用いた出来形計測の効率化手法の提案</b></p> <p>【課題】多地点計測時、同一地点に対して測定精度の異なる点が混在すること。</p> <p>【目的】計測位置の情報を用いることで、高精度な点群データを抽出すること。</p>	<p><b>④UAV写真測量を用いた出来形計測の効率化手法の提案</b></p> <p>【課題】UAV写真測量の解析パラメータに関して最適な値を検討する必要があること。</p> <p>【目的】解析パラメータの条件の違いによる精度や人的・時間的コストを明らかにすること。</p>
維持管理	<p><b>⑤UAV写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法の提案</b></p> <p>【課題】災害時、UAV写真測量で生成した点群データを地理座標系に変換できないこと。</p> <p>【目的】既存資産を用いて、災害時におけるUAV写真測量の解析手法を提案すること。</p>	

図 1-2 本研究の課題と目的

①施工段階における3次元データ作成作業の省力化手法の提案では、MC/MGで作成される3次元ポリラインからTS出来形管理の3次元設計データに変換することで、異なるフォーマット間のデータを交換する流れを構築する。

②地上レーザスキャナを用いた施工状況把握の効率化手法の提案では、平坦部と傾斜部でグリッドサイズを変化させることと、連続的に計測された点群データを活用することに着目して、施工現場における地表面の点群データを高精度に抽出する手法を開発する。

③地上レーザスキャナを用いた出来形計測の効率化手法の提案では、検査段階の地上レーザスキャナの計測において、点群データの特徴に加えて、計測位置の情報を用いることで、地上レーザスキャナの多地点計測において点群データの最確値を抽出する手法を考案する。

④UAV写真測量を用いた出来形計測の効率化手法の提案では、写真測量ソフトウェアの解析パラメータに着目して、種々の条件の違いによる精度や人的・時間的コストの影響を明らかにし、高精度に計測するための計測手法と解析手法を考案する。

⑤維持管理段階におけるUAV写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法の提案では、既存資産の地図データを活用して、災害時においてUAV写真測量により迅速に3次元データを生成する手法を提案する。



## 1.4 本論文の構成

本論文における各省の位置付けを図 1-3 に示す。

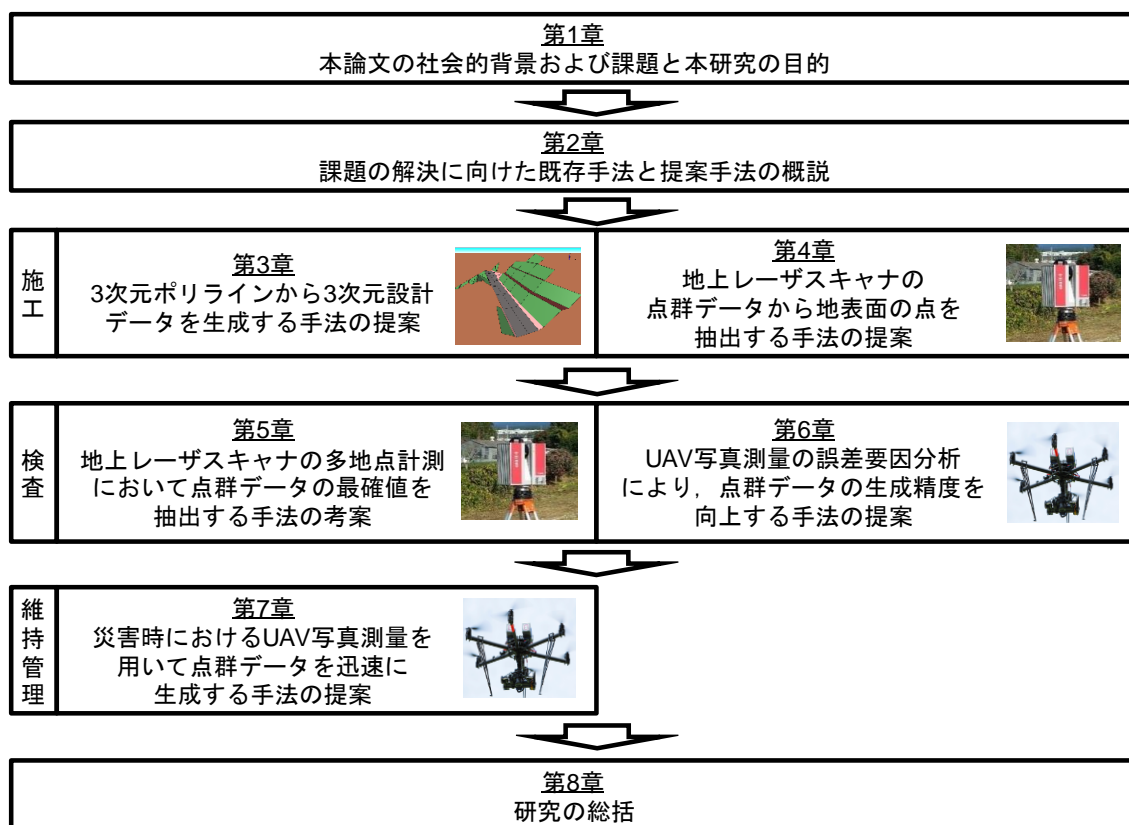


図 1-3 各章の位置付け

第 1 章では、i-Construction における 3 次元データの利活用技術の現状と課題を述べる。第 2 章では、3 次元データの特性と既存研究を調査し、本研究の着眼点と構想について論じている。第 3 章と第 4 章では、施工段階に対して、3 次元ポリラインを用いて 3 次元設計データを生成する手法と地上レーザスキャナの常時観測における地表面を生成する手法をそれぞれ考案する。第 5 章と第 6 章では、検査段階に対して、地上レーザスキャナの多地点計測において点群データの最確値を抽出する手法と UAV 写真測量の誤差要因分析により点群データの生成精度を向上する手法をそれぞれ考案する。第 7 章では、維持管理段階に対して、災害時における UAV 写真測量の手法を提案する。最後に、第 8 章では、研究成果の総括と本研究成果の今後の展開を述べる。



## 第2章 研究の流れ

### 2.1 研究の適用対象

本研究の適用対象は、前章にて説明した社会的ニーズへの有用性を評価・検証するために、対象物は道路と河川の土工とした。また、維持管理段階の適用場面では、土砂災害現場も対象とする。

以上の研究対象に関して、まず、i-Construction で活用される 3 次元データの特性について分析し、アルゴリズムを考案する上で考慮すべき事項を整理する。そして、本研究で着目した課題に対する既存手法について説明し、その課題と対応方針について概説する。

### 2.2 3次元データの特性調査

i-Construction で活用される 3 次元データは、発注図をもとに作成される設計データと、地上レーザスキャナや UAV 写真測量により取得される点群データの 2 種類に大別される。設計データは、工事目的物の設計形状を示したものである。これは、情報化施工技術の種類に応じてフォーマットや仕様が異なる。一方、点群データは、任意の座標系における 3 次元的位置や輝度を示す情報を保持した点の集合である。本稿では、これらのデータの特性について分析し、本研究が想定すべき 3 次元データを明らかにする。

#### 2.2.1 情報化施工で使用される設計データ

本研究で対象とする設計データは、MC/MG や施工管理の用途で活用される 3 次元ポリラインと、TS 出来形管理に用いられる 3 次元設計データとする。これらのデータが保持する情報を次に記述する。

##### (1) MC/MG などで活用される 3 次元ポリライン

3 次元ポリラインの作成例を図 2-1 に示す。

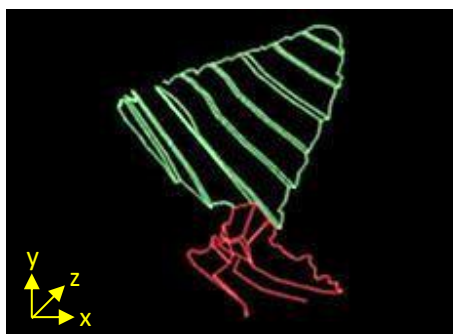


図 2-1 3次元ポリライン

3次元ポリラインとは、断面変化箇所を延長方向に繋いだ折れ線のことであり、設計業者がCADソフトを用いて発注図から手作業で作成している。折れ線は、X、Y、Z座標の点情報を繋ぐことで構成されている。

## (2) TS 出来形管理の3次元設計データ

TS 出来形管理で使用される3次元設計データを図 2-2 に示す。

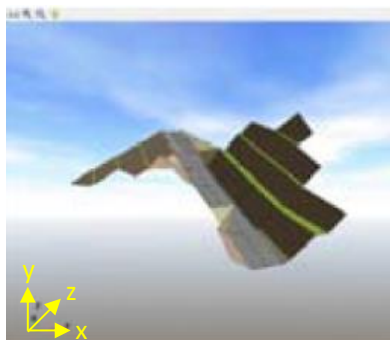


図 2-2 3次元設計データ

3次元設計データは、TSによる出来形管理に用いる施工管理データ交換標準[26]に基づいて作成される。このデータには、道路中心線形や横断形状の3次元幾何情報と、出来形管理項目などの属性情報を保持している。

## 2.2.2 計測機器から取得される点群データ

本研究で対象とする点群データは、地上レーザスキャナと UAV の写真測量により取得されるデータとする。また、その他に、地形の点群データを取得する代表的な計測手法として、航空レーザ測量、MMS がある。これらのデータが保持する情報を次に記述する。

### (1) 地上レーザスキャナを用いた点群データ

地上レーザスキャナとは、地上にレーザスキャナを固定し、構造物や地形を計測する機器である。地上レーザスキャナを図 2-3 に示す。

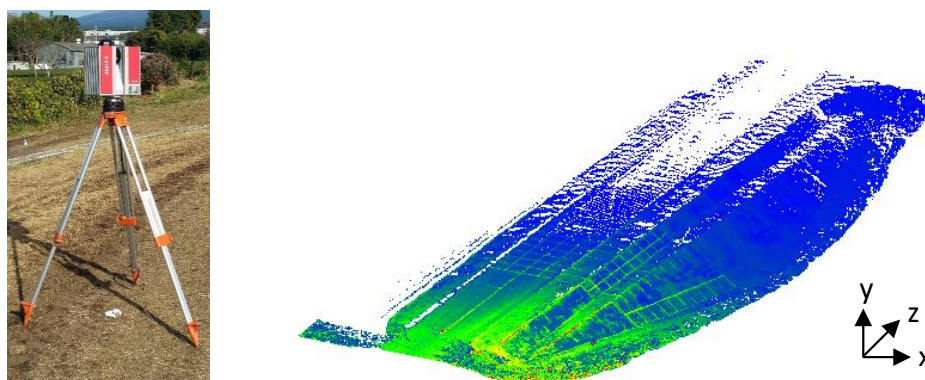


図 2-3 地上レーザスキャナと計測した点群データ

地上レーザスキャナは、計測範囲が限定されるが、高精度な測量や夜間計測が可能な利点がある。地上レーザスキャナで計測された点群データには、機器の設置位置を原点とする X 座標、Y 座標、Z 座標、反射強度と色情報を保持している。

### (2) UAV の写真測量を用いた点群データ

写真測量とは、複数枚の写真から 3 次元幾何情報を得る SfM (Structure from Motion) の技術のことである。また、UAV とは、カメラやセンサ機器などの様々な機器を搭載可能な無人航空機のことである。カメラ搭載 UAV の写真を図 2-4 に示す。

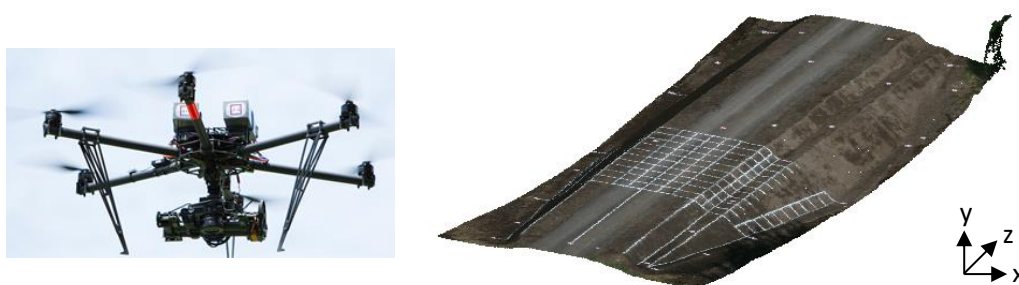


図 2-4 カメラ搭載 UAV と生成した点群データ

UAV は、天候、日照時間や飛行可能エリアなどの条件を満たす必要があるが、短時間かつ広範囲の計測が可能な特徴がある。また、人が立ち入れない場所にも容易に計測が可能なことから、土木分野のみならず、スポーツ、配送、マーケティング、マスメディアなどの様々な分野における活用が期待されている。写真測量技術によって得られる疑似点群データは、ある一地点を基準とした X 座標、Y 座標、Z 座標と色情報を保持している。

### (3) 航空レーザ測量を用いた点群データ

航空レーザ測量とは、航空機に搭載したレーザスキャナから地上にレーザ光を照射し、地上から反射するレーザ光との時間差より得られる地上までの距離と、GPS 測量機、慣性計測装置 (IMU : Inertial Measurement Unit) から得られる位置情報と姿勢情報より、地上の標高や地形の形状の点群データを取得する手法である。航空レーザ測量による点群データの取得方法を図 2-5 に示す。



図 2-5 航空レーザ測量による点群データの取得方法

(引用 : <http://www.s-housing.jp/archives/55450>)

航空レーザ測量は、大規模な地形を一度に計測できることから、大規模な災害時の現況調査、数値表層モデル (DSM : Digital Surface Model)、数値標高モデル (DEM : Digital Elevation Model) や数値地形モデル (DTM : Digital Terrain Model) の作成に利用されている。点群データは、緯度、経度、標高と反射強度の情報を保持している。

#### (4) MMS を用いた点群データ

MMS は、複数台のカメラ、GPS とレーザスキャナを搭載した専用車両を使用して、周囲の映像を撮影しながら道路を走行することで道路及び道路周辺の地物の点群データを取得するシステムである。MMS を図 2-6 に示す。

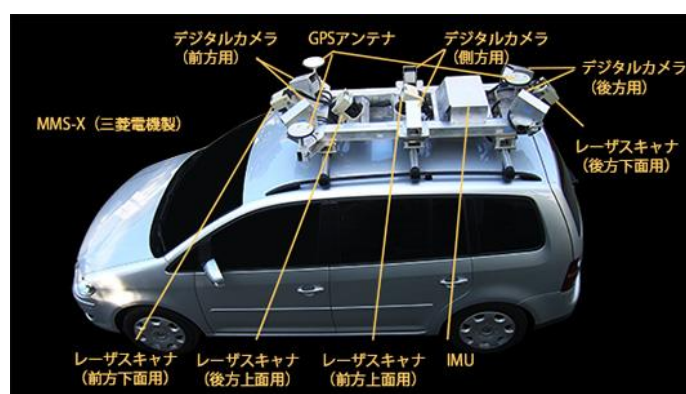


図 2-6 MMS の構成

(引用 : <https://www.pasco.co.jp/products/mms/>)

MMS では、道路周辺の点群データを迅速かつ正確に計測できることから、3次元地図作成や道路現況調査などに利用されている。点群データは、緯度、経度、標高、反射強度と色情報を保持している。

### 2.2.3 3次元データが保持する情報

設計データと点群データが保持する情報を表 2-1 に整理する。

表 2-1 3次元データが保持する情報

	3次元データ	座標系	保持する情報
設計データ	3次元ポリライン	グローバル	断面変化箇所を延長方向に繋いだ3次元の折れ線 (X座標, Y座標, Z座標)
	3次元設計データ	グローバル	道路中心線形や横断形状の3次元幾何情報 (X座標, Y座標, Z座標), 出来形管理項目などの属性情報
点群データ	地上レーザスキャナ	ローカル	X座標, Y座標, Z座標, 反射強度, 色情報
	UAV 写真測量	ローカル	X座標, Y座標, Z座標, 色情報
	航空レーザ測量	グローバル	X座標, Y座標, Z座標, 反射強度
	MMS	グローバル	X座標, Y座標, Z座標, 反射強度, 色情報

表 2-1 より, 座標系に着目すると, 設計データの幾何情報は, 測量データをもとにグローバル座標系で表現されているが, 地上レーザスキャナと UAV 写真測量の点群データはローカル座標系を基準としている. これらをグローバル座標系に変換するためには, 計測範囲内にターゲットを設置し, アフィン変換などの座標変換処理が必要となる.

以上より, 本研究では, 3次元データを利活用する手法を検討するにあたって, これらの特性を考慮する.

## 2.3 既存研究の課題と対応方針

### 2.3.1 施工段階における3次元データ作成作業を省力化する方策

施工段階の情報化施工で必要となる3次元データは, TS 出来形管理における3次元設計データと, MC/MG における3次元ポリラインが作成されている. これらは, フォーマットや使用用途が異なり, それぞれを連携した活用方法が考えられていない. そのため, それぞれの3次元データが個々に作成されており, 作業の重複や負荷が生じている. そのため, 二重化している3次元データを作成作業を一元化できれば, 作業の省力化につながると考えられるが, そうした取り組みは行われていない.

そこで, 本研究では, 図 2-7 に示すように, MC/MG で作成される3次元ポリラインから TS 出来形管理の3次元設計データを生成することで, 異なるフォーマット間のデータを交換する流れを構築する.



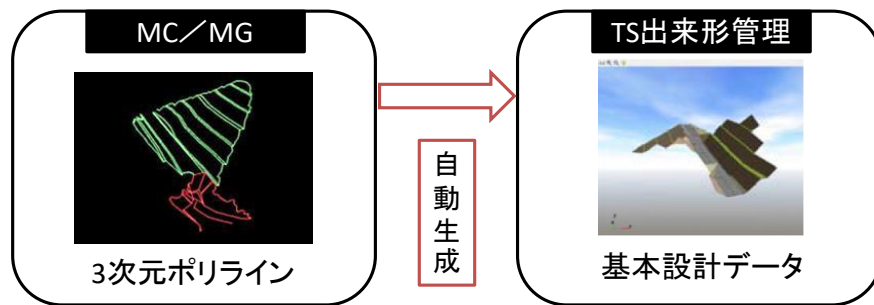


図 2-7 3次元ポリラインから3次元設計データの生成

これにより、施工者の作業の省力化や、二重化作業によるミスの防止につながると考える。

### 2.3.2 施工段階における地上レーザスキャナを用いた施工状況の把握を効率化する方策

図 2-8 に示すように、施工段階において、常時設置して計測された地上レーザスキャナの点群データは、建機や樹木などの地表面以外の点が含まれる。



図 2-8 地上レーザスキャナで計測した地表面の点群データ

そのため、土砂災害現場などの地表面の変位を把握するためには、これらを除去して地表面を抽出するフィルタリング処理が必要となる。既存手法は、航空機搭載型、車載型や地上設置型のレーザスキャナで計測された点群データを用いて、多く提案されている。それらの手法を分類すると、最下点抽出法[53]、ローラ法[54]、傾斜を用いた手法[55]-[59]、領域拡張法を用いた手法[60]、標高差に着目した手法[61]-[63]、平坦度算出による手法[64][65]などが提案されている。これらの手法の内容と課題を表 2-2 に整理する。

表 2-2 地表面の点群データを抽出する既存手法の説明と課題

手法	手法の説明	手法の課題
最下点抽出法	一定の大きさのグリッドに区分し、その中の最低標高値のレーザ計測点を地表面点群データとして抽出する手法.	グリッドサイズが固定であるため、生成されたグリッドに水平面と傾斜面との境界である断面変化点列が含まれた場合、それらの点群データがフィルタリングされる問題がある.
ローラ法	円柱状のローラを点群データの下に接するように転がして樹木を除去した地表面点群データを推定する手法.	上空から計測して樹木下の地表面が必ずレーザ照射されることを前提としている. そのため、横から計測した際に、地物のオクルージョンで地表面点群データが欠損する場合は適用できない.
傾斜を用いた手法	一定間隔のグリッドの最低標高値から TIN データを生成し、角度と距離に応じて TIN データを反復的に生成して地表面点群データを抽出する手法. Terrasolid 社の点群処理ソフト TerraScan で採用.	状況に合わせたパラメータ設定が必要であり、その設定によって尾根と谷の起伏が大きい地表面点群データが抽出されない問題が指摘されている.
領域拡張法を用いた手法	一定間隔のグリッドの最低標高値を地表面の点として抽出後、領域拡張法を用いて、その点の近傍点の探索を繰り返すことで領域を拡張し、地表面点群データを抽出する手法.	領域を拡張するために標高値が近い点群データが連続して存在することが条件であるため、オクルージョンにより地表面点群データが欠損する場合や、地表面に標高差が大きい場合は、精度が悪化する.
標高差に着目した手法	点同士の標高差の違いから点群データをクラスタリングし、地表面点群データを抽出する手法.	地表面に標高差が大きい場合に、正常にクラスタリングできない課題がある.
平坦度算出による手法	平坦部と非平坦部を分類し、平坦部を地表面点群データと推定する手法.	道路などの平らな面を想定しているため、凹凸がある地表面には適していない.

これらの既存手法の課題から、地上レーザスキャナを用いて道路や河川を計測した場合に生じる課題を整理・分析する。

ローラ法と平坦度算出による手法は、現場の建機などの地物を地表面の点群データとして誤抽出するため、地上レーザスキャナの計測データに適していない。また、領域拡張法を用いた手法と標高差に着目した手法は、地表面の起伏が多い場合に課題があるため、法面や凹凸がある地表面には適していない。

一方、最下点抽出法は、処理が単純であるため、地上レーザスキャナの高密度な点群データを対象とした高速処理に適している。また、傾斜を用いた手法は、航空機搭載型レーザスキャナの大規模な点群データ向けに提供されている。そして、航空レーザ測量の成果である数値標高モデル (DEM) の出力に対応しているため、広く活用されている。しかし、最下点抽出法と傾斜を用いた手法を施工現場に適用する際には、以下の 3 点の課題が発生すると考えられる。

- 法面などの傾斜がある地表面の点を正しく抽出できない課題

道路や河川は、傾斜部の法面と平坦部の天端や小段から構成されるため、ブレイクラインが多く存在する。また、道路や河川堤防は湾曲していることが多く、法面も同様に湾曲形状となる。そのため、本手法をそのまま適用した際には、ブレイクラインや湾曲形状の傾斜面点群データが間引かれる課題がある。

- 整地されていない地表面の点を正しく抽出できない課題

傾斜を用いた手法は、最下点を優先的に抽出するため、土砂災害現場などの凹凸があり整地がなされていない地表面の場合、凸部分の地表面点群データが抽出されない。そのため、本手法をそのまま適用した際には、地表面の変位量を正確に算出できない課題がある。

- 建機に隠れた地表面の点を抽出できない課題

建機などの移動体が地表面の上に存在する場合、オクルージョンによる地表面点群データの欠損が常時、様々な地点にて発生する。そのため、本手法をそのまま適用した場合、欠損した箇所の地表面を再現できない。

そこで、本研究では、3つの課題を踏まえて、平坦部と傾斜部でグリッドサイズを変化させることと、連続的に計測された点群データを活用することに注目して、道路や河川における地表面の点群データを高精度に抽出する手法を開発する。これにより、地上レーザスキャナを用いて連続的に計測された点群データから、地表面の変位量を効率的に算出できる利点がある。

### 2.3.3 検査段階における地上レーザスキャナを用いた出来形計測を効率化する方策

地上設置型レーザスキャナの計測精度は、レーザ入射角や計測距離などに依存する。そのため、機器の設置位置によっては、図 2-9 に示すように、同一地点に対して 5m 先から計測された点と 100m 先から計測された点が混在する状況となる。

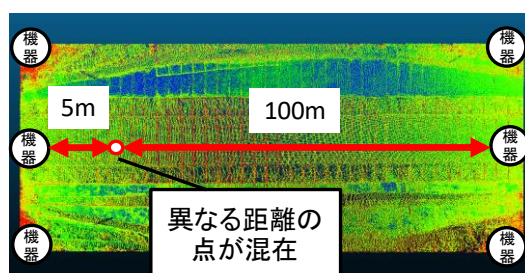


図 2-9 地上レーザスキャナの機器の設置位置（平面表示）

そのため、3次元モデルを生成する際に、不要な点を除去して高精度な点を選択する手法が求められている。点群データを間引くための既存手法として、内挿補間により格子状のグリッドデータを生成する手法[37][66]が提案されている。その手法には、グリッド点から最も近い点を採用する方式や、標高の平均値を採用する方式などがある。しかし、これらは、機器の計測誤差を考慮しないため、精度悪化の原因となる。また、点群処理ライブラリの PCL (Point Cloud Library) [67]では、空中ノイズなどの疎な外れ値を除去するフィルタリングなどがあるが、高密度の点群から高精度な点を選択することはできない。さらに、地表面の最下点を優先的に抽出可能な Terra Scan[68]とよばれる高価な点群処理ソフトがある。しかし、計測誤差により地表面の標高が真値よりも低い場合、計測点の精度が低下する課題がある。

そこで、本研究では、検査段階の地上レーザスキャナの計測において、点群データの特徴に加えて、計測位置の情報を用いることで、地上レーザスキャナの多地点計測において高精度な点群データを抽出する手法を考案する。これは、既存手法では点群データを取捨選択する際、最下点、中央値や標準偏差などから適当と考えられる点を抽出していたのに対し、レーザ計測機器の特性を踏まえることで最確値を選択できることに利点がある。

## 2.3.4 検査段階における UAV 写真測量を用いた出来形計測を効率化する方策

UAV 写真測量における計測条件と解析パラメータの一覧を表 2-3 に示す。また、既存要領の UAV 出来形管理要領[39]や UAV 写真測量の計測精度を検証する既存研究[69]-[71]により推奨される値を記述する。

表 2-3 UAV 写真測量における計測条件と解析パラメータの一覧

No.	項目		説明	既存要領・研究の推奨値
1	計測条件	撮影機材	撮影カメラの種類とパラメータ設定	— (未検証)
2		計測高度	計測位置から計測対象物までの距離	50m 程度
3		ターゲット位置・個数	ターゲットの位置関係と個数	最大限多く設置
4		写真ラップ率	写真同士のラップ率	縦 80%, 横 60%以上
5	解析パラメータ	カメラキャリブレーション	レンズ歪み補正のキャリブレーション	— (未検証)
6		点群生成処理の設定	SfM と MVS 処理の設定	
7		標定点の入力及び補正	標定点の入力と人手の位置補正作業	

No.1 の撮影機材は、UAV に搭載されるデジタルカメラの種類とカメラパラメータの設定である。デジタルカメラの種類は、通常、映像撮影用として GoPro[72]などのコンパクトデジタルカメラ、測量用として  $\alpha 6000$ [73]などの一眼カメラが用いられる。また、カメラパラメータは、フォーカス、シャッタースピード、F 値、ISO 感度といった一眼カメラのパラメータである。既存研究において、これらの違いによる影響が明らかにされていない。No.2 の撮影高度は、地上から UAV までの高さ方向の距離のことであり、これにより写真上に投影された 1 画素に対する地上の寸法（地上画素寸法）が決定される。UAV 出来形管理要領では、1 画素あたり 1cm 以内となるように、50m 程度の飛行が推奨されている。既存研究においても、50m と 100m を比較した場合、100m において精度の低下が顕著に表れることが示されている。No.3 のターゲット位置と個数は、測量された標定点に設置するターゲットの設置場所や設置個数のことである。既存研究において、50m 四方の範囲内で標定点を 3 枚から 13 枚まで設置した場合を比較し、5 枚以上で精度が向上しているため、個数が多い

ほうが良いことを示唆している。No.4 の写真ラップ率は、撮影された写真同士のラップ率のことであり、進行方向のラップ率（以下、縦ラップ率）と隣接コースとのラップ率（以下、横ラップ率）がある。UAV 出来形管理要領では、縦ラップ率が最低 80%、横ラップ率が最低 60%以上と規定される。また、既存研究において、縦ラップ率 60、70、90%と横ラップ率 20、60%の組み合わせパターンで比較し、ラップ率が精度に影響を与える要因であることが示されている。No.5～No.7 は、写真測量ソフトウェアの解析パラメータに関する項目である。これらの設定の違いにより、人的・時間的コストと精度が変化すると考えられるが、既存研究では分析されていない。

そこで、本研究では、No.1～No.7 の計測手法と解析パラメータに着目して、種々の条件の違いによる精度や人的・時間的コストの影響を検証する。そして、その結果をもとに高精度な点群データを生成するための計測手法と解析手法を提案する。これは、実務者の経験量に関わらず要求精度を確保する上で解決すべき要件を明らかにすることを目指す。

### 2.3.5 維持管理段階における UAV 写真測量を用いた災害時の状況把握を効率化する方策

災害発生時において、標定点を設置できない場合に点群データのスケールと座標系を再現できない課題に対して、写真の撮影位置か、写真の被写体の位置情報を取得する方法がある。前者は、UAV 搭載カメラの位置を GNSS 衛星から取得する方法があるが、高価な専用機器[74]が必要となることや高さ方向の誤差が大きい課題[51]がある。後者は、災害前後で変状が起きていない道路や建築物などの地物の位置情報を取得する方法が考えられるが、災害現場で測量することは困難である。

そこで、本研究では、無償公開されている地図データ[75]を活用することで、災害時における UAV 写真測量の新たな解析手法を考案する。提案手法では、まず、離陸地点付近にターゲットを設置することでスケールを決定する。次に、地図データを活用して経緯度と標高を取得することで座標系を再現した点群データを生成する。これにより、災害時の初動対応において、迅速に崩壊土量を算出することを可能とする。

## 2.4 本研究の全体像

前述までに述べた本研究の課題、目的と新規性について図 2-10 に示す。

<b>施工</b>	<p style="text-align: center;"><b>①施工段階における 3次元データ作成作業の省力化手法の提案</b></p> <p>【課題】3次元データを個々に作成しており、作業の重複や負荷が生じていること。</p> <p>【目的】異なるフォーマット間のデータを交換する流れを構築すること。</p> <p>【新規性】データ作成作業の二重化防止と、施工者の作業を省力化できること。</p>	<p style="text-align: center;"><b>②地上レーザスキャナを用いた 施工状況把握の効率化手法の提案</b></p> <p>【課題】施工現場で計測時、建機や植生を除去して地表面の点を抽出する必要があること。</p> <p>【目的】傾斜のある地表面の点群データを抽出し、移動体で欠損した地表面を補完すること。</p> <p>【新規性】常設のレーザスキャナから対象地物を正確に計測し出来高算出が容易になること。</p>
	<p style="text-align: center;"><b>③地上レーザスキャナを用いた 出来形計測の効率化手法の提案</b></p> <p>【課題】多点計測時、同一地点に対して測定精度の異なる点が混在すること。</p> <p>【目的】計測位置の情報を用いることで、高精度な点群データを抽出すること。</p> <p>【新規性】レーザスキャナの特性から最確値を選択し、納品検査の品質を保証できること。</p>	<p style="text-align: center;"><b>④UAV写真測量を用いた 出来形計測の効率化手法の提案</b></p> <p>【課題】UAV写真測量の解析パラメータに関して最適な値を検討する必要があること。</p> <p>【目的】解析パラメータの条件の違いによる精度や人的・時間的コストを明らかにすること。</p> <p>【新規性】実務の経験を問わず、納品検査のための3次元データを生成できること。</p>
<b>維持管理</b>	<p style="text-align: center;"><b>⑤UAV写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法の提案</b></p> <p>【課題】災害時、UAV写真測量で生成した点群データを地理座標系に変換できないこと。</p> <p>【目的】既存資産を用いて、災害時におけるUAV写真測量の解析手法を提案すること。</p> <p>【新規性】現地に立ち入ることなく点群データを生成し、災害規模を迅速に把握できること。</p>	

図 2-10 本研究の全体像

まず、施工段階では、「①3次元データ作成作業の省力化手法の提案」と「②地上レーザスキャナを用いた施工状況把握の効率化手法の提案」を実施する。「①3次元データ作成作業の省力化手法の提案」では、情報化施工のMC/MGとTS出来形管理において、3次元データを個別に作り直す必要があり、作業の二度手間が発生する課題がある。この解決策として、MC/MGの3次元データからTS出来形管理のデータに変換し、3次元データの流通をシームレスに行うための技術開発を実施する。これにより、データ作成作業の二重化防止と施工者の作業省力化を支援する。一方、「②地上レーザスキャナを用いた施工状況把握の効率化手法の提案」では、施工現場の地表面の変化を日々計測し、出来高計測が可能となるが、建機や資材などの対象地物以外のノイズデータが混在する課題がある。この解決策として、現場の対象地物だけを正確に抽出して可視化するための技術開発を実施する。これにより、常設のレーザスキャナから対象地物を正確に計測できるために出来高算出の効率化が期待できる。

次に、検査段階では、「③地上レーザスキャナを用いた出来形計測の効率化手法の提案」と「④UAV写真測量を用いた出来形計測の効率化手法の提案」を実施する。「③地上レーザ

スキャナを用いた出来形計測の効率化手法の提案」では、施工現場において複数の地点から計測する必要があるが、計測距離や入射角の違いにより同一地点に精度が異なる点が混在する課題がある。この解決策として、多地点で計測された点群データを取捨選択して地物形状の品質を向上する手法を考案する。これにより、レーザスキャナの特長から最確値を選択し、納品検査の品質保証が期待できる。一方、「④UAV 写真測量を用いた出来形計測の効率化手法の提案」では、UAV の写真測量は天候、日照、植生などの環境条件や、飛行経路や高度、計測ターゲットの有無などの計測条件が、写真測量ソフトウェアの解析精度に影響する課題がある。この解決策として、各条件の誤差要因を分析し作業規程を作成し、点群データの品質を保証する方法を提案する。これにより、実務の経験を問わず、納品検査のための3次元データを完成させることを目指す。

最後に、維持管理段階では、「⑤UAV 写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法の提案」を実施する。災害時では、迅速な状況把握のためにUAV 写真測量による3次元データの活用が求められる。しかし、現場への立ち入りが困難なことから、平常時と同様に計測ターゲットを配置できず、平面直角座標系の擬似点群データを生成できない。この解決策として、既存構造物をターゲットとして代用することで、災害時に現地に立ち入ることなく点群データを生成する手法を提案する。これにより、現地に立ち入ることなく点群データを生成し、災害前後の横断面比較や土量計算などにより災害規模を迅速に把握することが可能となり、防災・減災を支援する。

以上、①3次元データ作成作業の省力化手法は第3章、②地上レーザスキャナを用いた施工状況把握の効率化手法は第4章、③地上レーザスキャナを用いた出来形計測の効率化手法の提案は第5章、④UAV 写真測量を用いた出来形計測の効率化手法の提案は第6章、⑤UAV 写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法の提案は第7章にて詳述する。



# 第3章 施工段階における3次元データ作成作業の省力化手法の提案

## 3.1 研究の概要

本研究では、MC/MG などで活用される MC/MG の 3 次元ポリラインから、TS 出来形管理で使用される 3 次元設計データを生成することで、施工段階における 3 次元データの作成作業を省力化する手法を提案する。本研究の位置付けを図 3-1 に示す。

施工	<p><b>①施工段階における 3次元データ作成作業の省力化手法の提案</b></p> <p>【課題】3次元データを個々に作成しており、作業の重複や負荷が生じていること。</p> <p>【目的】異なるフォーマット間のデータを交換する流れを構築すること。</p> <p>【新規性】データ作成作業の二重化防止と、施工者の作業を省力化できること。</p>	<p><b>②地上レーザスキャナを用いた 施工状況把握の効率化手法の提案</b></p> <p>【課題】施工現場で計測時、建機や植生を除去して地表面の点を抽出する必要があること。</p> <p>【目的】傾斜のある地表面点群データを抽出し、移動体で欠損した地表面を補完すること。</p> <p>【新規性】常設のレーザスキャナから対象地物を正確に計測し出来高算出が容易になること。</p>
	<p><b>③地上レーザスキャナを用いた 出来形計測の効率化手法の提案</b></p> <p>【課題】多地点計測時、同一地点に対して測定精度の異なる点が混在すること。</p> <p>【目的】計測位置の検知を行うことで、高精度な点群データを抽出すること。</p> <p>【新規性】レーザスキャナの特性から最確値を選択し、納品検査の品質を保証できること。</p>	<p><b>④UAV写真測量を用いた 出来形計測の効率化手法の提案</b></p> <p>【課題】UAV写真測量の解析パラメータに関して最適な値を検討することがあること。</p> <p>【目的】解析パラメータの違いによる精度や人的・時間的コストを明らかにすること。</p> <p>【新規性】実務の経験を問わず、納品検査のための3次元データを生成できること。</p>
維持管理	<p><b>⑤UAV写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法の提案</b></p> <p>【課題】災害時、UAV写真測量で生成した点群データを地理座標系に変換できないこと。</p> <p>【目的】既存資産を用いて、災害時におけるUAV写真測量の解析手法を提案すること。</p> <p>【新規性】現地に立ち入ることなく点群データを生成し、災害規模を迅速に把握できること。</p>	

図 3-1 本章の位置付け

### 3.2 既存システムへの導入

本研究では、TS 出来形管理が適用される土工全般を対象に、3次元ポリラインから3次元設計データを生成する手法を提案する。具体的には、既存研究の3次元CADデータを用いた出来形管理支援システム[4]を基に提案手法を導入する。既存手法による出来形管理支援の流れを図3-2に示す。

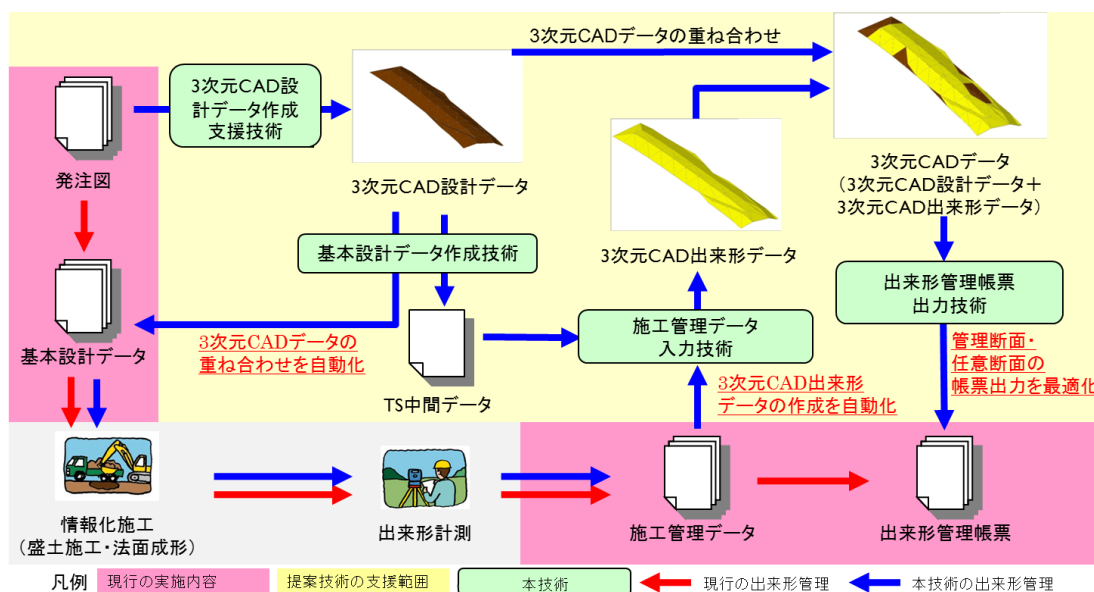


図 3-2 既存手法による出来形管理支援の流れ

上記の手法では、まず、2次元の発注図から独自仕様の3次元CAD設計データを作成する。次に、3次元CAD設計データからTS出来形管理の3次元設計データである3次元設計データを作成し、TS出来形管理を実施する。そして、TS出来形管理の測量成果である施工管理データを用いて、3次元CAD出来形データを作成する。最後に、3次元CAD設計データと3次元CAD出来形データを重ね合わせることで、3次元上で出来形形状を照合検査することが可能となる。また、現要領に合わせた出来形管理帳票の作成が可能である。

本研究では、この既存手法を基にして、図3-3に示すように、3次元ポリラインの入力から3次元設計データの出力までの流れを追加する。

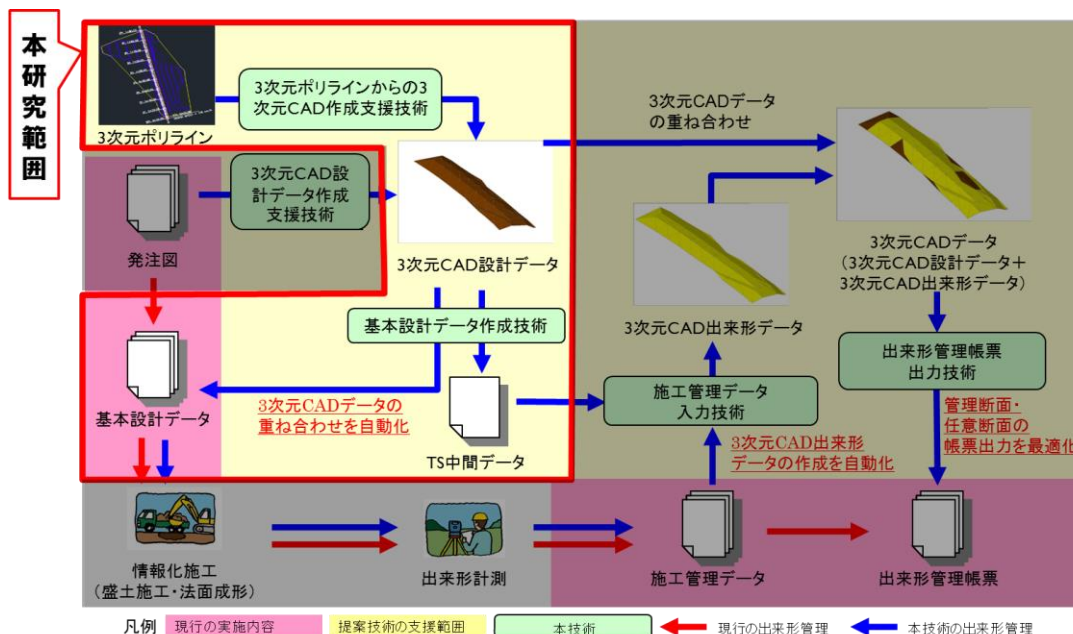


図 3-3 提案手法による出来形管理支援の流れ

既存手法と提案手法それぞれを用いた場合の出来形管理の利用の流れを図 3-4 に示す。

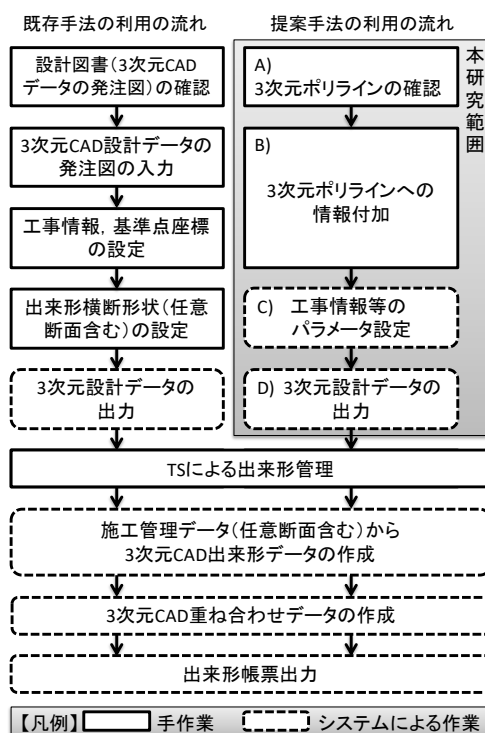
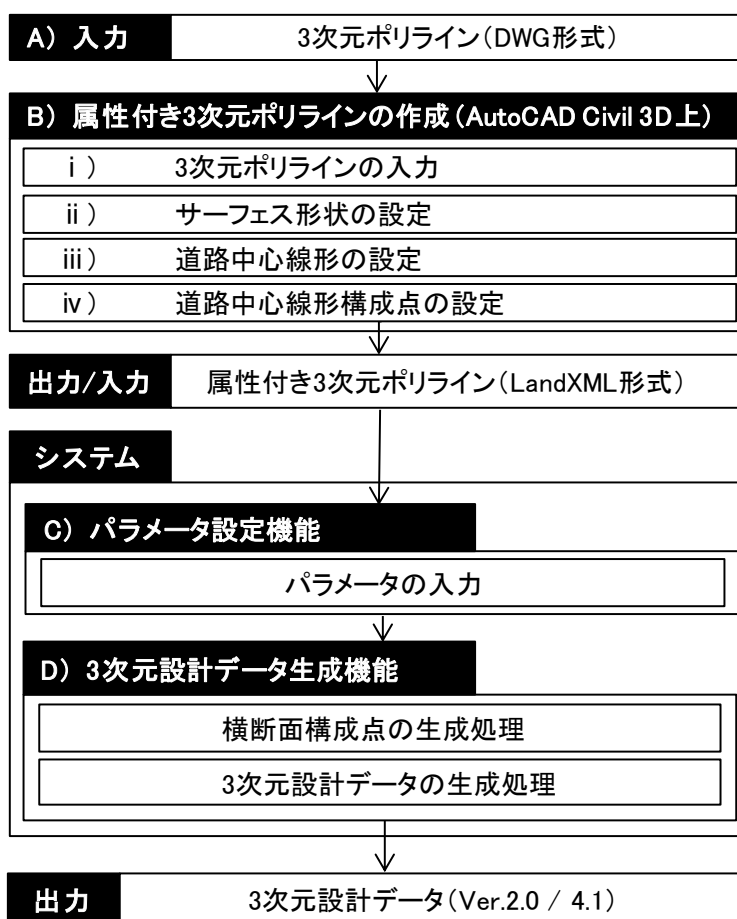


図 3-4 既存手法と提案手法の出来形管理支援の流れ

既存システムでは、TS 出来形管理に必要な3次元設計データを出力するために、発注図から手入力により3次元CAD3次元設計データを作成している。一方、提案手法では、3次元ポリラインから情報を付加した上で、システムにより自動的に3次元設計データを出力可能となる。

### 3.3 提案手法の概要

提案手法の流れを図3-5に示す。



(※図3-4と図3-5のA)~D)が対応)

図 3-5 提案手法の流れ

入力データは、MC/MG の設計データなどに使用される DWG 形式の3次元ポリラインとする。3次元ポリラインとは、断面変化箇所を延長方向に繋いだ折れ線のことであり、設計

業者が CAD ソフトを用いて発注図から手作業で作成している。まず、入力データの 3 次元ポリラインに情報を付加し、属性付き 3 次元ポリラインを作成する。次に、その 3 次元ポリラインをシステムに読み込み、3 次元設計データの生成に必要なパラメータを設定する。最後に、3 次元設計データ生成機能により 3 次元設計データを生成する。

### 3.3.1 属性付き 3 次元ポリラインの作成

属性付き 3 次元ポリラインは、AutoCAD Civil 3D を用いて作成し、LandXML 形式で出力する。LandXML は、仕様[76]が公開されているため採用した。属性付き 3 次元ポリラインのデータ構造は、表 3-1 に示すように、道路中心線形、道路中心線形構成点、3 次元ポリラインの 3 種類の要素から構成される。各要素の情報をそれぞれ Alignments タグ、CgPoints タグ、Surfaces タグに格納する。

表 3-1 属性付き3次元ポリラインのデータ構造

属性付き3次元ポリラインのデータ構造			LandXML		
要素	属性	型	要素	属性	型
属性付き3次元ポリライン			LandXML		
道路中心線形構成点			CgPoints		
	名称 ※表-2 参照	string	CgPoint	name	string
	X, Y, Z 座標値	double		InnerText	double
道路中心線形			Alignments		
	名称	string	Alignment	name	string
	長さ	double		length	double
道路中心線形の主要点			CoordGeom		
	主要点間の角度	double	Line	dir	double
	主要点間の長さ	double		length	double
	X, Y, Z 座標値	double		Start	InnerText
3次元ポリライン (全ライン)			Surfaces		
3次元ポリライン (1ライン)			Surface		
	各構成点	X, Y, Z 座標値	SourceData		
			double	Breaklines	
				Breakline	
			PntList 3D	InnerText	double

道路中心線形構成点の属性である「名称」は、表 3-2 に示す命名規則で設定する。名称の設定例を図 3-6 に示す。ここでは、構成点のオフセット値である幅員中心や横断面の方向角などの設定が可能である。

表 3-2 道路中心線形構成点の名称の命名規則

項目	条件	説明
設計を示す記号	必須	d
構成点名	必須	構成点名
追加距離	任意	構成点名 + 追加距離
方向角	任意	a + 方向角 (度分秒)
幅員中心 (横幅)	任意	w + 幅員中心の横幅 (m)
幅員中心 (縦幅)	任意	h + 幅員中心の縦幅 (m)

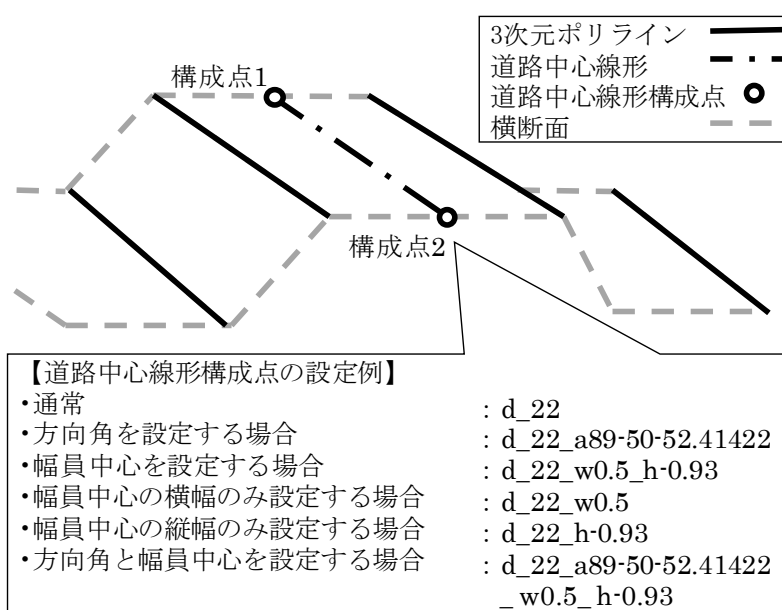
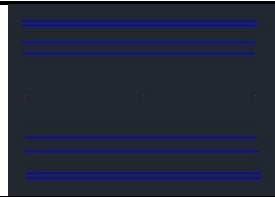
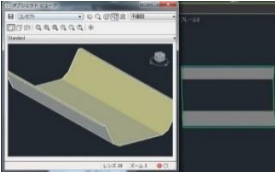




図 3-6 道路中心線形構成点の名称の設定例

3 次元ポリラインの入力から属性付きポリラインの出力までの作成の流れを表 3-3 に示す。

表 3-3 属性付き3次元ポリラインの作成の流れ

Step.	作成手順	図
1	3次元ポリラインの入力	
2	サーフェス形状の作成	
3	道路中心線形の設定	
4	道路中心線形構成点の設定	
5	属性付きポリラインの出力	—

まず、Step.1では、発注図の設計値を元に3次元ポリラインの入力を行う。この作業は、MC/MGの元データとして利用される3次元ポリラインがあると省略できる。Step.2では、Step.1で作成した3次元ポリラインの各ラインを指定してサーフェスを設定する。Step.3では、AutoCAD Civil 3Dの機能である線形作成ツールを用いて、3次元設計データの生成に必要な道路中心線形を設定する。道路中心線形の計算手法[77]には要素法およびIP法があるが、本手法では線形の変化点ごとに数値を設定する方式である要素法を対象とする。これは、プロトタイプ開発において、どちらの手法を用いても問題なく精度検証できたが、要素法の方が容易に実装可能であったためである。Step.4では、出来形管理断面の地点を指定するため、道路中心線形上に構成点を設定する。Step.1からStep.4の作業後、LandXMLの属性付き3次元ポリラインを出力する。

### 3.3.2 パラメータ設定機能

本機能では、提案システムで3次元設計データを生成するために必要な情報を設定する。設定項目の一覧を表3-4に示す。



表 3-4 パラメータの設定項目

項目		条件	説明（入力例）
バージョン		必須	3次元設計データのバージョンを指定（Ver.2.0, 4.1）
構造物情報	構造物種別	必須	構造物種別を指定（道路土工など）
	工事名	任意	工事の名称を入力
	施工業者名	任意	施工業者の名称を入力
	測点形式	必須	測点形式を指定（NO, SP, STA, 距離標）
参照座標系	測地原子	必須	測地原子を指定（JGD2000 など）
	鉛直原子の基準面名	必須	基準面名を指定（T.P など）
	鉛直原子の TP との標高差	必須	TP との標高差を指定（淀川の場合, -1.3(m)）
	水平座標系	必須	水平座標系を指定（平面直角座標系第 5 系など）
	垂直座標系	必須	垂直座標系を指定（H：平均海面からの高さなど）
道路中心線形	道路規格	必須	道路規格を指定（第 1 種第 1 級など）
	設計速度	必須	設計速度を指定（120, 100, 80, 60, 50, 40, 30, 20 (km/h)）
	設計交通量	任意	1 日あたりの台数を入力
測点間隔	主測点間隔	必須	主測点間隔を入力（100 (m) など）
	副測点間隔	必須	副測点間隔を入力（20 (m) など）
横断面の横断構成種別		必須	横断構成の種別を指定（掘削工, 盛土工など）
出来形管理対象の対象範囲		必須	対象範囲を指定（掘削工, 盛土工など）

項目には、工事名などの構造物情報や盛土工などの横断構成種別などがある。各項目は、3次元設計データの仕様で明記することが義務付けられている項目を「必須」、任意記述の項目を「任意」で設定できる。

### 3.3.3 3次元設計データ生成機能

本機能は、横断面構成点の生成処理と3次元設計データの生成処理により構成される。各処理の詳細を次に示す。

## (1) 横断面構成点の生成処理

本処理では、属性付き3次元ポリラインを用いて、3次元設計データに必要な横断面構成点を生成する。処理の流れを図3-7に示す。

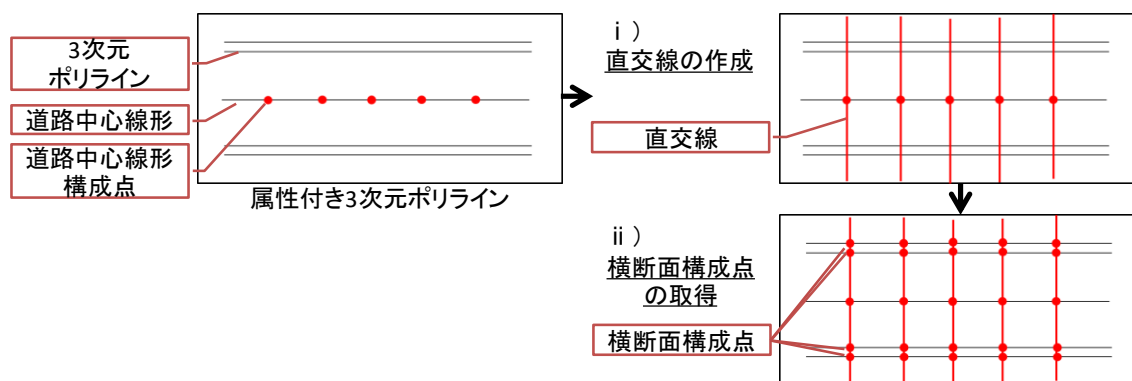


図 3-7 横断面構成点の生成処理手順

図3-7 i) では、道路中心線形構成点ごとに、道路中心線形と直交する直線を作成する。表-2の命名規則に従い方向角を設定している場合、その角度で直線を作成する。図3-7 ii) では、作成した直線と各ポリラインとの交点を取得し、横断面構成点を生成する。

## (2) 3次元設計データの生成処理

処理の流れを図3-8に示す。

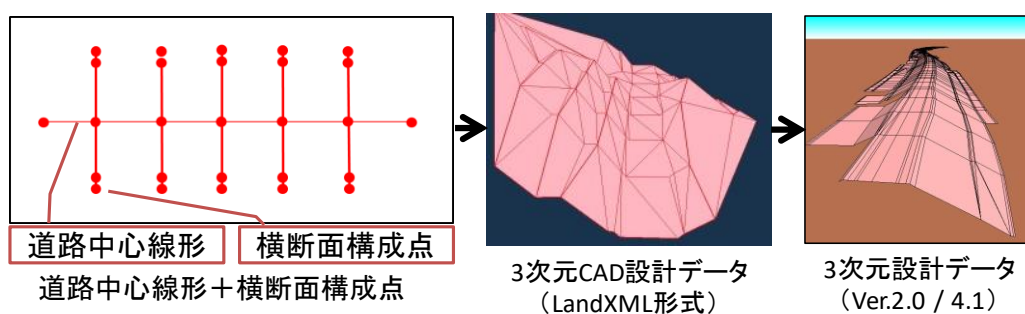


図 3-8 3次元設計データの生成処理手順

本処理では、まず、道路中心線形と横断面構成点の生成処理の結果とを用いて、既存手法で定義する LandXML 形式の 3 次元 CAD 設計データを生成する。そして、その設計データから、既存手法の処理で 3 次元設計データを出力する。

## 3.4 実証実験

### 3.4.1 実験計画

実証実験では、3 次元設計データ生成精度の評価と、3 次元設計データ生成時間の調査の 2 項目を実施する。前者の実験では、実務で使用される 3 次元設計データと提案手法の 3 次元設計データとの精度を比較し、提案手法で生成した 3 次元設計データの精度を評価する。後者の実験では、実務で作成される 3 次元設計データの生成時間と提案手法における 3 次元設計データの生成時間とを比較し、提案手法の有用性を評価する。

### 3.4.2 3次元設計データ生成精度の評価

#### (1) 実験内容

本実験では、提案手法の 3 次元設計データの精度を評価する。評価方法は、図 3-9 に示すように、現場で使用する 3 次元ポリラインから生成した 3 次元設計データ（以下、作成データ）の設計値と、実工事で使用した 3 次元設計データ（以下、設計データ）の設計値とを構成点ごとに比較して誤差を算出する。

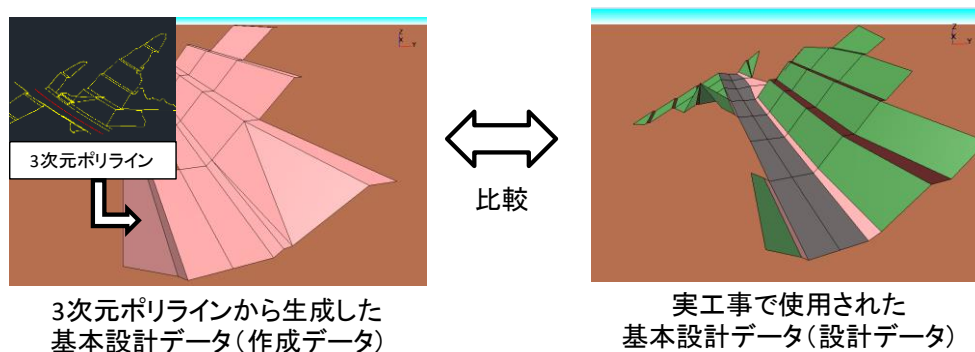


図 3-9 3 次元設計データ生成精度の評価のイメージ

そして、その誤差値が 20mm 未満であれば適合する構成点として評価する。20mm 未満の適合基準に関しては、TS を用いた出来形管理で測定機器に求められる測距精度が±5mm、最小角度が 20" 以下であるため、二点間の測定距離で 20mm 程度は測定誤差が生じることから決定した。

## (2) 実験データ

本実験では、山梨県南巨摩郡身延町大島地先の道路土工の完成図書を用いる。この工事では、中部横断自動車道建設工事のうち、長戸地区の工事延長 248m を対象に切土約 3,500 m<sup>3</sup>、盛土約 20,000 m<sup>3</sup>を施工している。

実験対象の断面は、表 3-5 と図 3-10 に示すように、設計データに記載されている 8 断面 (No.100+80～No.102+20) とする。

表 3-5 対象断面 (図 3-10 の No.と対応)

No.	出来形横断面の測点	No.	出来形横断面の測点
1	NO.100+80	5	NO.101+60
2	NO.101	6	NO.101+80
3	NO.101+20	7	NO.102
4	NO.101+40	8	NO.102+20

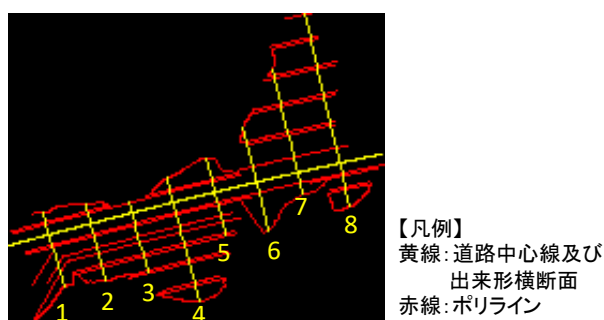


図 3-10 対象断面 (表 3-5 の No.と対応)

## (3) 実験結果と考察

全 8 断面の構成点の評価結果を表 3-6 に示す。

表 3-6 3次元設計データ生成精度の評価

測点 No.	適合点 (件)		不適合点 (件)		誤差の 原因
	幅員差	比高差	幅員差	比高差	
100+80	7	2	2	7	I / II / III
101	9	7	2	4	I / II / III
101+20	10	8	0	2	II / III
101+40	13	11	2	4	I / II / III
101+60	9	7	2	4	I / II / III
101+80	2	2	5	5	I / III
102	6	6	5	5	I / III
102+20	13	13	3	3	I / III
合計	69	56	21	34	—

表 3-6 の集計結果から幅員差 69 件，比高差 56 件が適合する構成点，幅員差 21 件，比高差 34 件が不適合の構成点であった。また，個々の断面の結果として，2 断面を抜粋して設計データと作成データとの比較結果を表 3-7 に示す。

表 3-7 3次元設計データ生成精度の評価結果（断面抜粋）

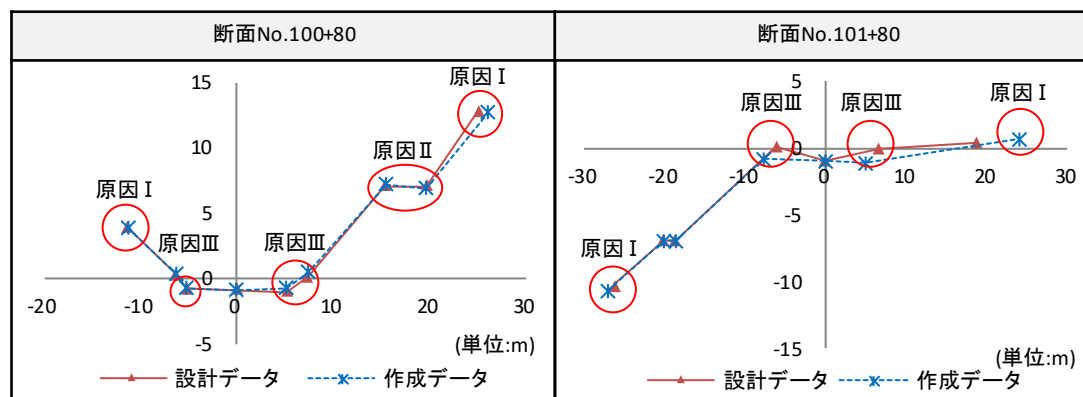


表 3-7 の丸印で示す箇所では値に誤差が発生した。各値の誤差の原因を確認するため，3次元ポリラインを分析したところ，3種類に大別できた。3種類の誤差の発生箇所を図 3-11 に示す。

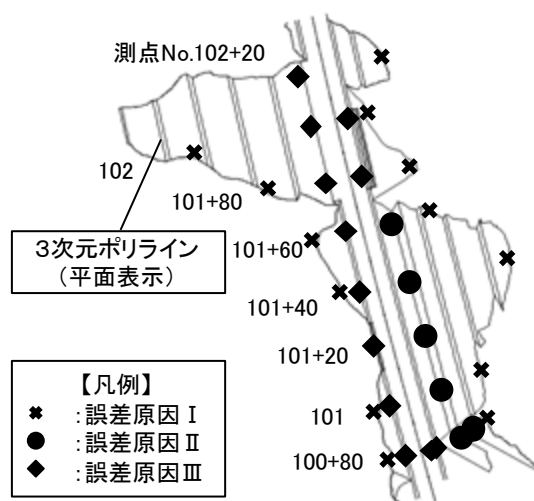


図 3-11 誤差の発生箇所

これらの誤差発生箇所に関して原因を解明するため、3次元ポリラインを作成した技術者と協議した。

原因 I は、3次元ポリラインの長さを現況地盤面まで伸ばす修正作業を行っており、それが起因して設計値との誤差が発生していることがわかった。原因 II は、図 3-12 に示すように、法面が途中で折れ曲がっている箇所に対して、横断面を法面方向に合わせる修正作業がなされたことが原因であることがわかった。

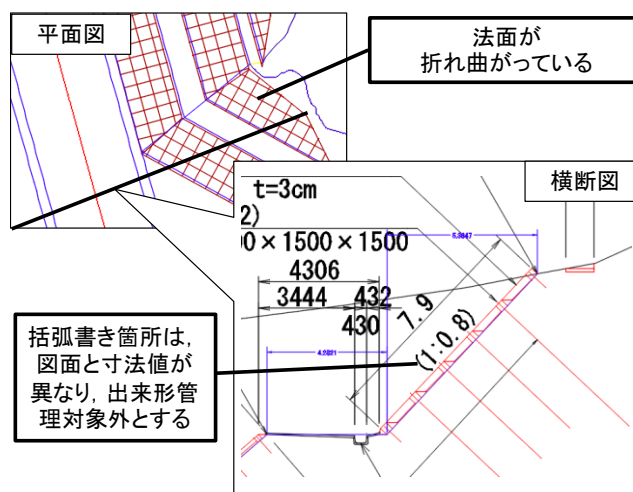


図 3-12 原因 II の詳細

このような箇所は、図面と寸法値とが異なるため、受発注者の協議により出来形管理対象外とされている。原因Ⅲは、工事途中で出来形管理対象の箇所が変更されたことが原因であることがわかった。

以上のことから、原因ⅠとⅢは現場合わせによる設計値と施工データとの齟齬が原因であるため、誤差が発生していることは正しい。また、原因Ⅱは本研究では対象外であることがわかった。本実験結果より、提案手法で 3 次元ポリラインから生成した 3 次元設計データは、実務に適用できる可能性があることが明らかになった。

### 3.4.3 3次元設計データ生成時間の調査

#### (1) 実験内容

本実験では、図 3-13 に示すように、提案手法による 3 次元ポリラインの作成から 3 次元設計データの生成までにかかる時間を調査する。

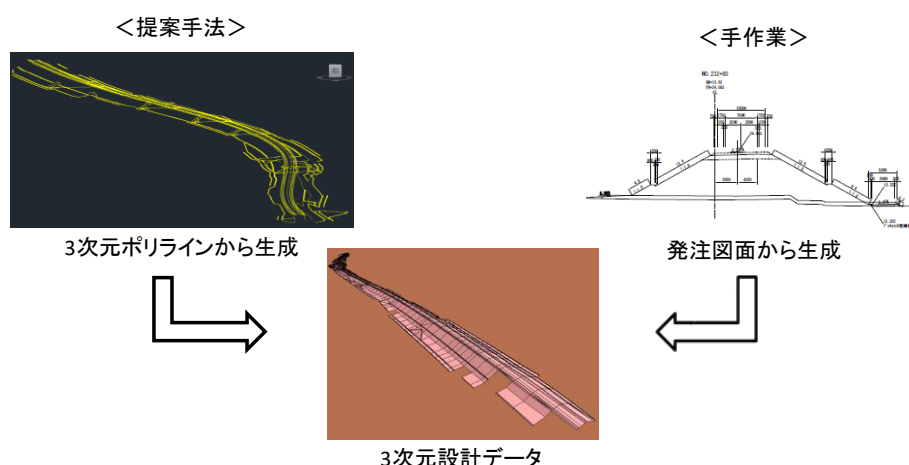


図 3-13 3次元設計データ生成時間の調査のイメージ

評価方法は、既存研究[33]で記述している手作業で 3 次元設計データを作成する場合にかかる時間を基準として、提案手法で 3 次元設計データを生成した場合の時間と比較する。

#### (2) 実験データ

本実験では、茨城県常総市大生郷町地先の圏央道の道路土工の完成図書を用いる。この工事では、工事延長約 1,943m を対象に路体盛土工約 471,000 m<sup>3</sup>を施工している。

対象の管理断面は、横断図に記載される123断面とする。提案手法により生成した3次元設計データを図3-14に示す。

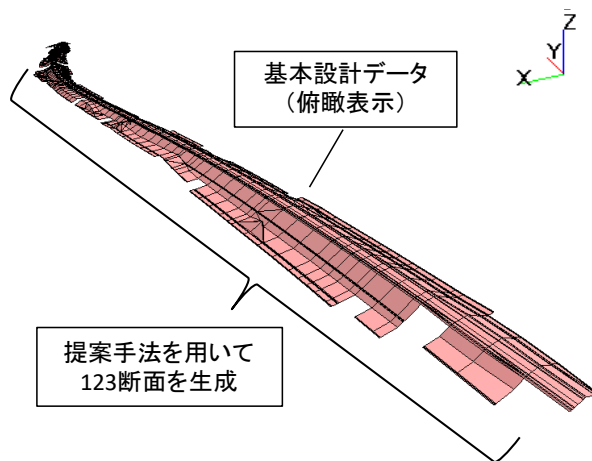


図 3-14 提案手法による3次元設計データの生成結果

### (3) 実験結果と考察

提案手法の生成時間の結果を表3-8に示す。

表 3-8 提案手法による3次元設計データの作成時間

作成手順		作成時間
3次元ポリラインの作成	3次元ポリラインの入力	無し (提供データのまま活用)
	サーフェス形状の設定	約120分
	道路中心線形の設定	数分
	道路中心線形構成点の設定	約60分
3次元設計データの生成 (プログラム)		数秒
合計		約3時間

入力データである3次元ポリラインは、設計時に作成されることを想定しているため、作成時間がかからないものとした。実験結果より、提案手法では123断面の3次元設計データを約3時間でできることがわかった。既存研究[33]では、発注図から手作業で3次元設計データを作成する場合、工事延長783mを対象に約16時間を要した。これを本実験の延長に換算した場合、作成に約40時間が必要となる。したがって、手作業と比較して10分の1以下の大幅な省力化が実現できたといえる。



### 3.5 提案手法の課題と解決策

実証実験より、提案手法で生成した 3 次元設計データは実務へ適用可能であり、また、提案手法を用いることで作業の省力化につながる事が明らかとなった。しかし、実証実験の中で、実務で利用するためには、いくつかの課題があることがわかった。それらを表 3-9 に示す。

表 3-9 提案手法の課題一覧

分類	項目	内容
作業負荷の課題	3次元ポリラインの設定	実務で利用される3次元ポリラインはDWG形式であるが、提案手法で作成する属性付き3次元ポリラインはLandXML形式である。そのため、AutoCAD Civil3Dを使用して、DWG形式からLandXML形式へ変換するための作業が必要となる。
	道路中心線形の設定	
	道路中心線形構成点の設定	
3次元ポリライン作成時の課題	3次元ポリラインの長さ不足	実務で利用される3次元ポリラインは、横断面と3次元ポリラインが交差していない場合がある。その箇所では、交点が得られないため、横断面構成点を作成できない。
	不要な3次元ポリラインの混在	実務で利用される3次元ポリラインは、出来形管理に不要なポリラインが混在している場合がある。その箇所では、設計図には存在しない構成点を作成されることになる。
システム設定の課題	種別と工種の設定	3次元設計データでは、横断面単位および出来形管理対象点単位により、種別（法面、小段、道路面、その他）と工種（掘削工、盛土工など）を設定可能である。提案システムでは、全横断面および全出来形管理対象点に対して、同一の種別（その他）と工種（任意名称）を設定している。
	線形計算手法のIP法への対応	3次元設計データは、道路中心線形の線形計算手法として、IP法と要素法があるが、提案システムでは、要素法のみを対象としている。

課題は、作業負荷の課題、3次元ポリライン作成時の課題、システム設定の課題の3種類に分類される。これらの課題に対して、技術者と協議して解決策を検討した。各課題に対する解決策の詳細を次に記述する。

## (1) 作業負荷の課題への解決策

提案手法では、システムとの親和性がある LandXML を採用したが、実務で利用されている3次元ポリラインはDWG形式である。そのため、DWG形式の3次元ポリラインの情報をそのままシステムに読み込むことができれば、LandXMLへ変換するための作業がなくなり、さらなる作業の省力化につながる。しかし、DWG形式はバイナリデータであるため、システムへの読み込みが困難である。そこで、DWG形式のファイルをAutoCADの中間フォーマットであるDXF形式で保存し、属性を付与する方法が一案として考えられる。

## (2) 3次元ポリライン作成時の課題への解決策

3次元ポリライン作成時の課題は、図3-15に示すように、3次元ポリラインの長さ不足の課題と、不要な3次元ポリラインの混在の課題の2種類がある。

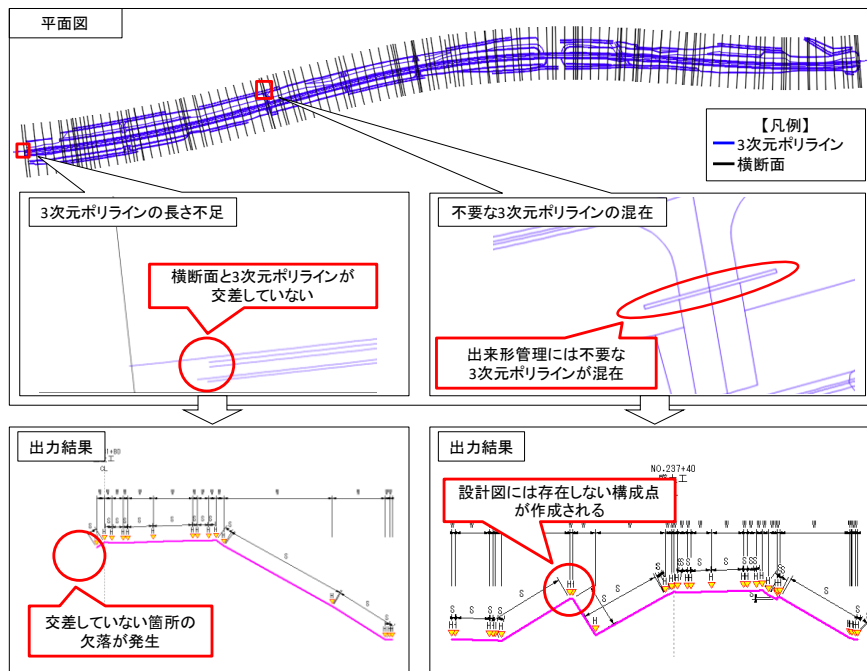


図 3-15 3次元ポリライン作成時の課題

3次元ポリラインの長さ不足の課題に対しては、その作成時に、3次元ポリラインと横断面が交差するように留意することで解決できる。また、不要な3次元ポリラインの混在の課題に対しては、出来形管理に利用する要素のみを格納したレイヤを作成する方法がある。そのことで、レイヤ分けによって、システムで必要な3次元ポリラインのみを取り扱うことができる。

### (3) システム設定の課題への解決策

システム設定の課題は、種別と工種の設定の課題と、線形計算手法のIP法への対応の課題の2種類がある。前者の課題の詳細を図3-16に示す。

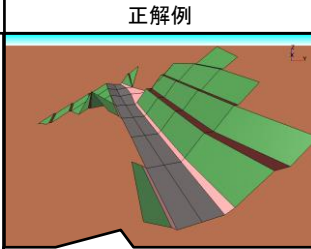
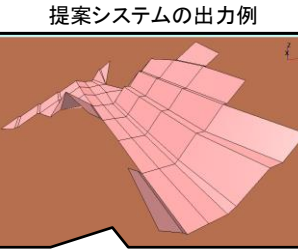
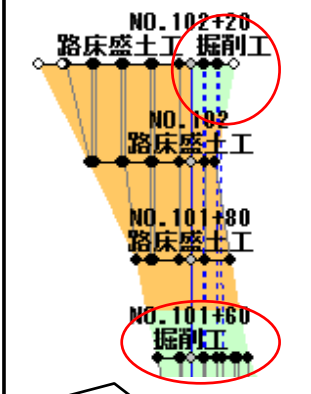
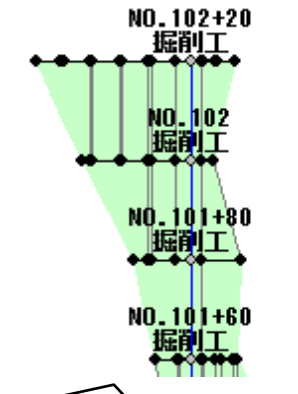
	正解例	提案システムの実出力例
種別	 <p>構成点ごとに種別 (法面, 小段, 道路面, その他) を設定可能</p>	 <p>全構成点の工種が 「その他」に設定される</p>
工種	 <p>横断面単位および出来形管理 対象点単位で工種を設定可能</p>	 <p>全横断面および全出来形管理 対象点に同じ工種が設定される</p>

図 3-16 種別と工種の設定の課題

3次元設計データの種別と工種の設定の課題に対しては、そのデータをシステム上に表示し、横断面単位および出来形管理対象点単位で属性情報を設定する機能を開発することにより解決できる。この開発に当たっては、種別と工種を設定するためのインターフェイスが必要となる。また、線形計算手法のIP法への対応の課題に対しては、IP法で作成した道

路中心線形を要素法のデータに変換する技術を開発して解決することが一案として考えられる。

## 3.6 まとめ

本研究では、MC/MGとTS出来形管理で活用される3次元データが個々に作成されており、作業の重複や負荷が生じている課題を解決するために、MC/MGで作成される3次元ポリラインからTS出来形管理の3次元設計データに変換することで、異なるフォーマット間のデータを交換する流れを構築した。実証実験では、提案手法で生成した3次元設計データの精度を検証し、技術者との協議により提案手法の有用性を示した。また、3次元設計データの生成時間を計測し、作成作業の大幅な省力化が可能であることを示した。以上のことから、本研究は、3次元データの作成作業の重複や負荷が生じている課題を解決する新しい手法を提案し、有用性を実証した。しかし、実務に適用する際に、次に示す3つの課題があることが分かった。

1つ目の課題は、実務で利用される3次元ポリラインはDWG形式であるが、提案手法で作成する属性付き3次元ポリラインはLandXML形式であり、フォーマットが異なることである。これは、DWG形式のファイルをAutoCADの中間フォーマットであるDXF形式で保存し、属性を付与する方法で解決できると考えられる。2つ目の課題は、実務で利用される3次元ポリラインは、横断面と3次元ポリラインが交差していない場合や、出来形管理に不要なポリラインが混在している場合があり、作成ミスが発生することである。これは、3次元ポリライン作成作業時にレイヤ分けの概念を加えることで解決できる。3つ目の課題は、3次元設計データの仕様として、種別と工種の設定やIP法による道路中心線形の設定が可能であるが、提案システムで対応していないことである。これは、対応する機能を新たに開発することで解決できる。今後は、これらの課題に対する解決策を実装し、実務で利用可能な技術へと発展させることを目指す。

## 第4章 地上レーザスキャナを用いた施工状況把握の効率化手法の提案

### 4.1 研究の概要

本研究では、地上レーザスキャナで計測された点群データから地表面の点を抽出することにより、施工段階における地上レーザスキャナを用いた施工状況の把握を効率化する手法を開発する。本研究の位置付けを図 4-1 に示す。

施工	<p>① 施工段階における 3次元データ作成作業の省力化手法の提案</p> <p>【課題】3次元データを個々に作成しており、作業の重複や負荷が増していること。</p> <p>【目的】異なるフォーマットのデータを交換する流れを構築すること。</p> <p>【新規性】データ作成作業の二重化防止と、施工者の作業を省力化できること。</p> <p style="text-align: center; font-size: 2em;">3章</p>	<p>② 地上レーザスキャナを用いた 施工状況把握の効率化手法の提案</p> <p>【課題】施工現場で計測時、建機や植生を除去して地表面の点を抽出する必要があること。</p> <p>【目的】傾斜のある地表面の点群データを抽出し、移動体で欠損した地表面を補完すること。</p> <p>【新規性】常設のレーザスキャナから対象地物を正確に計測し出来高算出が容易になること。</p>
	<p>③ 地上レーザスキャナを用いた 出来形計測の効率化手法の提案</p> <p>【課題】多地点計測時、同一地点に対して測定精度の異なる点が混在すること。</p> <p>【目的】計測位置の検知を行うことで、高精度な点群データを抽出すること。</p> <p>【新規性】レーザスキャナの特性から最確値を選択し、納品検査の品質を保証できること。</p> <p style="text-align: center; font-size: 2em;">5章</p>	<p>④ UAV写真測量を用いた 出来形計測の効率化手法の提案</p> <p>【課題】UAV写真測量の解析パラメータに関して最適な値を検討することがあること。</p> <p>【目的】解析パラメータの違いによる精度や人的・時間的コストを明らかにすること。</p> <p>【新規性】実務の経験を問わず、納品検査のための3次元データを生成できること。</p> <p style="text-align: center; font-size: 2em;">6章</p>
維持管理	<p>⑤ UAV写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法の提案</p> <p>【課題】災害時、UAV写真測量で生成した点群データを地理座標系に変換できないこと。</p> <p>【目的】既存資産を用いて、災害時におけるUAV写真測量の解析手法を提案すること。</p> <p>【新規性】現地に立ち入ることなく点群データを生成し、災害規模を迅速に把握できること。</p> <p style="text-align: center; font-size: 2em;">7章</p>	

図 4-1 本章の位置付け

## 4.2 提案手法の概要

本研究では、平坦部と傾斜部でグリッドサイズを変化させることに着目し、傾斜のある地表面の点群データを抽出する手法を考案する。また、常設された地上レーザスキャナが1日に複数回計測できる特徴に着目し、連続的に計測された2時期の点群データを用いて、移動体のオクルージョンを考慮して地表面の点群データを補完する手法を提案する。提案手法の処理フローを図4-2に示す。

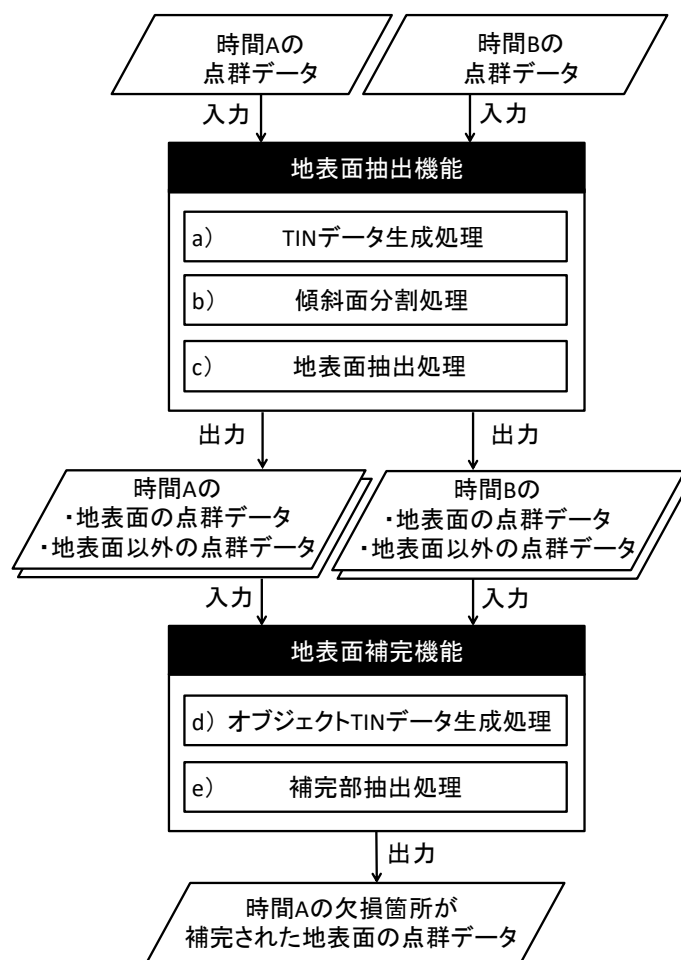


図 4-2 提案手法の処理フロー

提案手法は、地表面点群データ抽出機能と地表面点群データ補完機能により構成される。地表面点群データ抽出機能では、「傾斜がある地表面の点を正しく抽出できない課題」と「整地されていない地表面の点を正しく抽出できない課題」を解決するために、地上設置型レーザスキャナの計測により取得された点群データを入力し、地表面点群データとノイズデータを出力する。地表面点群データ補完機能では、「建機に隠れた地表面の点を抽出できない

課題」を解決するために、連続的に計測した時間 A と時間 B の点群データを用いて、地表面点群データ抽出機能により出力したそれぞれの処理結果を入力し、時間 A の欠損箇所を補完した地表面点群データを出力する。なお、時間 B は、時間 A で計測された建機の移動後に計測する。ただし、工事の進捗により地表面の形状が変化しないように、同じ日に計測する必要がある。

## 4.2.1 地表面点群データ抽出機能

本機能は、地表面 TIN データ生成処理、地表面 TIN データ分割処理、地表面点群データ抽出処理により構成される。

### (1) 地表面 TIN データ生成処理

本処理では、最下点抽出法を参考に、地表面候補の TIN データを生成する。処理手順を次に記述する。また、処理イメージを図 4-3 に示す。

- ① 点群データを一定間隔のグリッドに分割する。
- ② グリッドごとに最下点を抽出する。このとき、グリッド幅である格子長は、建機の誤抽出を避けるために、車体の大きさより大きく設定する。
- ③ 最下点同士を結んで三角形の網からなる TIN データを生成する。
- ④ TIN データを構成する各三角形に着目し、その角度が垂直に近い場合は地表面ではなく建物や建機と考えられるため、三角形の構成点から標高が最も高い点を除去する。そして、残りの点を用いて再度 TIN データを生成する。

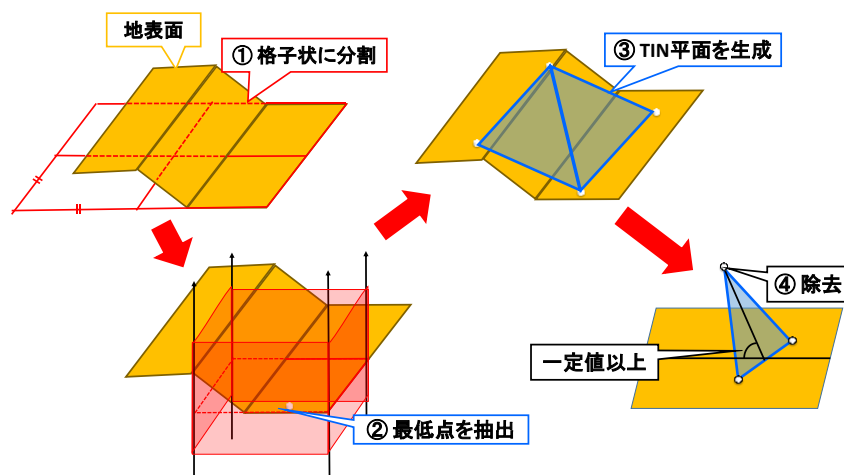


図 4-3 地表面 TIN データ生成処理

## (2) 地表面 TIN データ分割処理

本処理では、地表面の傾斜部の精度向上を目的として地表面 TIN データの傾斜面を細分化する。処理手順を次に記述する。また、処理イメージを図 4-4 に示す。

- ① 傾斜面とする角度の範囲を設定し、この範囲に含まれる三角形を抽出する。
- ② 次に、その三角形を一定間隔のグリッドに分割する。
- ③ そして、グリッドの各頂点から標高方向に直線を引き、直線で囲まれる点群データから最下点を抽出する。
- ④ 最後に、抽出した点と地表面 TIN データ生成処理で抽出した点から地表面 TIN データを再生成する。

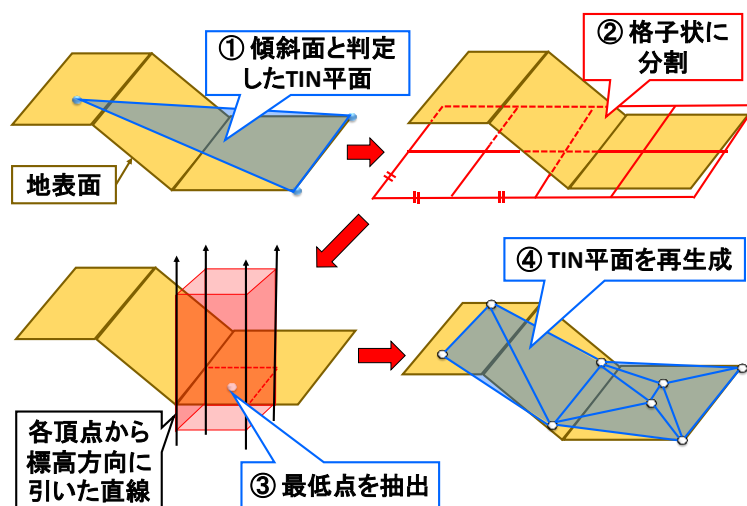


図 4-4 地表面 TIN データ分割処理

## (3) 地表面点群データ抽出処理

本処理では、凹凸があり整地されていない地表面の抽出を目的に、生成した地表面 TIN データから一定範囲の点を抽出する。処理手順を次に記述する。また、処理イメージを図 4-5 に示す。

- ① まず、点群データの各点から TIN データまでの垂直距離を算出する。
- ② 次に、算出した垂直距離の中で最も下側にある点を抽出する。
- ③ そして、②で抽出した点から一定の距離以内の場合は地表面点群データとして抽出する。また、一定の距離以上の場合はノイズデータとして除去する。



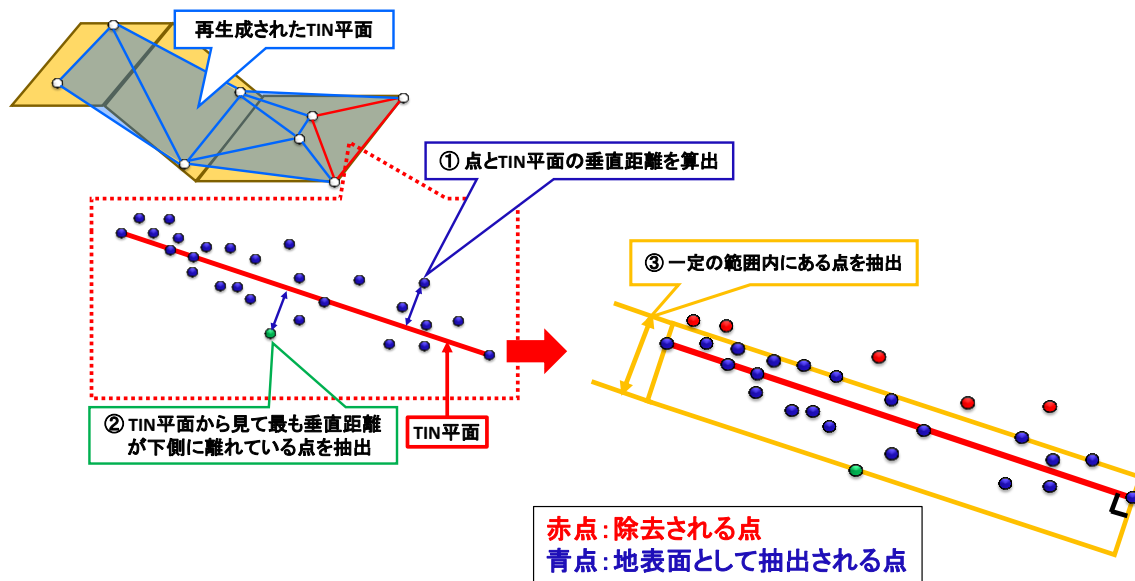


図 4-5 地表面点群データ抽出処理

## 4.2.2 地表面点群データ補完機能

本機能は、オブジェクト TIN データ生成処理と補完部抽出処理により構成される。

### (1) オブジェクト TIN データ生成処理

本処理では、時間 A のノイズデータを入力とし、DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) 法[78][79]により分類したオブジェクトごとに TIN データを生成する。処理手順を次に記述する。また、処理イメージを図 4-6 に示す。

- ① まず、ノイズデータに対して、DBSCAN 法を用いてクラスタリング処理を行い、オブジェクトごとに分割された点群データを取得する。
- ② 次に、各オブジェクトの点群データを対象に、ドロネー分割を用いて TIN データ（以下、オブジェクト TIN データ）を生成する。

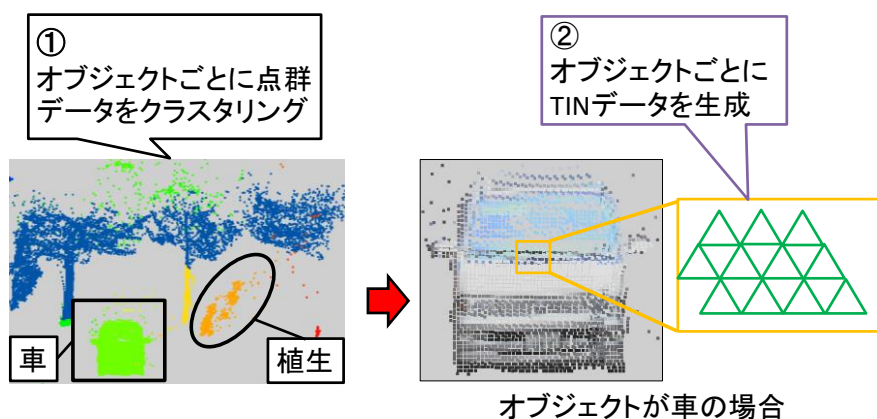


図 4-6 オブジェクト TIN データ生成処理

## (2) 補完部抽出処理

本処理では、時間 B の地表面点群データからオクルージョンが発生している領域上の地表面点群データを抽出する。処理手順を次に記述する。また、処理イメージを図 4-7 に示す。

- ① まず、計測位置からオブジェクト TIN データの各頂点に直線を引き、オブジェクト TIN データの後ろの補完領域を取得する。
- ② そして、時間 B の地表面点群データから、Ⅲの領域上に存在する点群データを抽出し、時間 A の欠損箇所を補完する地表面点群データとする。

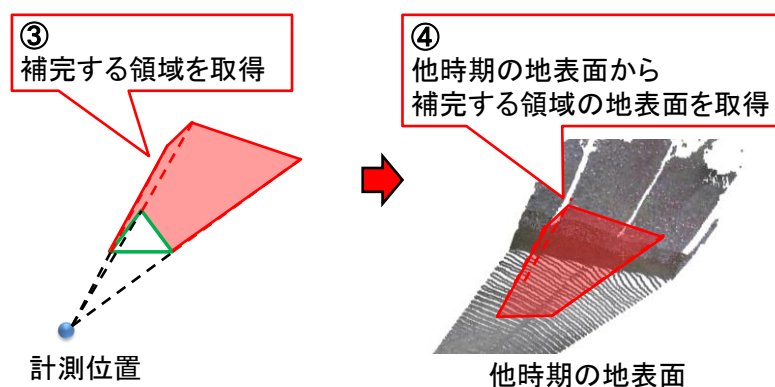


図 4-7 補完部抽出処理

## 4.3 実証実験

### 4.3.1 実験計画

本実験では、本提案手法の有用性を確認するため、図 4-8 に示す実験計画に従って、評価実験を行う。

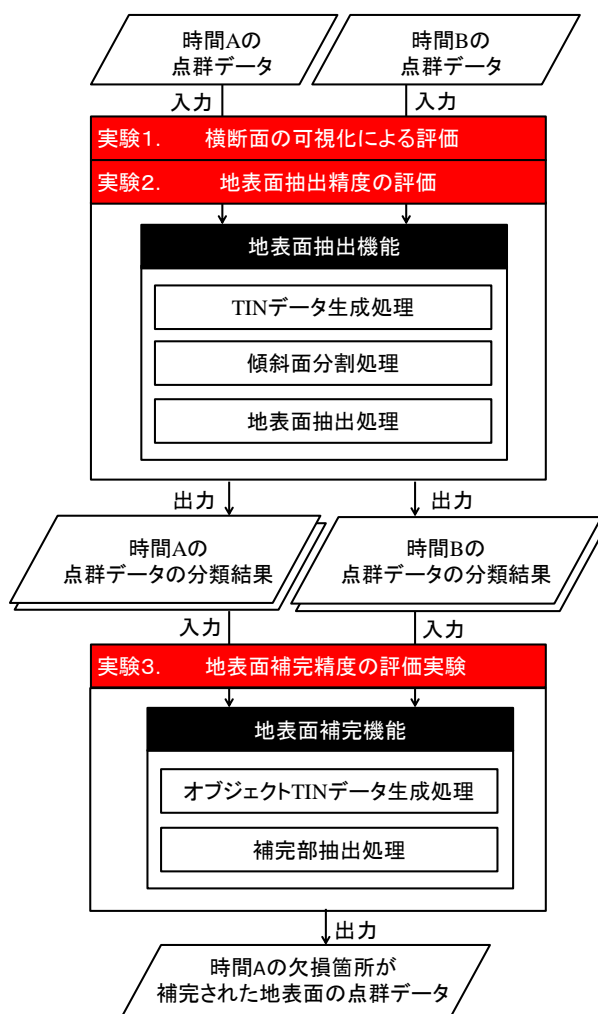


図 4-8 実験計画

実験 1 では、地表面点群データを対象に、断面の目視確認により傾斜面を抽出できることを確認する。また、実験 2 では、建機の抽出精度の評価により未整地の地表面を抽出できることを確認する。そして、実験 3 では、欠損箇所を補完した地表面点群データと欠損がない地表面点群データとの断面の比較により欠損箇所を補完ができることを確認する。

### 4.3.2 実験環境

#### (1) 実験場所

実験1と2の実験場所は、図4-9に示す淀水垂地区の河川堤防の築堤工事と加古川流域の河道掘削工事で実施する。



図4-9 実験場所（実験1，2）

実験1では両方の現場のデータを使用する。また、実験2は地表面が未整地である後者の現場のデータを使用する。また、実験3の実験場所は、図4-10に示す関西大学高槻キャンパス内の斜面で実施する。

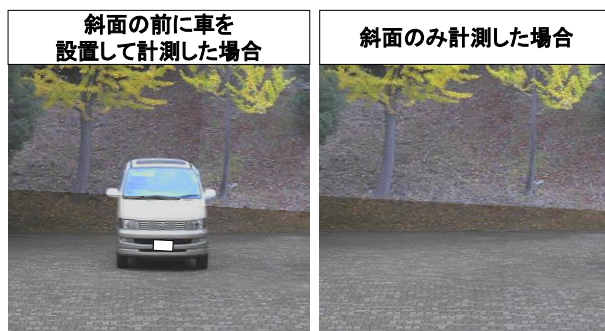


図4-10 実験場所（実験3）

#### (2) 計測機器と計測位置

地上レーザスキャナは、図4-11、表4-1に示す三菱電機エンジニアリング社製の「フィールドビューア」を用いる。



図 4-11 地上レーザスキャナの計測風景

表 4-1 地上レーザスキャナの仕様

項目	内容
製品名	フィールドビューア
レーザクラス	Class 1M
測距距離	10m～250m
測距誤差	±0.1m
測距点数	約 8,500pt / 90s(1 回の計測)

実験 1, 2 における設置箇所は, 現場とほぼ同じ高さの数十 m 離れた位置, 実験 3 における設置箇所は, 車から 20.0m 離れた位置とし, レーザ計測により点群データを取得する.

### 4.3.3 パラメータの設定

提案手法で用いるパラメータとその設定値を表 4-2 に示す.

表 4-2 パラメータの一覧

パラメータ	設定値	関連処理
格子長	1.0, 3.0, 10.0m	地表面 TIN データ生成処理
傾斜面最大角度	80 度	地表面 TIN データ分割処理
傾斜面最小角度	5 度	地表面 TIN データ分割処理
傾斜面の分割数	3	地表面 TIN データ分割処理
地表面の点の抽出長	0.2m	地表面点群データ抽出処理
クラスタ間の距離	0.5m	オブジェクト TIN データ生成処理

「格子長」は、地表面 TIN データ生成処理で点群データを一定間隔のグリッドに分割する値である。「傾斜面最大角度」と「傾斜面最小角度」は、地表面 TIN データ分割処理で傾斜面とする角度の範囲を設定する値である。「傾斜面の分割数」は、地表面 TIN データ分割処理で TIN データを一定間隔のグリッドに分割するための値である。「地表面の点の抽出長」は、地表面点群データ抽出処理で TIN データから一定範囲の点を抽出するための閾値である。「クラスタ間の距離」は、オブジェクト TIN データ生成処理の DBSCAN 法によるクラスタリング処理で、任意の点をクラスタに含めるかどうかを判定するための閾値である。これらのパラメータは、施工現場の状況に応じて最適値が異なる。

### (1) 格子長

格子長は、グリッド内に地表面の点を含む必要があるため、建機の大きさより大きく設定する。本実験では、複数の建機が計測されており、それらの大きさは様々なため、1.0, 3.0, 10.0m の 3 種類を設定し、これらの結果を比較する。

### (2) 傾斜面最大角度と傾斜面最小角度

傾斜面最大角度と傾斜面最小角度は、傾斜面とする角度の範囲を指定する値である。傾斜面最小角度を小さく、傾斜面最大角度を大きくした場合、傾斜面の凹凸部は地表面点群データとして正しく抽出できるが、建機も抽出される割合が増加する。一方、傾斜面最小角度を大きく、傾斜面最大角度を小さくした場合は、建機は地表面点群データから除去できるが、傾斜面の凹凸部は正しく抽出できない可能性がある。そのため、計測状況に応じて適切な値を設定する必要がある。

本実験では、傾斜面最小角度を 4 度、傾斜面最大角度を 80 度に設定する。傾斜面最小角度は、施工中による地表面の凹凸を考慮するためである。また、傾斜面最大角度は、建機の高さが約 5.0m であり、建機の上部の点を地表面 TIN データとして誤って生成した場合、その TIN の角度が垂直に近くなると考えたためである。

### (3) 傾斜面の分割数

傾斜面の分割数は、傾斜面とした三角形を囲む矩形 1 辺当たりのグリッドによる分割数を指定する値である。値を小さくした場合、建機は地表面点群データから除去できるが、傾斜面の凹凸部は抽出できない場合がある。一方、値を大きくした場合、傾斜面の凹凸部は地表面点群データとして正しく抽出できるが、建機の一部も抽出される傾向がある。そのため、計測状況に応じて適切な値を設定する必要がある。

本実験では、建機のアーム部の最小幅が約 0.3m であり、分割数を増やして、この幅よりも小さいグリッドが構成されると、誤抽出の原因となる。そのため、格子長が 1.0m の場合において、分割時のグリッド幅が 0.3m 以下にならないように、分割数は 3 に設定する。

#### (4) 地表面の点の抽出長

地表面の点の抽出長は、任意の点と TIN データとの垂直距離を用いて、地表面の点として抽出するかを判定するための閾値である。値を小さくした場合、建機の抽出精度が向上するが、地表面の抽出精度が低下する。一方、値を大きくした場合、逆の傾向となる。そのため、入力データに合わせて適切な値を設定する必要がある。

本実験では、一部の地表面を目視確認して、地表面の凹部と凸部との標高差が 0.2m 程度であったため、地表面の点の抽出長は 0.2m に設定する。

#### (5) クラスタ間の距離

クラスタ間の距離は、DBSCAN 法によるクラスタリング処理で、任意の点をクラスタに含めるかを判定するための点間距離の閾値である。値を小さくした場合、欠損部の補完領域が正確になるが、処理時間が膨大になる。一方、値を大きくした場合、処理時間が短くなるが、欠損部の補完領域が曖昧になり、欠損していない範囲も余分に補完される割合が増加する。

本実験では車と植生との距離が 0.5m 程度であり、それらを異なるオブジェクト TIN データとして分類するために、クラスタ間の距離は 0.5m に設定する。

### 4.3.4 実験 1. 横断面の可視化による評価

#### (1) 実験内容

本実験では、土工の点群データを用いて提案手法の結果を横断面で目視確認し、提案手法の有用性を検証する。検証手順は、まず、提案手法により出力された地表面点群データを横断方向に約 1.0m の幅で取得して横断面を生成する。次に、生成した横断面上の建機や植生がノイズデータ、傾斜面が地表面点群データとして抽出されることを目視で確認する。

#### (2) 実験結果と考察

2 つの施工現場における 2 断面の表示結果を図 4-12 に示す。

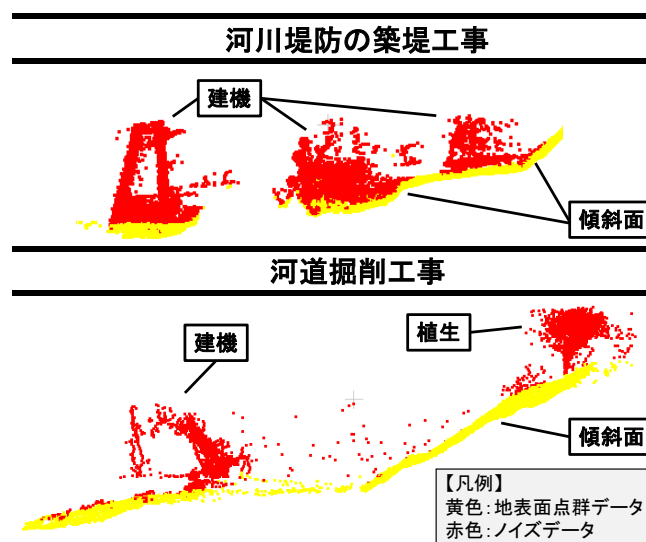


図 4-12 実験1の断面表示結果

黄色の箇所が地表面，赤色の箇所が地表面以外の点を示す．築堤工事の結果では，建機を全て除去でき，高水敷と法面を地表面として抽出できた．また，河道掘削工事においても，河床の建機や法面の植生を除去でき，湾曲がある法面やブレイクラインを地表面として抽出できた．このことから，「傾斜がある地表面を正しく抽出できない課題」を解消できた．

### 4.3.5 実験2．地表面抽出精度の評価

#### (1) 実験内容

本実験では，2台の建機が含まれる19,971点の範囲を対象に，色付き点群データの色をもとに手動で判別した5,293点の地表面以外の建機のデータを正解データとして，提案手法と既存手法との建機の抽出精度を比較する．既存手法には，高速処理に適する最下点抽出法と，多くの既存論文で使用される傾斜を用いた手法を用いる．また，傾斜を用いた手法では，TerraScan for MicroStationによる実行結果を用いる．なお，パラメータとして，各手法は格子長を設定できる．この値は，提案手法と合わせるために，1.0, 3.0, 10.0mとする．

抽出精度は，適合率 (precision) と再現率 (recall) から算出される F 値 (F-measure) で評価する．適合率は，各手法で抽出したデータの中に，手動で抽出した正解データがどの程度含まれているかを示す．また，再現率は，手動で抽出した正解データのうち，どの程度が各手法で抽出できているかを示す．各計算式は，表 4-3 を用いて式(4.1)の通りとなる．



表 4-3 処理結果と正解データの関係

	処理結果が地表面以外	処理結果が地表面
正解データが地表面以外	$tp$ (True Positive)	$fn$ (False Negative)
正解データが地表面	$fp$ (False Positive)	$tn$ (True Negative)

$$precision = \frac{tp}{tp + fp}$$

$$recall = \frac{tp}{tp + fn} \quad \text{式(4.1)}$$

$$F - measure = \frac{2 \cdot precision \cdot recall}{precision + recall}$$

## (2) 実験結果と考察

提案手法と既存手法の評価結果を表 4-4 と表 4-5, 各手法の格子長 3.0m の場合における出力結果を図 4-13 に示す。

表 4-4 提案手法の評価結果

格子 長 (m)	提案手法				
	適合 率	再現 率	F 値	ノイズ抽出点数	
				建機	地表面
1.0	0.85	0.84	0.84	4,429	790
3.0	0.91	0.83	0.87	4,372	440
10.0	0.63	0.86	0.73	4,572	2,681

表 4-5 既存手法の評価結果

格子 長 (m)	傾斜を用いた手法					最下点抽出法				
	適合 率	再現 率	F 値	ノイズ抽出点数		適合 率	再現 率	F 値	ノイズ抽出点数	
				建機	地表面				建機	地表面
1.0	0.44	0.92	0.60	4,862	6,160	0.42	0.88	0.56	4,672	6,584
3.0	0.42	0.95	0.58	5,029	6,945	0.33	0.95	0.49	5,008	10,124
10.0	0.41	0.95	0.57	5,035	7,216	0.27	0.98	0.42	5,185	13,975

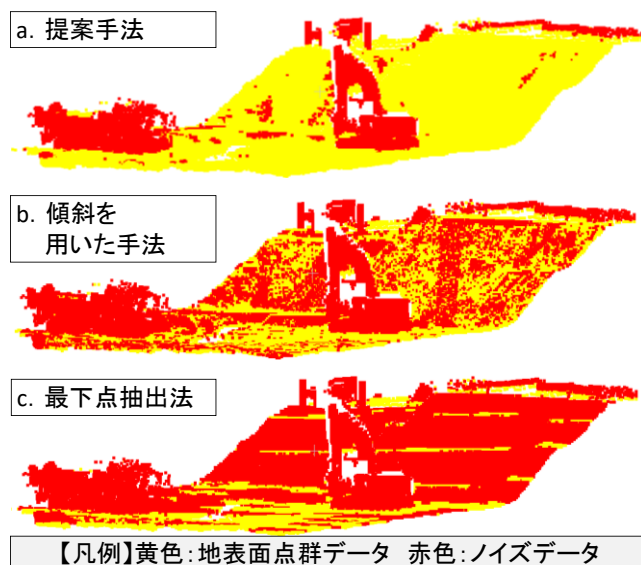


図 4-13 実験2の出力結果 (格子長 : 3.0m)

表 4-4 と表 4-5 の適合率, 再現率, F 値を確認すると, 傾斜を用いた手法は最下点抽出法を改良した手法であるため, 傾斜を用いた手法のほうが最下点抽出法よりも高い. また, 適合率を確認すると, 格子長 1.0m の場合に提案手法が 0.85, 傾斜を用いた手法が 0.44, 最下点抽出法が 0.42 となっており, 提案手法が最も良い結果となった. この傾向は他の格子長でも同様であり, 格子長 3.0m, 10.0m の場合においても提案手法が最も良い結果となった. これは, 除去された地表面の点数を確認してもわかるとおり, 傾斜を用いた手法および最下点抽出法では建機と共に傾斜面の点も誤って除去されたためである. 一方, 再現率を確認すると, 提案手法は, 傾斜を用いた手法および最下点抽出法と比較すると, 約 0.10 ポイントの差があることがわかる. これは, 傾斜を用いた手法および最下点抽出法では, 確実な地表面のデータ以外を全て除去しているためである. このことから, 提案手法は既存手法よりも高精度に地表面点群データを抽出できることがわかる. ただし, 提案手法では, 格子長 10.0m の F 値は 0.73 であり, 格子長 1.0, 3.0m の F 値は 0.84 から 0.87 とばらつきがあるため, 最適な格子長を設定する手法の検討が必要である.

以上より, 最適な格子長を設定した場合, 高い水準で建機を除去し地表面を抽出できるため, 「整地されていない地表面を正しく抽出できない課題」を解消できた.

### 4.3.6 実験 3. 地表面補完精度の評価

#### (1) 実験内容

本実験では、提案手法による地表面点群データの補完精度を比較する。入力データは、図 4-14 に示すように、連続的に計測した時間 A と時間 B の点群データを入力とする。

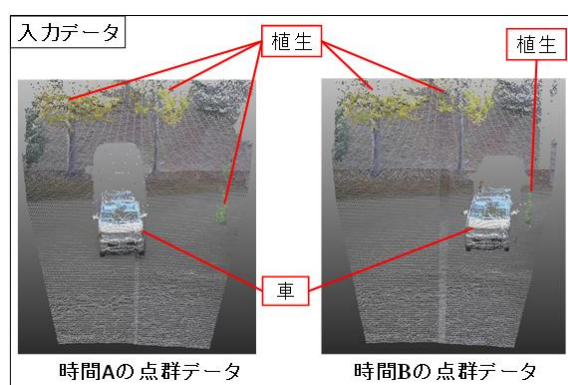


図 4-14 入力データ

それぞれの点群データでは、施工現場の建機が移動することを想定して、車を異なる地点に配置する。また、正解データは、車を配置せずに計測した点群データを用いる。これらの点群データは、施工現場にレーザスキャナを常時設置することを想定し、同一地点で計測されたデータを使用する。そのため、ターゲット指定などにより座標系を合わせる必要は無く、レジストレーションによる精度の影響は考慮しなくてよい。

補完精度の評価手順は、まず、提案手法によって欠損部を補完した地表面点群データからバッファ幅 10cm で横断面を生成する。次に、作成した横断面から 1cm 間隔で垂線を下ろし、正解データの横断面との標高差を算出する。そして、その標高差を A～C 評価で評価する。評価対象は、手動で選択した 5 断面とする。評価基準は、出来形管理 20) の規格値が標高較差  $\pm 5\text{cm}$  であるため、A 評価 0～5cm、B 評価 5～10cm、C 評価 10cm 以上に設定する。提案手法の TIN データ生成処理の格子長は 1.0, 3.0, 5.0m とする。

#### (2) 実験結果と考察

提案手法の格子長 3.0m の場合における出力結果の例を図 4-15 に、作成した横断面の例を図 4-16 に、提案手法と既存手法の評価結果を表 4-6 に示す。

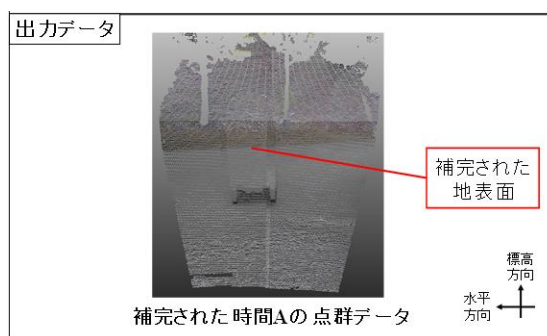


図 4-15 出力結果例 (格子長 : 3.0m)

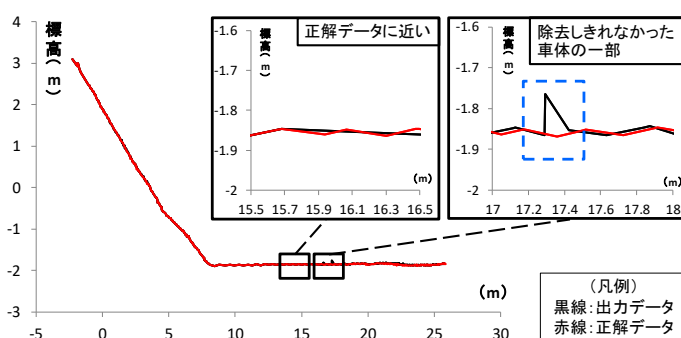


図 4-16 横断面の比較結果

表 4-6 実験3の評価結果

格子長 (m)	A 評価	B 評価	C 評価
1.0	15,219 (99.29%)	63 (0.41%)	31 (0.20%)
3.0	12,879 (99.39%)	62 (0.48%)	17 (0.13%)
5.0	12,800 (99.49%)	58 (0.45%)	7 (0.05%)

表 4-6 より、提案手法では A 評価の割合が 99.29~99.49%であり、高い精度で欠損箇所の地表面を補完できることがわかる。ただし、提案手法では、連続的に計測した点群データが同じ欠損箇所をもつ場合、その箇所を補完できない。そのため、リアルタイムに多数の時系列の点群データを用いて常に欠損箇所を補完し続ける手法を検討する必要がある。また、図 4-16 に示すように、除去できなかった車体の一部が地表面点群データとして抽出されている場合、その点が補完点として出力される。そのため、様々な施工現場の点群データを用いて最適なパラメータを検証する必要がある。

以上より、提案手法は高い水準で欠損箇所の地表面を補完できるため、「オクルージョンにより欠損した地表面の形状を抽出できない課題」を解消できた。

## 4.4 提案手法におけるパラメータの検証

実証実験より、提案手法と既存手法との精度を比較し、提案手法の有用性を確認できた。しかし、提案手法では、複数のパラメータを施工現場の状況に合わせて設定する必要がある。そのため、各パラメータの値を変更した場合の抽出結果を分析した上で、計測現場の状況に応じた値の設定方法を考察する。

### 4.4.1 実験概要

本実験では、前述の表 4-2 に示すパラメータから、地表面点群データの抽出精度に影響する 5 種類のパラメータ（格子長、傾斜面最大角度、傾斜面最小角度、傾斜面の分割数、地表面の点を抽出する閾値）の値を変更し、抽出精度の影響を検証する。

計測場所は、前述の図 4-9 の河道掘削工事とし、異なる区間の施工の進捗状況が異なる日に計測した点群データを用いる。図 4-17 に示すとおり、含まれる建機の台数や種類、施工状況が異なる 3 パターンのデータを用いる。

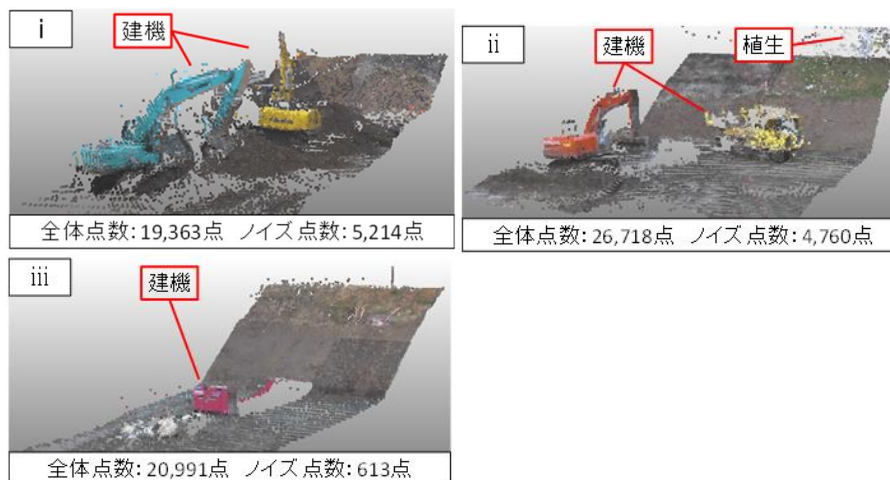


図 4-17 建機と斜面が存在する点群データ

評価方法は、前述の実証実験と同様に、手で判別した建機の点を正解データとし、i, ii, iiiのノイズデータを対象に、適合率と再現率からF値を算出する。また、検証方法は、パラメータごとに複数の値を設定し、その結果を比較する。このとき、検証対象以外のパラメータは、前述の表 4-2 の固定値を設定する。ただし、格子長は、1.0, 3.0, 10.0m の複数を設定したため、精度が最も良かった 3.0m を固定値として使用する。

## 4.4.2 実験結果と考察

### (1) 格子長の検証

格子長について、1.0～9.0m の範囲を 1.0m 間隔で比較した結果を表 4-7, 出力結果例を図 4-18 に示す。

表 4-7 格子長の検証結果

格子長 (m)	適合率	再現率	F 値	ノイズ抽出点数		格子長 (m)	適合率	再現率	F 値	ノイズ抽出点数	
				建機	地表面					建機	地表面
1.0	0.96	0.68	0.79	7,186	308	6.0	0.46	0.97	0.62	10,249	12,224
2.0	0.83	0.86	0.85	9,133	1,823	7.0	0.42	0.97	0.58	10,294	14,460
3.0	0.71	0.92	0.80	9,791	3,961	8.0	0.39	0.97	0.55	10,283	16,287
4.0	0.61	0.95	0.75	10,110	6,339	9.0	0.33	0.99	0.50	10,439	21,093
5.0	0.57	0.95	0.71	10,093	7,707						

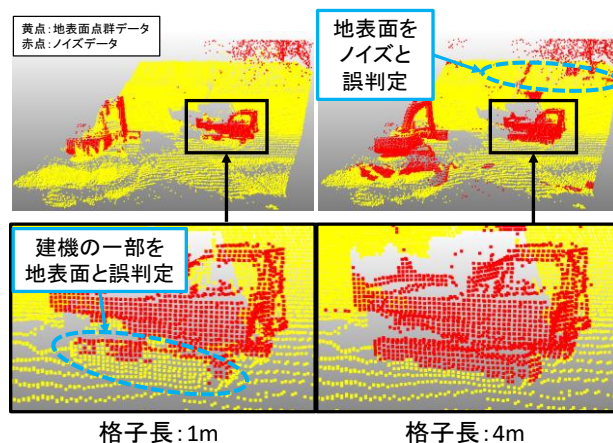


図 4-18 格子長の検証の出力結果

F 値に着目すると、2.0, 3.0m で 0.80 以上と高い値である。また、再現率では、1.0m で最も低く、適合率では、4.0m 以上で 2.0, 3.0m と比較して低下している。図 4-18 の出力結果を確認すると、1.0m に設定した場合、建機の一部を地表面点群データとして誤抽出する点数が増加した。これは、グリッド内に地表面が含まれず、正常に地表面 TIN データを生成

できなかったためである。一方、4.0m に設定した場合、地表面の一部をノイズデータとして誤抽出する点数が増加した。これは、格子長が大きいため、地表面 TIN データと実際の地表面との距離差が大きくなったためである。

以上より、格子長は、処理対象に含まれる建機の車体の大きさより大きく設定する。ただし、十分に大きい値を設定すると精度が悪化する点に留意する必要がある。

## (2) 傾斜面最大角度の検証

傾斜面最大角度について、10～90 度の範囲を 10 度間隔で比較した結果を表 4-8、出力結果例を図 4-19 に示す。

表 4-8 斜面最大角度の検証結果

傾斜面 最大角 度(°)	適 合 率	再 現 率	F 値	ノイズ抽出点数		傾斜面 最大角 度(°)	適 合 率	再 現 率	F 値	ノイズ抽出点数	
				建機	地表面					建機	地表面
10	0.20	0.97	0.33	10,313	42,533	60	0.71	0.93	0.81	9,861	3,992
20	0.21	0.94	0.34	9,981	37,407	70	0.73	0.93	0.82	9,822	3,610
30	0.26	0.94	0.41	9,942	28,522	80	0.71	0.92	0.81	9,791	3,933
40	0.65	0.93	0.76	9,830	5,381	90	0.71	0.92	0.80	9,744	3,961
50	0.71	0.93	0.81	9,876	4,043						

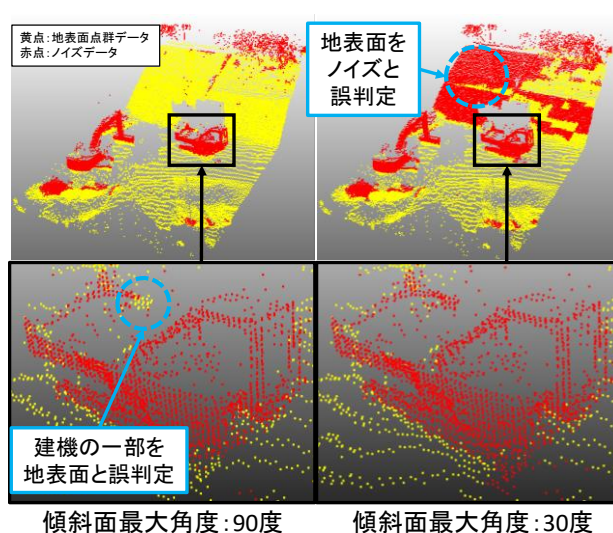


図 4-19 斜面最大角度の検証の出力結果



F 値に着目すると、70 度が 0.82 で最も高く、60、80 度が 0.81 で 2 番目に高い。また、再現率は、90 度で最も低く、適合率は、30 度以下で極端に低下している。図 4-19 の出力結果を確認すると、90 度に設定した場合、建機の一部を地表面点群データとして誤抽出する点数が増加した。これは、地表面 TIN データの一部が建機と地表面との点で構成されており、その角度が垂直に近いためである。一方、30 度を設定した場合、斜面の一部をノイズデータとして抽出する点数が増加した。これは、計測範囲に 60 度以上の傾斜を持つ斜面が含まれているためである。

以上より、傾斜面最大角度は、斜面の角度より高い値を設定する。ただし、垂直に十分に近い値を設定すると、建機の抽出精度が悪化する点に留意する必要がある。

### (3) 傾斜面最小角度の検証

傾斜面最小角度について、0~45 度の範囲を 5 度間隔で比較した結果を表 4-9、出力結果例を図 4-20 に示す。

表 4-9 傾斜面最小角度の検証結果

傾斜面 最小角 度(°)	適 合 率	再 現 率	F 値	ノイズ抽出点数		傾斜面 最小角 度(°)	適 合 率	再 現 率	F 値	ノイズ抽出点数	
				建機	地表面					建機	地表面
0	0.77	0.89	0.83	9,460	2,815	25	0.64	0.96	0.76	10,116	5,780
5	0.71	0.92	0.80	9,791	3,961	30	0.57	0.96	0.72	10,154	7,602
10	0.69	0.94	0.80	9,954	4,371	35	0.56	0.96	0.71	10,158	7,902
15	0.64	0.94	0.76	9,928	5,474	40	0.56	0.96	0.71	10,170	7,985
20	0.65	0.96	0.77	10,126	5,568						



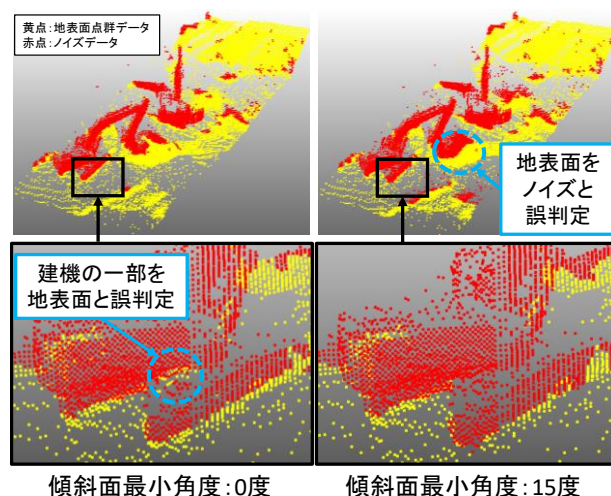


図 4-20 傾斜面最小角度の検証の出力結果

F 値に着目すると 0～10 度で 0.80 以上と高い値である。また、再現率は、0 度で最も低く、適合率は、15 度以上で 0～10 度と比較して低下している。図 4-20 の出力結果を確認すると、0 度に設定した場合、建機の一部を地表面点群データとして誤抽出する点数が増加した。これは、地表面 TIN データの一部が建機と地表面との点で構成されており、その角度が水平に近いためである。一方、15 度に設定した場合、地表面の一部をノイズデータとして誤抽出する点数が増加した。これは、整地されていない地表面のため、15 度以下の斜面が含まれていたためである。

以上より、傾斜面最小角度は、斜面の角度より低い値を設定する。ただし、水平に十分に近い値を設定すると、起伏がある地表面の抽出精度が悪化する点に留意する必要がある。

#### (4) 分割数の検証

分割数について、1～9 の範囲を 1 間隔で比較した結果を表 4-10、出力結果例を図 4-21 に示す。

表 4-10 分割数の検証結果

分割数	適合率	再現率	F 値	ノイズ抽出点数		分割数	適合率	再現率	F 値	ノイズ抽出点数	
				建機	地表面					建機	地表面
1	0.24	1.00	0.38	10,554	33,831	6	0.98	0.70	0.82	7,409	164
2	0.45	0.98	0.62	10,358	12,612	7	0.98	0.63	0.77	6,669	104
3	0.71	0.92	0.80	9,791	3,961	8	0.98	0.52	0.68	5,525	91
4	0.86	0.85	0.86	9,028	1,501	9	0.99	0.41	0.58	4,289	41
5	0.93	0.76	0.84	8,054	568						

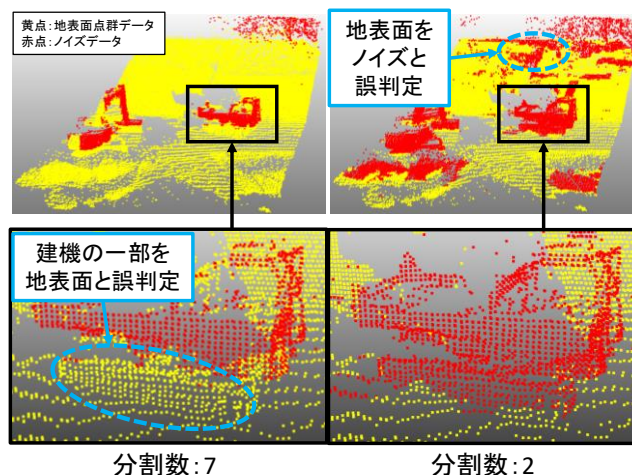


図 4-21 分割数の検証の出力結果

F 値に着目すると、3～6で0.80以上と高い値である。また、再現率は、7以上で3～6と比較して低下しており、適合率は、2以下で極端に低下している。図4-21の出力結果を確認すると、7に設定した場合、建機の一部を地表面点群データとして誤抽出する点数が増加した。これは、分割後のグリッド内に地表面が含まれず、正常に地表面 TIN データを生成できなかったためである。一方、2に設定した場合、地表面の一部をノイズデータとして誤抽出する点数が増加した。これは、分割数が少ないため、地表面 TIN データと実際の地表面との距離差が大きくなったためである。

以上より、分割数は高く設定することが良い。ただし、格子長を十分に高く設定すると、建機の抽出精度が悪化する点に留意する必要がある。

## (5) 地表面の点の抽出長の検証

地表面の点の抽出長について、0.1～0.9m の範囲を 0.1m 間隔で比較した結果を表 4-11、出力結果例を図 4-22 に示す。

表 4-11 表面の点の抽出長の検証結果

抽出長 (m)	適合率	再現率	F 値	ノイズ抽出点数		抽出長 (m)	適合率	再現率	F 値	ノイズ抽出点数	
				建機	地表面					建機	地表面
0.1	0.30	0.99	0.46	10,443	24,358	0.6	0.93	0.79	0.86	8,370	616
0.2	0.55	0.97	0.70	10,231	8,368	0.7	0.97	0.75	0.84	7,911	262
0.3	0.71	0.92	0.80	9,791	3,961	0.8	0.99	0.70	0.82	7,431	60
0.4	0.82	0.88	0.85	9,318	2,027	0.9	1.00	0.66	0.79	6,949	8
0.5	0.90	0.83	0.86	8,839	1,023						

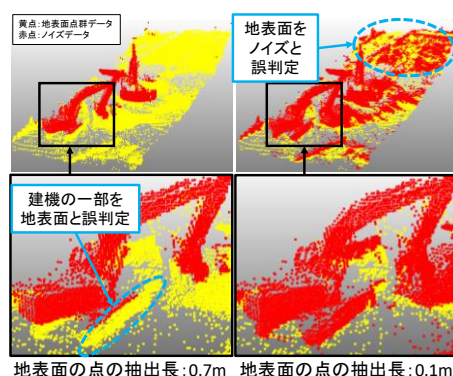


図 4-22 表面の点の抽出長の検証の出力結果

F 値に着目すると、0.3～0.8m で 0.80 以上と高い値である。また、再現率は、0.9 で最も低く、適合率は、0.2 以下で極端に低下している。図 4-22 の出力結果を確認すると、0.9m に設定した場合、建機の一部を地表面点群データとして誤抽出する点数が増加した。これは、建機の車体下部が地表面点群データとして誤抽出されたためである。一方、0.1m に設定した場合、地表面の一部をノイズデータとして誤抽出する点数が増加した。これは、地表面の凹凸部の一部が抽出長の範囲に含まれず、ノイズデータとして誤抽出されたためである。

以上のことから、地表面の点の抽出長は、地表面の凸部と凹部との標高差分より大きく設定する。ただし、十分に大きい値を設定すると、建機の車体下部の抽出精度が悪化する点に留意する必要がある。

## (6) 検証結果のまとめ

提案手法におけるパラメータの検証結果を表 4-12 に整理する。

表 4-12 提案手法におけるパラメータの検証結果

パラメータ	検証結果
格子長	格子長は、処理対象に含まれる建機の車体の大きさより大きく設定する。ただし、十分に大きい値を設定すると精度が悪化する点に留意する必要がある。
傾斜面最大角度	傾斜面最大角度は、斜面の角度より高い値を設定する。ただし、垂直に十分に近い値を設定すると、建機の抽出精度が悪化する点に留意する必要がある。
傾斜面最小角度	傾斜面最小角度は、斜面の角度より低い値を設定する。ただし、水平に十分に近い値を設定すると、起伏がある地表面の抽出精度が悪化する点に留意する必要がある。
傾斜面の分割数	分割数は高く設定することが良い。ただし、格子長を十分に高く設定すると、建機の抽出精度が悪化する点に留意する必要がある。
地表面の点の抽出長	地表面の点の抽出長は、地表面の凸部と凹部との標高差分より大きく設定する。ただし、十分に大きい値を設定すると、建機の車体下部の抽出精度が悪化する点に留意する必要がある。

## 4.5 まとめ

本研究では、平坦部と傾斜部でグリッドサイズを変化させることに着目し、傾斜のある地表面の点群データを抽出する手法を考案した。また、常設された地上レーザスキャナが1日に複数回計測できる特徴に着目し、連続的に計測された2時期の点群データを用いて、移動体のオクルージョンを考慮して地表面の点群データを補完する手法を提案した。実証実験では、3種類の実験を実施した。実験1と実験2では、地表面点群データ抽出機能の検証を行い、既存手法より精度が向上することから提案手法の有用性を確認した。また、実

験 3 では、地表面点群データ補完機能の検証を行い、高水準で欠損箇所の地表面を補完できることを確認した。これらの結果を基に、パラメータの設定値の違いによる影響を検証し、施工現場の状況に応じた値の設定方法を明らかにした。しかし、提案手法は、各処理で利用するパラメータを計測状況に合わせて設定する必要がある。そのため、様々な施工現場で取得された点群データを用いて、最適なパラメータ値を動的に決定する手法を検討する必要がある。また、本研究の応用として、リアルタイムで地表面と地表面以外のデータを抽出し、人と建機を自動で判別することにより、土工の現場の安全性を向上できると考えられる。これらの手法を検討することにより、他の分野に適用可能な技術へと発展させることを目指す。



# 第5章 地上レーザスキャナを用いた出来形計測の効率化手法の提案

## 5.1 研究の概要

本研究では、検査段階の地上レーザスキャナの出来形計測において、点群データの特徴に加えて、計測位置の情報を用いることで、地上レーザスキャナの多地点計測において高精度な点群データを抽出し、出来形計測を効率化する手法を提案する。本研究の位置付けを図 5-1 に示す。

施工	<p>①施工段階における 3次元データ作成作業の省力化手法の提案</p> <p>【課題】3次元データを個々に作成しており、作業の重複や負荷が増加すること。</p> <p>【目的】異なるフォーマットのデータを交換する流れを構築すること。</p> <p>【新規性】データ作成作業の二重化防止と、施工者の作業を省力化できること。</p>	<p>②地上レーザスキャナを用いた 施工状況把握の効率化手法の提案</p> <p>【課題】施工現場で計測時、建機や植生を除去して地表面の点を抽出する必要があること。</p> <p>【目的】傾斜のある地表の点群データを抽出し、移動体で欠損した地表面を補完すること。</p> <p>【新規性】常設のレーザスキャナから対象地物を正確に計測し出来高算出が容易になること。</p>
	<p>③地上レーザスキャナを用いた 出来形計測の効率化手法の提案</p> <p>【課題】多地点計測時、同一地点に対して測定精度の異なる点が混在すること。</p> <p>【目的】計測位置の情報を用いることで、高精度な点群データを抽出すること。</p> <p>【新規性】レーザスキャナの特徴から最確値を選択し、納品検査の品質を保証できること。</p>	<p>④UAV写真測量を用いた 出来形計測の効率化手法の提案</p> <p>【課題】UAV写真測量の解析パラメータに関して最適な値を検討する必要があること。</p> <p>【目的】解析パラメータの違いによる精度や人的・時間的コストを明らかにすること。</p> <p>【新規性】実務の経験を問わず、納品検査のための3次元データを生成できること。</p>
維持管理	<p>⑤UAV写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法の提案</p> <p>【課題】災害時、UAV写真測量で生成した点群データを地理座標系に変換できないこと。</p> <p>【目的】既存資産を用いて、災害時におけるUAV写真測量の解析手法を提案すること。</p> <p>【新規性】現地に立ち入ることなく点群データを生成し、災害規模を迅速に把握できること。</p>	

図 5-1 本章の位置付け

## 5.2 施工現場で計測した点群データの課題分析

本節では、地上レーザスキャナを用いて道路土工の施工現場で計測した結果、得られた点群データの計測特性と課題を明らかにする。また、多地点から計測した点群データのレジストレーションを行い、その結果が精度におよぼす影響を分析する。

### 5.2.1 計測実験の概要

#### (1) 計測機器

本計測では、地上設置型レーザスキャナとして、FARO 社、RIEGL 社、PENTAX 社の 3 機種を用いる。各機器の詳細と写真を表 5-1 および図 5-2 に示す。

表 5-1 計測機器の詳細

名称	FARO	RIEGL	PENTAX
製品名	Focus3D X 330	LMS-Z420i	S-3180V
製造会社	FARO 社	RIEGL 社	TI アサヒ社
レーザクラス	Class 1M	Class 1M	Class 1M
測距距離	0.6～330m	2～350m	0.3～187.3m
最大測距点数	976,000pt/sec	11,000pt/sec	1,016,000pt/sec
最大測定誤差	±2mm	±8mm	2.7mm@50m



FARO



RIEGL



PENTAX

図 5-2 計測機器の写真



各機器の計測設定は、計測時間を基準とし、1 計測の所要時間を 15 から 20 分に設定する。これは、各機器によって設定項目が異なるためである。この基準に照らし合わせたところ、FARO では、「分解能」を 1/1 (4 段階中最大)、同一地点の点の個数を示す「品質」を 1 倍 (4 段階中最低) に設定した。また、RIEGL では、点の「計測間隔」を 0.05 度に設定した。そして、PENTAX では、「品質」を通常 (4 段階で上から 3 番目)、解像度を 20,000 画素/360 度 (7 段階で上から 2 番目) に設定した。

## (2) 計測場所および計測位置

計測場所は、図 5-3 に示すように、日本建設機械施工協会施工技術総合研究所の道路土工の模擬現場とする。

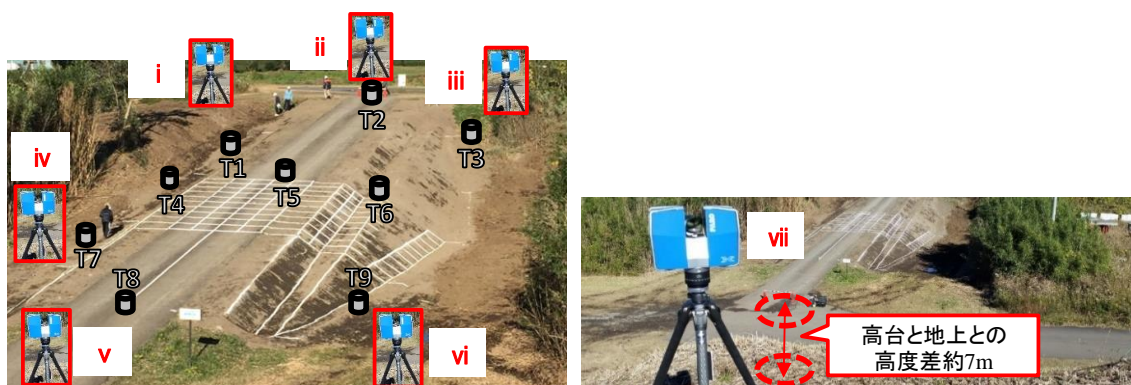


図 5-3 計測場所と計測位置

工事目的物の道路は、延長 50m で延長方向に高度差約 5m の勾配があり、片側法面に小段を挟んだ凸型形状で構成される。この場所で使用された 3 次元設計データを図 5-4 に示す。

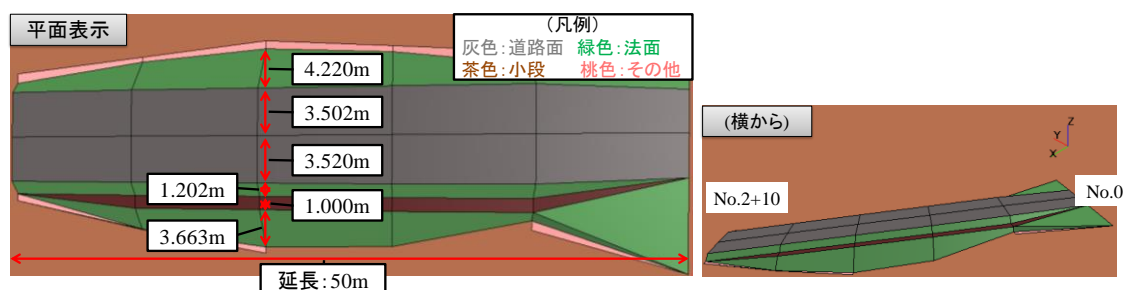


図 5-4 3 次元設計データ

計測位置は、始点側と終点側の天端上（図 5-3 ii, v）、左右法面下付近（図 5-3 i, iii, iv, vi）と遠方にある高台（図 5-3vii）の計7箇所とする。

### (3) ターゲットの設置

複数の点群データ重畳時に必要となるターゲットは、直径 10cm の円柱状で作成し、計9箇所（図 5-3T1～T9）に設置する。これらの設置位置は、あらかじめ公共測量作業規程の準則に準拠した GNSS 測量機で測量しており、緯度経度および標高値が明らかになっている。使用した GNSS 測量機は、図 5-5 に示すように、ニコン・トリムブル社の Trimble NetR9 である。



右図の出典：[http://www.nikon-trimble.co.jp/products/gps/trimble\\_net9.html](http://www.nikon-trimble.co.jp/products/gps/trimble_net9.html)

図 5-5 GNSS 測量機 (Trimble NetR9)

この機器は、水平精度が  $(0.25 + 1 \text{ ppm}) \text{ m}$ 、垂直精度が  $(0.50 + 1 \text{ ppm}) \text{ m}$  となっている。

なお、計測機器ごとの計測特性を考慮し適切に計測するため、RIEGL 用のターゲットには反射シート、FARO および PENTAX 用のターゲットには白黒の紙を巻いて作成し、これらをセットで重ねて設置（図 5-6）することとした。

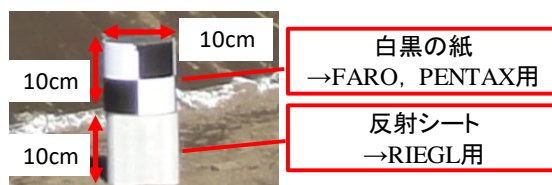


図 5-6 円柱状のターゲット

## 5.2.2 一地点からの計測結果と課題

計測結果の例として、終点側の天端上（図 5-3 v）から計測した点群データを上面から可視化した結果を図 5-7 に示す。点群データの色は、レーザ光の反射強度をカラースケールで示している。

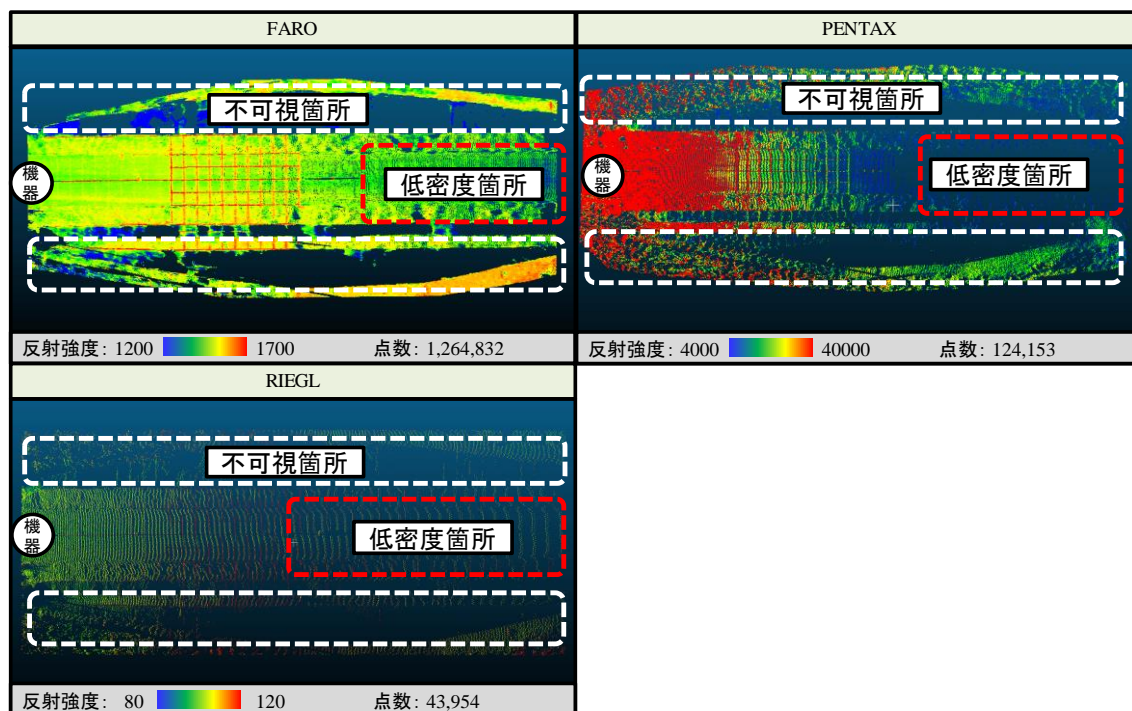


図 5-7 計測位置 v からの計測結果

まず、図 5-7 の白枠に着目すると、計測位置から不可視となる法面上の点が欠落する課題がある。そのため、計測位置を変えて不可視領域を計測する必要がある。次に、図 5-7 の赤枠に着目すると、計測位置から距離が離れており、計測機器と計測対象物との入射角が低いため、点密度が低下している。レーザスキャナを用いた出来形管理要領では、 $0.01 \text{ m}^2$ あたり 1 点以上の点密度での計測が要求されるため、この箇所では他の計測位置からの点群データを重畳する必要がある。

以上のことから、施工現場において一度の計測で全ての範囲を網羅することは困難であることがわかった。そのため、多地点から計測を行い、ターゲットを用いてそれらの計測結果の点群データを重畳する必要がある。

### 5.2.3 多地点計測時の点群データ重畳における課題分析

#### (1) 目的

計測対象物の形状を網羅的に把握するためには、多地点からの計測が不可欠である。そこで、どの計測位置を選択して重畳すると最適な結果を得られるかを調査し、重畳における課題を分析する。

#### (2) 重畳パターン

点群データの重畳パターンは、表 5-2 に示すように、法面下からの計測データのみを使用する場合（パターン A）、天端上からの計測データのみを使用する場合（パターン B）、法面下と天端上の両方の計測データを使用する場合（パターン C）、および法面下と天端上に加え高台からの計測データを使用する場合（パターン D）との計 4 パターンを検討した。

表 5-2 点群データの重畳パターン

No.	重畳パターン	計測位置
パターン A	法面下	i / iii / iv / vi
パターン B	天端上	ii / v
パターン C	法面下+天端上	i / ii / iii / iv / v / vi
パターン D	法面下+天端上+高台	i / ii / iii / iv / v / vi / vii

#### (3) 重畳結果

まず、各パターンの重畳結果を図 5-8 に示す。

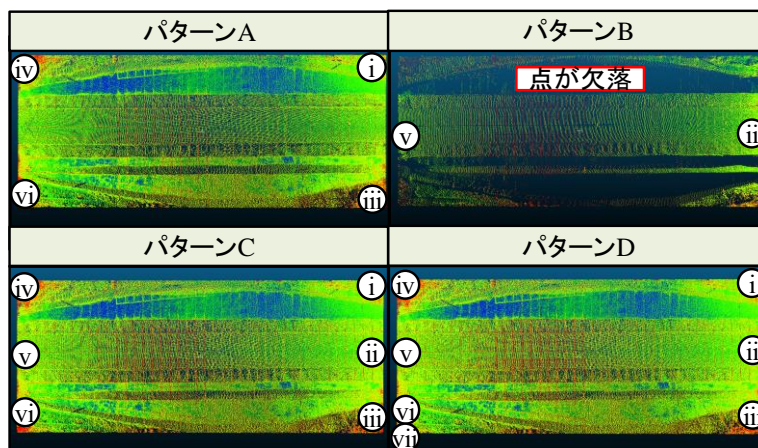


図 5-8 RIEGL の各パターンの重畳結果

図 5-8 は、PENTAX と FARO においても同様の傾向であったため、RIEGL を用いた場合の結果を示す。この結果から、パターン B では、法面を計測できないため、計測範囲の一部が欠落している。一方、パターン A、C、D の計測では、計測範囲を網羅できている。ただし、パターン A は、延長方向に勾配があったため計測範囲を網羅できたが、通常の計測では天端の点が欠損する。そのため、パターン C またはパターン D が計測範囲を網羅できる。

次に、パターン C と D を比較するため、各計測機器で点群データから横断面図を生成した結果を図 5-9、図 5-10、図 5-11 に示す。

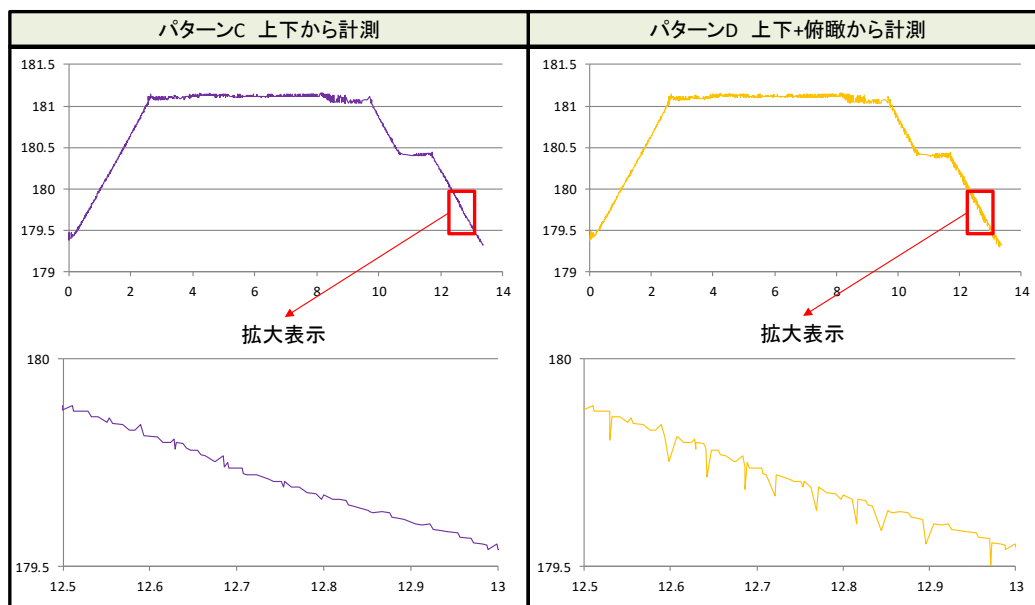


図 5-9 RIEGL のパターン C とパターン D の横断面図比較結果（目盛単位：m）

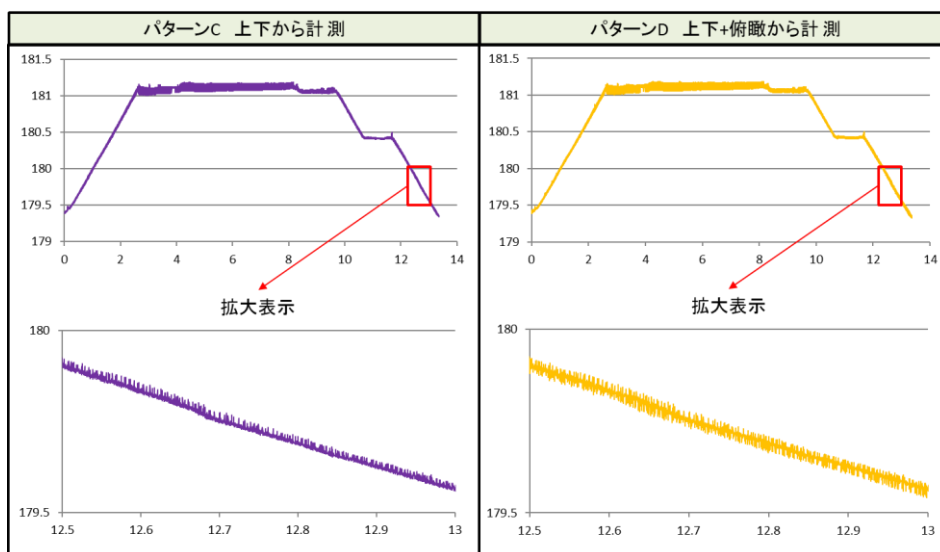


図 5-10 FARO のパターン C とパターン D の横断図比較結果 (目盛単位 : m)

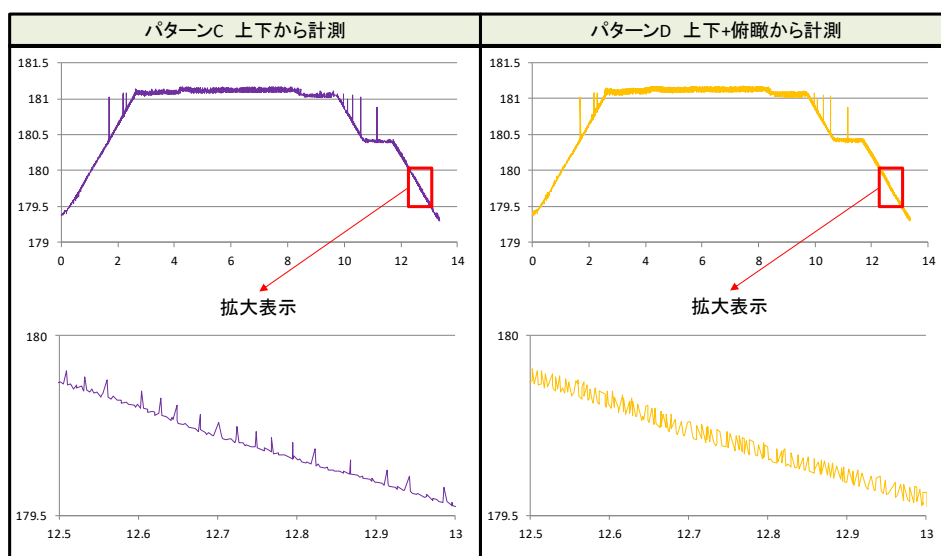


図 5-11 PENTAX のパターン C とパターン D の横断図比較結果 (目盛単位 : m)

この結果から、パターン D では、高台からの計測データを重畳した影響で、点が乱れる結果となった。これは、他と比べて高台は遠方に位置するため、単純に点群データを重畳すると、精度が悪化する原因となる。

以上より、実際の計測では、できるだけ近く、法面下と天端上の複数位置から得られた点群データを重畳することで、計測対象物の全方位からの点を取得できることがわかった。その一方で、点群データをそのまま重畳すると膨大な点群数になり、精度が悪化する原因

となる。そのため、重畳時に不要点を除去し、高精度な点を選択するアルゴリズムの考案が必要なことが示唆された。

### 5.3 提案手法の概要

前節より、多地点から計測した点群データをそのまま重畳すると膨大な点群数になり、不要点を除去する必要があることがわかった。そこで、本研究では、多地点の点群データから高精度な点を選択し、3次元モデルを生成する手法を提案する。提案手法は、図 5-12 に示すように、重畳フィルタリング機能、白線フィルタリング機能とサーフェス作成機能から構成される。

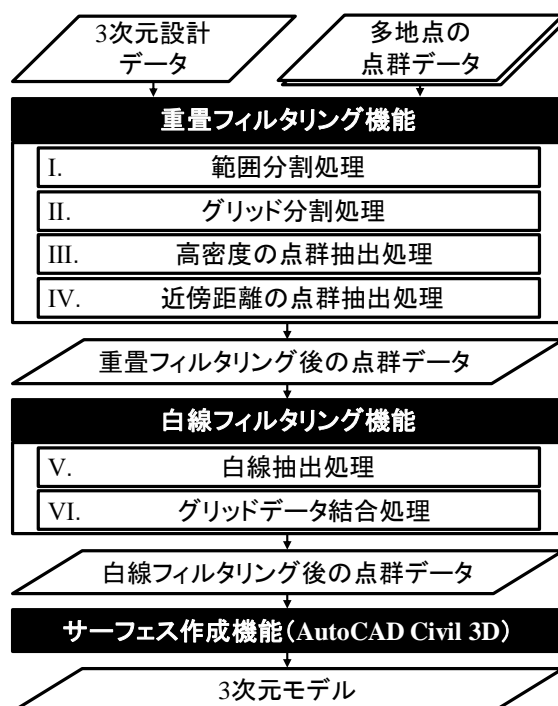


図 5-12 提案手法の流れ

まず、重畳フィルタリング機能では、複数位置の点群データの重畳時に精度が悪いと考えられる点の除去を目的として、距離と密度を考慮したフィルタリング手法を提案する。次に、白線フィルタリング機能では、3次元モデル生成時に面と面の境界線（以下、ブレイクライン）を高精度に再現することを目的として、ブレイクラインに白線を引き、白線上の点を抽出する手法を提案する。最後に、サーフェス作成機能では、市販の AutoCAD Civil



3D を用いて、フィルタリング後の点群データから TIN で構成される 3 次元モデルを生成する。提案手法の重畳フィルタリング機能と白線フィルタリング機能の詳細を次に述べる。

### 5.3.1 重畳フィルタリング機能

#### (1) 手法の検討方針

複数位置から得られた点群データをそのまま重ね合わせた場合、同一地点に対して精度の異なる点が混在する。既存研究[42]における計測距離と角度の違いによる計測精度の検証結果を図 5-13 に示す。

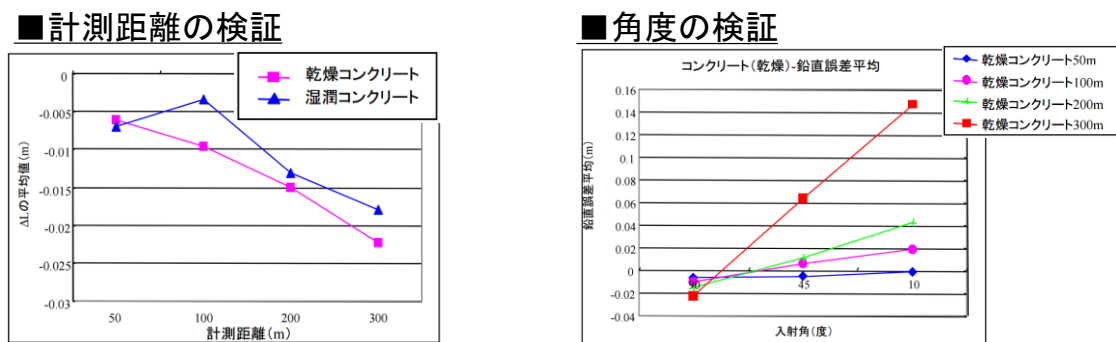


図 5-13 既存研究[42]における計測距離と角度の違いによる計測精度の検証結果

ここで、計測距離はレーザスキャナの設置位置から被計測対象までの距離、レーザ入射角はレーザスキャナから発射されたレーザと被計測対象の入射角を示す。この結果から、計測距離が近いほど、また、レーザ入射角が 90 度に近いほど高精度であることがわかる。

この結果を参考に、計測距離およびレーザ入射角と計測密度の関係性を調査するために、計測実験を行った。計測対象物は、図 5-14 に示すように、グラウンド上に設置した傾斜板とし、距離とレーザ入射角を変えて計測した。

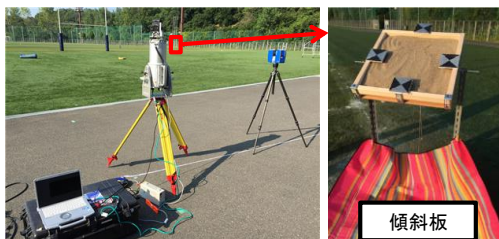
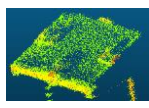
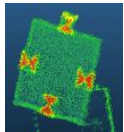
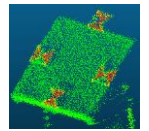
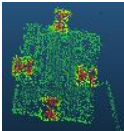
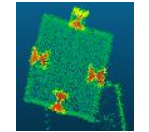
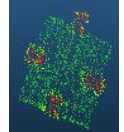


図 5-14 計測風景



RIEGL を用いて計測した結果を表 5-3 に示す。表 5-3 のレーザ入射角と密度の調査では、計測距離を 50m に固定し、入射角を 10, 30, 60° の 3 種類で密度を比較する。また、表 5-3 の計測距離と密度の調査では、レーザ入射角を 60° に固定し、計測距離を 50, 100, 150m の 3 種類で密度を比較する。

表 5-3 計測距離・レーザ入射角と密度の調査結果

レーザ入射角と密度の調査			計測距離と密度の調査		
レーザ入射角	点数/100 cm <sup>2</sup>	図	計測距離	点数/100 cm <sup>2</sup>	図
10°	139 点		50m	507 点	
30°	238 点		100m	173 点	
60°	507 点		150m	64 点	

まず、レーザ入射角と密度の調査に着目すると、レーザ入射角が高い 60° で最も点群密度が高い。次に、計測距離と密度の調査に着目すると、計測距離が近い 50m で最も点群密度が高い。これらの結果より、レーザ入射角が高くなり、計測距離が近くなるほど密度が高くなることがわかった。以上のことから、レーザ入射角が高く、計測距離が近いほど高精度かつ高密度な点が得られる傾向がある。そこで、提案手法ではその特徴を考慮し、点群データが高密度な範囲の点を抽出する。また、密度が低い範囲では、計測機器との距離が近い点を抽出する。

## (2) 処理フロー

本機能は、範囲分割処理、グリッド分割処理、高密度の点群抽出処理と近傍距離の点群抽出処理から構成される。入力データは、同じ座標系に変換済みの多地点の点群データと発注図から作成された 3 次元設計データとする。

まず、範囲分割処理の処理イメージを図 5-15 に示す。

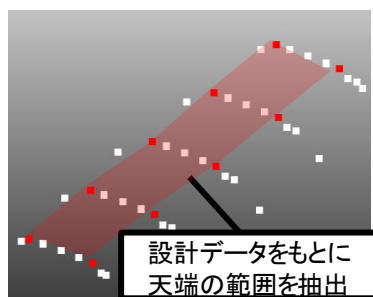


図 5-15 範囲分割処理

この処理では、3次元設計データを用いて天端、法面や小段などの部位ごとの外形となる点を取得し、各部位に点群データを分割する。次に、グリッド分割処理の処理イメージを図 5-16 に示す。

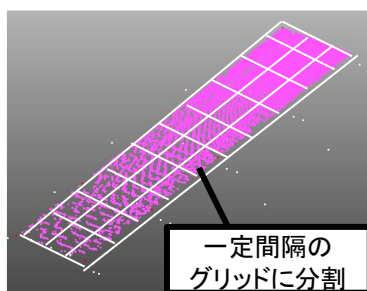


図 5-16 グリッド分割処理

この処理では、各部位の点群データを一定間隔のグリッドに分割する。そして、高密度の点群抽出処理の処理イメージを図 5-17 に示す。

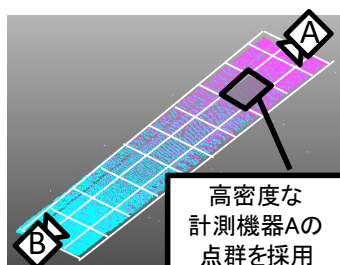


図 5-17 高密度の点群抽出処理

この処理では、グリッドごとの点群データの密度を算出し、密度の最も高いグリッドを選定する。そして、その密度が閾値  $\alpha$  を超える場合は、その計測位置の点群データを抽出する。また、閾値  $\alpha$  未満の場合は、近傍距離の点群抽出処理を実施する。近傍距離の点群抽出処理の処理イメージを図 5-18 に示す。

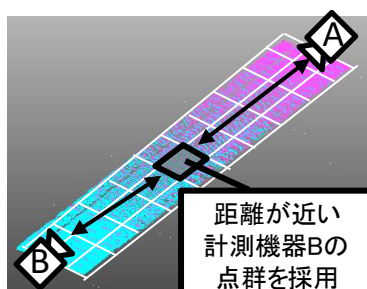


図 5-18 近傍距離の点群抽出処理

この処理では、最近傍の計測機器の点群データを抽出する。このとき、閾値  $\alpha$  は、レーザスキャナの出来形管理要領において、出来形計測データの点群密度が  $0.01 \text{ m}^2$  あたり 1 点以上と定義されているため、同様の値を設定する。また、この閾値  $\alpha$  の設定理由は、点群密度が低い場所では計測距離が近いほど精度が高くなると考えたためである。以上の処理により、高精度な点群データを選択する。

### 5.3.2 白線フィルタリング機能

#### (1) 手法の検討方針

本機能では、計測対象物の反射強度をもとに選択的に点群データを抽出する。地上設置型レーザスキャナから得られる反射強度は、計測対象物の輝度が高いほど高くなる傾向がある。点群データを反射強度でグレースケール化した画像を図 5-19 に示す。

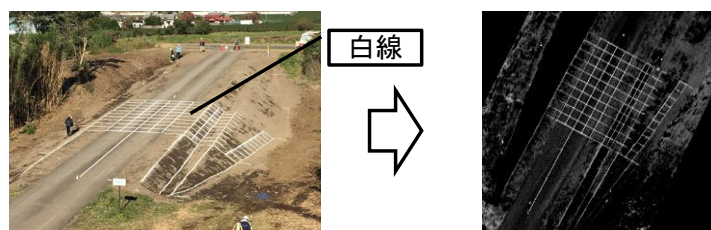


図 5-19 地上レーザスキャナの点群データを用いた反射強度によるグレースケール化

この結果から、地表面の白線を引いた箇所において反射強度が高くなることがわかる。そこで、提案手法では、ブレイクラインに沿って白線を引き、その反射強度を特徴として白線上の点を抽出する。

## (2) 処理フロー

本機能は、白線抽出処理とグリッドデータ結合処理から構成される。まず、白線抽出処理の処理イメージを図 5-20 に示す。

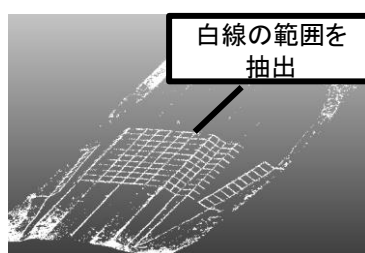


図 5-20 白線抽出処理

この処理では、白線の反射強度の範囲として閾値  $\beta$  を設定し、その設定範囲の点群データを抽出する。この閾値  $\beta$  は、計測機器によって白線の反射強度が異なるため、計測機器ごとに適した値を設定する必要がある。その反射強度の範囲は、点群ビューアソフト Cloud Compare を用いて確認できる。次に、グリッドデータ結合処理の処理イメージを図 5-21 に示す。

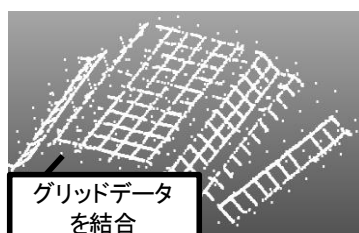


図 5-21 グリッドデータ結合処理

この処理では、白線が引かれていない箇所の点を生成するため、一定のグリッド間隔で内挿補間によりグリッドデータを生成し、白線の点群データと結合する。以上の処理により、白線フィルタリング後の点群データを出力する。

## 5.4 実証実験

### 5.4.1 実験計画

実証実験では，図 5-22 に示すように，3 種類の実験を実施する．

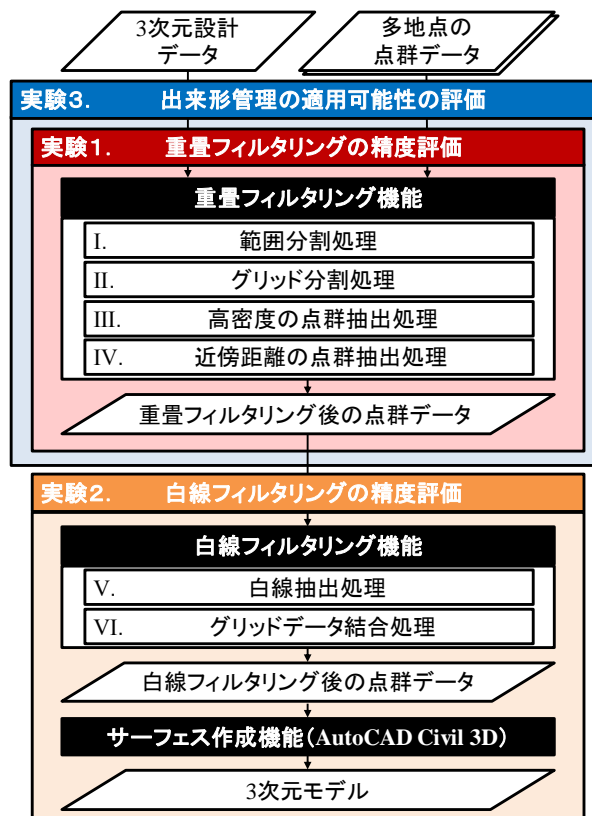


図 5-22 実験計画

実験 1 と実験 2 では，重畳フィルタリング機能と白線フィルタリング機能の精度評価をそれぞれ行う．また，実験 3 では，重畳フィルタリング機能により，レーザスキャナの出来形管理要領に準拠した出来形管理の適用可能性を評価する．

## 5.4.2 実験データ

実験場所は、図 5-3 と同様の道路土工の模擬現場である。中間の 10m 区間では、白線フィルタリング機能の評価のために、ブレイクライン上とその間を約 1m 間隔の格子状に白線を引いた。また、計測機器は、図 5-2 の RIEGL, FARO, PENTAX の 3 機種を用いる。

精度評価の正解データは、管理断面および約 1m 間隔の白線同士の交点に対して、TS 計測を実施した測量点の 633 点とする。TS で計測した点を図 5-23 に示す。

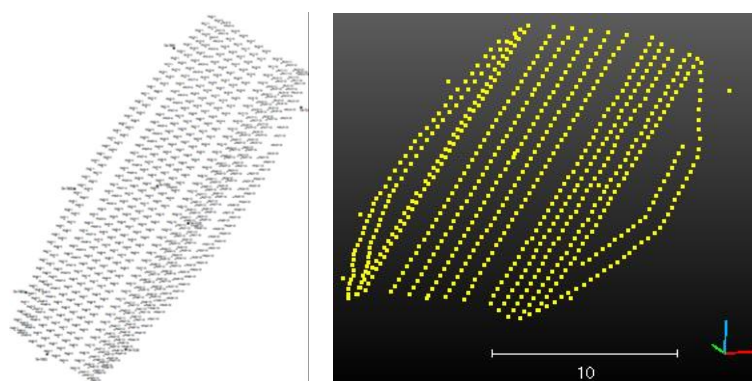


図 5-23 TS 計測点 (左 : 2 次元表示, 右 : 3 次元表示)

## 5.4.3 実験 1. 重畳フィルタリングの精度評価

### (1) 実験内容

本実験では、表-2 の計測パターン C の点群データを用いて、複数位置からの計測データをそのまま重ね合わせた場合の点群データと重畳フィルタリング後の点群データとを比較する。実験手順は、まず、点群データからバッファ幅 10cm で横断面を生成する。次に、図 5-24 に示すように、作成した横断面から 1cm 間隔で垂線を下ろし、正解データの横断面との標高差を算出する。

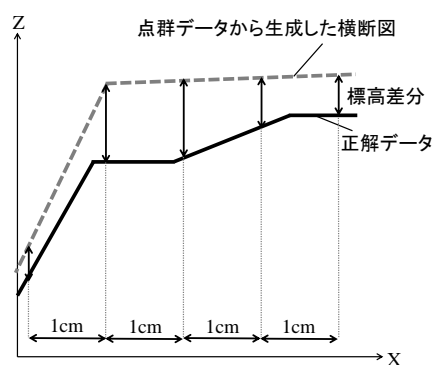


図 5-24 標高差の算出方法

そして、その標高差を A～C 判定で評価する。出来形管理の規格値が標高較差 $\pm 5\text{cm}^2$ であるため、A 評価 0cm～5cm 未満、B 評価 5cm～10cm 未満、C 評価 10cm 以上に設定する。本実験の評価対象は、10m 間隔の 5 断面とする。

## (2) 実験結果と考察

重畳フィルタリング前後の点群データについて、精度と点数の比較結果を表 5-4、断面比較の一例として FARO の結果を図 5-25 にそれぞれ示す。

表 5-4 精度と点数の比較結果

対象	機器	評価結果				
		A 評価	B 評価	C 評価	点数	削減率
フィルタ前	FARO	4,889 (82.3%)	1,029 (17.3%)	19 (0.3%)	28,047,402	—
	RIEGL	4,949 (83.3%)	937 (15.8%)	53 (0.9%)	943,625	—
	PENTAX	5379 (90.6%)	543 (9.1%)	16 (0.3%)	1,826,264	—
フィルタ後	FARO	4,973 (83.8%)	938 (15.8%)	26 (0.4%)	21,142,697	24.6%
	RIEGL	4922 (82.9%)	925 (15.6%)	92 (1.5%)	698,813	25.9%
	PENTAX	5490 (92.5%)	440 (7.4%)	8 (0.1%)	1,399,193	23.9%

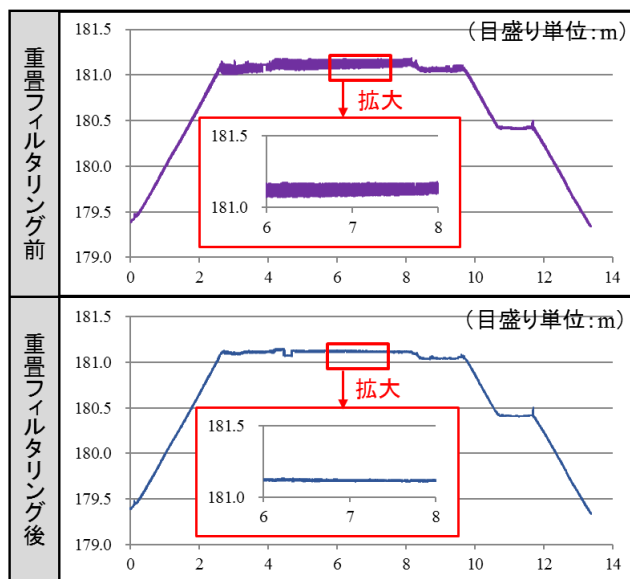


図 5-25 FARO の断面比較結果

まず、表 5-4 の A 評価に着目すると、FARO、PENTAX では 1.5～2.0%程度結果が向上している。ただし、RIEGL では、0.4%減少しており、精度が低下している。この原因を調査するために、各断面の結果を確認した。その結果、図 5-25 に示すように、フィルタリングすることで点のばらつきは減少しているが、全体的に正解データから離れていることがわかる。これは、RIEGL の最大測定誤差は±8mm であり、他の機種と比較して計測精度が悪い。また、1 秒あたりの測距点数が非常に少なく、点群密度が低い。そのため、点群データ重畳時のターゲット指定において、正確な位置を指定できず、全体的に誤差が発生したと考えられる。そのため、計測設定を変更して点群密度を高くすることや、ターゲット個数を増やすことで結果が向上すると考えられる。次に、フィルタ後における 3 機種の A 評価の割合を比較すると、FARO は 83.8%、RIEGL は 82.9%、PENTAX は 92.5%であり、PENTAX が最も高い。この精度差は、機種性能や点群重畳時の精度が影響していると考えられる。そして、点数に着目すると、全機種において約 25%削減できていることがわかる。さらに、図 5-25 より、フィルタ後では、特に天端上において点のばらつきが軽減した。他の断面や機種においても同様の傾向が見られたため、全体的に結果が向上していると考えられる。以上のことから、点群データの精度と容量削減との両面で結果が向上しており、提案手法の有効性を示した。



## 5.4.4 実験 2. 白線フィルタリング機能の精度評価

### (1) 実験内容

本実験では、再近隣法でグリッド化した既存手法の 3 次元モデル（以下、グリッドフィルタ）と提案手法の 3 次元モデル（以下、白線フィルタ）を比較する。実験手順は、まず、TIN で構成される 3 次元モデルに横断線を引き、その線と TIN との交点から断面を作成する。次に、実験 1 と同様に、1cm 間隔で垂線を下ろし、標高差から A～C 判定で評価する。また、グリッドフィルタと白線フィルタのグリッド間隔は 0.5m とする。これは、レーザスキャナの出来形管理要領の数量算出において、グリッド間隔が 0.5m 以内と規定されているためである。

本実験の評価対象は、管理断面の 2 断面とその間を 1m 間隔で分割した任意断面の 9 断面とする。また、レーザスキャナは、点群データの密度が最も高く計測された FARO を用いる。事前実験において、FARO から取得できる白線の反射強度の値は、1600～1605 程度であることがわかったため、白線の点群データを抽出する閾値  $\beta$  は、その値に設定した。

### (2) 実験結果と考察

グリッドフィルタと白線フィルタの 3 次元モデルおよび断面比較結果を図 5-26 に示す。また、各 3 次元モデルの精度評価結果と 1 m<sup>2</sup>あたりの点数を表 5-5 にそれぞれ示す。

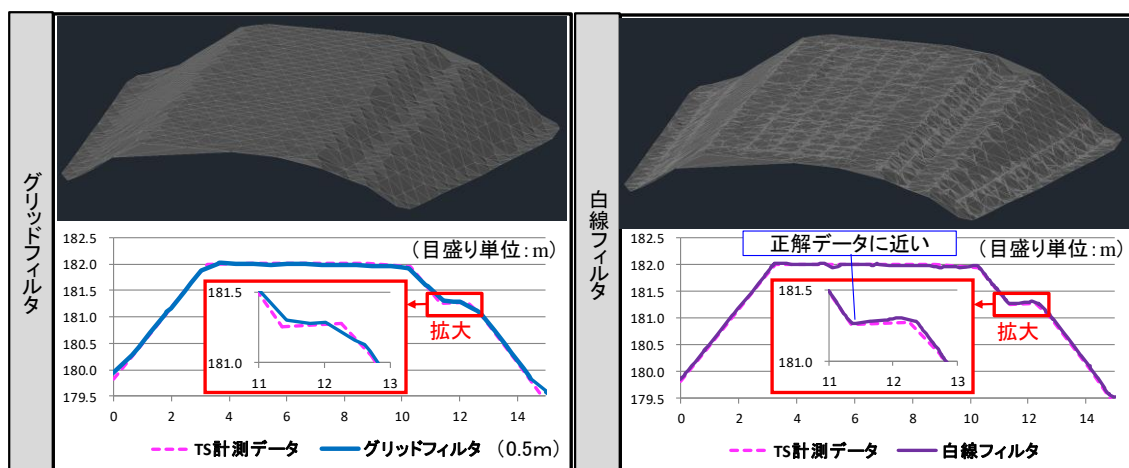


図 5-26 3 次元モデルと断面比較結果

表 5-5 精度評価結果

対象		評価結果			
		A 評価	B 評価	C 評価	点数/m <sup>2</sup>
グリッド フィルタ	0.5m	12,609 (83.1%)	1,944 (12.8%)	425 (2.8%)	5
白線 フィルタ	0.5m	13,619 (89.8%)	1,222 (8.1%)	325 (2.1%)	73

まず、図 5-26 より、ブレイクラインを中心にグリッドフィルタよりも白線フィルタのほうが正解データに近接していることがわかる。次に、表 5-5 の A 評価に着目すると、グリッドフィルタは 83.1%であるのに対して、白線フィルタは 89.8%であるため、5.0%以上精度が向上した。ただし、点数に着目すると、グリッドフィルタは 5 点/m<sup>2</sup>であるのに対し、白線フィルタは 73 点/m<sup>2</sup>と増加している。これは、白線フィルタリング機能において、白線上の点を全て抽出したためである。この課題については、白線上の点の抽出後、設定したグリッド間隔で点を間引くことにより、密度を低くできると考えられる。ただし、その場合における精度の影響を検証する必要がある。以上の結果より、白線フィルタリング機能は、点群データの精度向上に有用であることを示した。

### 5.4.5 実験 3. 出来形管理の適用可能性の評価

#### (1) 実験内容

本実験では、提案手法の重畳フィルタリング前後の点群データを用いて、レーザスキャナを用いた出来形管理要領に準拠した出来形管理資料を作成し、その精度を比較する。この資料は、工事対象物の設計形状を示す 3 次元設計データと、点群データを元とする出来形評価用データとを用いて、設計面と各点との離れにより出来形の判定を行うものである。なお、本実験の評価対象は、道路の部位ごとに分ける必要があるため、天端、左側の法面 1 と右側の法面 2 とする。出来形管理資料の作成は、次の手順で実施する。

#### Step 1. 出来形評価用データの生成

出来形評価用データは、点群データから 1 m<sup>2</sup>あたり 1 点以上の間引きを行うことと定義されている。そのため、重畳フィルタリング前後の点群データそれぞれに対して、Cloud Compare を用いて、5cm 間隔に点を間引き、出来形評価用データを生成する。

## Step 2. 出来形管理資料の作成

Step1 で生成した出来形評価用データの各点と発注図から生成した 3 次元設計データの設計面との標高差から出来形の良否判定を行う。その情報として、標高差の平均値、最大値と最小値を算出し、これらが規格値を超過している場合、異常値を示す「×」と判定する。また、参考情報として、出来形評価用データの点数、評価面積、および異常値の個数を示す棄却点数を算出する。さらに、各点の標高差を図化したヒートマップを作成する。この作成方法については、出来形管理要領に準拠して行う。

## (2) 実験結果と考察

標高較差の評価結果を表 5-6 に、ヒートマップを図 5-27 に示す。また、AutoCAD Civil 3D で 3 次元モデルを生成して可視化した結果を図 5-28 に示す。

表 5-6 標高較差の評価結果

箇所	測定項目	規格値	FARO		RIEGL		PENTAX	
			フィルタ前	フィルタ後	フィルタ前	フィルタ後	フィルタ前	フィルタ後
天端	平均値	50	24	21	22	14	20	24
	最大値	150	152 ×	120	154 ×	128	253 ×	150
	最小値	-150	-109	-57	-60	-64	-191 ×	-61
	データ数	—	111,640	111,643	111,635	111,637	111,636	111,635
	評価面積	—	6,977	6,977	6,977	6,977	6,977	6,977
	棄却点数	—	1	0	1	0	10	0
法面 1	平均値	80	41	31	22	21	31	27
	最大値	190	169	142	257	121	647 ×	129
	最小値	-190	-131	-108	-59	-60	-99	-88
	データ数	—	40,404	40,404	40,400	40,404	40,405	40,402
	評価面積	—	2,525	2,525	2,525	2,525	2,525	2,525
	棄却点数	—	10	0	1	0	274	0
法面 2	平均値	80	79	68	57	55	51	50
	最大値	190	497 ×	264 ×	241 ×	317 ×	519 ×	211 ×
	最小値	-190	-601 ×	-42	-72	-73	-138	-78
	データ数	—	62,415	62,416	62,404	62,404	62,405	62,413
	評価面積	—	3,900	3,900	3,900	3,900	3,900	3,900
	棄却点数	—	2,876	1,010	679	592	622	20

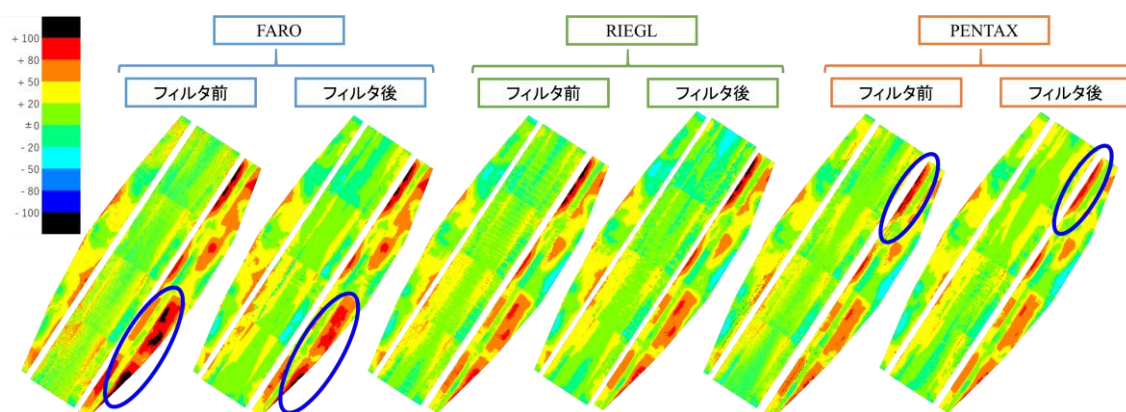


図 5-27 ヒートマップ表示結果

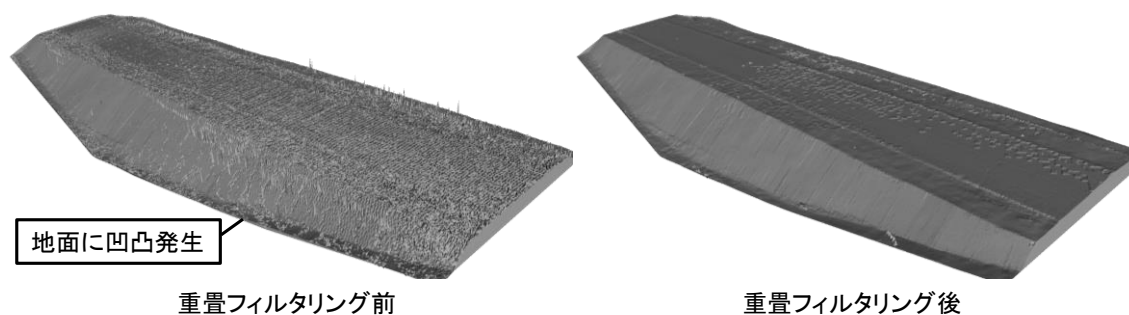


図 5-28 3次元モデルの可視化結果

まず、表 5-6 のフィルタ前後の判定×の個数に着目すると、FARO では3 から 1、RIEGL では2 から 1、PENTAX では4 から 1 へと3機種全てにおいて減少している。ただし、これらの中で、RIEGL の最大値がフィルタ後で増加している。これは、RIEGL の重畳精度が低かったためと考えられる。

次に、平均値において、1箇所を除いて結果が向上している。その1箇所はPENTAXの天端であるが、差が4mmと微小であるため、機器精度に伴う計測誤差の可能性が高い。さらに、最大値、最小値と棄却点数のそれぞれについても、ほぼ全ての結果が向上している。そして、図 5-27 のヒートマップを確認すると、青色の丸枠で示す法面において、規格値外を示す黒色が減少している。法面は、傾斜があり標高較差が大きくなる傾向であるため、結果の向上が顕著に現れたと考えられる。

最後に、図 5-27 の3次元モデルの比較結果を確認すると、フィルタ前は全体的に地面の凹凸があるが、フィルタ後では、その凹凸が軽減されていることがわかる。

以上の結果から、出来形管理に重畳フィルタリング機能を用いることで、より正確に出来形を評価でき、出来形管理の適用可能性を示せたといえる。

## 5.5 まとめ

本研究では、まず、施工現場で計測した点群データ重畳時の課題を分析した。その結果、多地点で計測された点群データをそのまま重畳すると膨大な点群数になり、精度が悪化する原因となるため、重畳時に不要点を除去し、高精度な点を選択するアルゴリズムの考案が必要なことが示唆された。次に、その分析結果に基づいて、重畳フィルタリング機能と白線フィルタリング機能を提案した。前者の機能では、レーザ入射角が高く、計測距離が近いほど高精度かつ高密度な点が得られる傾向がある特徴に着目し、点群データが高密度な範囲の点を抽出する。後者の機能では、地上設置型レーザスキャナから得られる反射強度は、計測対象物の輝度が高いほど高くなる傾向がある特徴に着目し、ブレイクラインに沿って白線を引き、その反射強度を特徴として白線上の点を抽出する。そして、実証実験において、提案手法の有用性を評価した。実験 1 と実験 2 では、提案手法のそれぞれの機能の精度評価を実施し、結果が向上することから提案手法の有効性を確認した。また、実験 3 では、重畳フィルタリング機能を用いて実務の出来形管理資料を作成し、提案手法により結果が向上することから実務への適用可能性を示した。ただし、重畳フィルタリング機能では、部位ごとの分割のために 3 次元設計データが必要となるため、そのデータが無い現場には適用することができない。また、白線フィルタリング機能では、機器ごとに反射強度の調整が必要なことや点群密度が高くなる課題がある。そのため、これらの課題の解決策を検討する必要がある。また、土工のみでなく、舗装工などの様々な現場において提案手法を適用し、そこで得られる課題を解決することで、提案手法の汎用性を向上させることを目指す。



## 第6章 UAV写真測量を用いた出来形計測の効率化 手法の提案

### 6.1 研究の概要

本研究では、検査段階において、UAV 写真測量による点群データの生成精度を向上する計測手法と解析手法を提案し、出来形計測を効率化する手法を提案する。本研究の位置付けを図 6-1 に示す。

施工	<p>①施工段階における 3次元データ作成作業の省力化手法の提案</p> <p>【課題】3次元データを個々に作成しており、作業の重複や負荷が増えること。</p> <p>【目的】異なるフォーマットのデータを交換する流れを構築すること。</p> <p>【新規性】データ作成作業の二重化防止と、施工者の作業を省力化できること。</p> <p><b>3章</b></p>	<p>②地上レーザスキャナを用いた 施工状況把握の効率化手法の提案</p> <p>【課題】施工現場で計測時、建機や植生を除去して地表面の点を抽出する必要がること。</p> <p>【目的】傾斜のある地表の点群データを抽出し、移動体で欠損した地表面を補完すること。</p> <p>【新規性】常設のレーザスキャナから対象地物を正確に計測し出来高算出が容易になること。</p> <p><b>4章</b></p>
	<p>③地上レーザスキャナを用いた 出来形計測の効率化手法の提案</p> <p>【課題】多地点計測時、同一地点に対して測定精度の異なる点が混在すること。</p> <p>【目的】計測位置の検知を行うことで、高精度な点群データを抽出すること。</p> <p>【新規性】レーザスキャナの特性から最確値を選択し、納品検査の品質を保証できること。</p> <p><b>5章</b></p>	<p>④UAV写真測量を用いた 出来形計測の効率化手法の提案</p> <p>【課題】UAV写真測量の解析パラメータに関して最適な値を検討する必要があること。</p> <p>【目的】解析パラメータの条件の違いによる精度や人的・時間的コストを明らかにすること。</p> <p>【新規性】実務の経験を問わず、納品検査のための3次元データを生成できること。</p>
維持管理	<p>⑤UAV写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法の提案</p> <p>【課題】災害時、UAV写真測量で生成した点群データを地理座標系に変換できないこと。</p> <p>【目的】既存資産を用いて、災害時におけるUAV写真測量の解析手法を提案すること。</p> <p>【新規性】現地に立ち入ることなく点群データを生成し、災害規模を迅速に把握できること。</p> <p><b>7章</b></p>	

図 6-1 本章の位置付け

## 6.2 UAVの計測手法の誤差要因の分析

### 6.2.1 調査概要

本調査では、計測機器や計測方法による誤差要因を明らかにし、その影響度や発生条件を分析する。本調査では、表 6-1 に示す 4 項目を調査対象とする。これは、計測誤差に影響を与える可能性が高い項目として設定した。


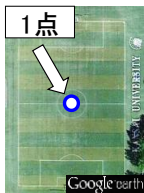
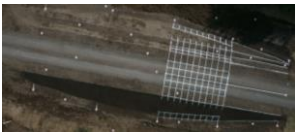
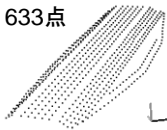

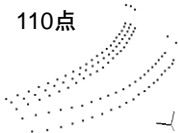
表 6-1 調査項目

No.	誤差要因	説明
1	撮影機材	撮影カメラとパラメータ設定による違い
2	計測高度	計測位置から計測対象物までの距離による違い
3	ターゲット位置・個数	ターゲットの位置関係と個数による違い
4	写真ラップ率	写真同士のラップ率による違い

#### (1) 実験場所

誤差要因の調査のための実験場所を表 6-2 に示す。

表 6-2 計測場所と測量点

対象	計測場所	測量点
グラウンド		
直線ヤード		
曲線ヤード		





実験は、関西大学高槻キャンパスのグラウンド、および日本建設機械施工協会施工技術総合研究所における土工の模擬現場の直線ヤードと曲線ヤードで実施した。直線ヤードは、道路延長が 50m で延長方向に勾配があり、片側斜面に小段を挟んだ凸型形状で構成される。また、曲線ヤードは、片側斜面の湾曲形状である。

また、これらの場所では、計測結果の正解データとするために、GNSS または TS による測量を実施する。グラウンドでは、国土地理院認定 1 級 GNSS 測量機である PENTAX の G3100-R1R を用いて、GNSS 測量を行う。また、直線と曲線ヤードでは、2 級 TS であるニコン・トリムブル社の Trimble S6 を用いて TS 計測を実施する。計測結果と計測点数を表 6-2 に示す。

## (2) 使用機器と使用ソフト

本実験で使用する UAV は、表 6-3 に示すように、DJI 社の DJI F550 とルーチェサーチ社の SPIDER を用いる。

表 6-3 使用 UAV と搭載カメラ

UAV	搭載カメラ	写真
DJI F550 (DJI 社)	GoPro Hero 3 (GoPro 社)	
SPIDER (ルーチェサーチ社)	α 6000 (ソニー社)	

それぞれの UAV には、コンパクトデジタルカメラの GoPro と一眼カメラのソニー社 α 6000 を搭載する。

また、連続した撮影写真から点群データを生成可能な SfM (Structure from Motion) ソフトは、PhotoScan Professional を用いる。

## 6.2.2 撮影機材の調査

### (1) カメラ機種

本調査では、コンパクトデジタルカメラの GoPro と一眼カメラのソニー社  $\alpha$  6000 とを用いて、写真から点群データを生成し、横断面で比較する。使用データは、曲線ヤードにて高度 30m と 50m で撮影した写真とする。

TS で計測した正解データと各点群データとの横断面の比較結果を表 6-4 に示す。

表 6-4 撮影機材ごとの横断面比較結果

機種	高度	横断面比較 (目盛り単位 : m)	高度	横断面比較 (目盛り単位 : m)
Go Pro	30m	<p>— TS計測データ — gopro (30m)</p>	50m	<p>— TS計測データ — gopro (50m)</p>
	30m	<p>— TS計測データ — alpha6000 (30m)</p>	50m	<p>— TS計測データ — alpha6000 (50m)</p>





この結果から、 $\alpha$  6000 では、30m と 50m のどちらも正解データに近接していることがわかる。一方、GoPro では、法面の下部において、正解データから離れる結果となった。これは、カメラ性能が  $\alpha$  6000 と比較して低いことやカメラパラメータを設定できないことが精度に影響を及ぼす原因となったと考えられる。このことから、空中写真測量においては、 $\alpha$  6000 などの一眼カメラの使用が適している。

### (2) カメラパラメータ

本調査では、写真撮影時のカメラパラメータの影響を確認する。日照などの計測環境により変更の必要があるパラメータとして、シャッタースピード、F 値と ISO 感度がある。この中で、シャッタースピードは、値が大きいほど露出時間が長く明るい写真を撮影できる反面、被写体のぶれが発生するため、UAV の飛行速度が影響を与える可能性がある。そこ

で、UAV 飛行によるシャッタースピードの影響度を調査する。本調査は、表 6-2 の曲線ヤードで実施し、カメラ  $\alpha 6000$  搭載の UAV を用いる。撮影は、高度 30m から秒速 4m の飛行速度で実施する。評価方法は、シャッタースピードを 1/500 と 1/100 に設定し、A4 サイズの X 模様のターゲットのぶれを比較する。各設定の比較結果を表 6-5 に示す。

表 6-5 シャッタースピードの比較結果

シャッタースピード	全体写真	ターゲット拡大
1/500		
1/100		

この結果から、1/100 は、1/500 と比較してターゲットにぶれが発生している。よって、飛行速度に応じて、シャッタースピードは小さめの値に設定すべきであることがわかった。また、シャッタースピードを決定後、写真の明るさを調整するために、F 値と ISO 感度を設定することが望ましい。

### 6.2.3 撮影高度の調査

本項では、撮影高度が 30m と 50m の場合における精度の違いを調査する。本調査は、表 6-2 の直線ヤードと曲線ヤードで実施し、カメラ  $\alpha 6000$  を用いて評価する。評価方法は、まず、点群データからバッファ幅 10cm で横断面を生成する。次に、生成した横断面から 1cm 間隔で垂線を下ろし、正解データの横断面との標高差を算出する。そして、その標高差を A～C 判定で評価する。出来形管理の規格値が標高較差  $\pm 5\text{cm}$  であるため、A 評価 0cm～5cm 未満、B 評価 5cm～10cm 未満、C 評価 10cm 以上に設定する。評価対象は、直線ヤード 10m 間隔の 5 断面と曲線ヤード 5m 間隔の 6 断面とする。

調査結果を表 6-6 に示す。

表 6-6 撮影高度の評価結果

撮影高度	評価結果			
	全評価点数	A 評価	B 評価	C 評価
30m	8,194	7,746 (94.5%)	448 (5.5%)	0 (0%)
50m	8,188	7,703 (94.1%)	485 (5.9%)	0 (0%)




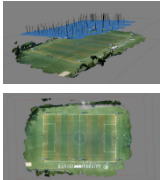
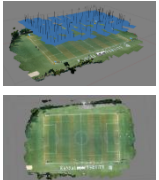
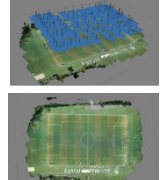
A 評価の結果に着目すると、30m が 94.5% に対して 50m が 94.1% であり、50m では精度が少し悪化している。ただし、50m は 30m に比べて広範囲を撮影可能な利点がある。したがって、計測範囲に応じて 30～50m 程度で適切な高度に設定することが良いと考えられる。

### 6.2.4 ターゲット位置と個数の調査

本項では、SfM ソフトの補正情報として必要となるターゲットの位置と個数による影響度を調査する。本調査は、表 6-2 のグラウンドで実施し、カメラ  $\alpha$  6000 を用いて評価する。評価方法は、表 6-2 の青丸で示す箇所の測量値と点群データから手動で指定した座標値との絶対誤差を比較する。比較対象は、グラウンド四方とその中間にターゲットを 6 点設置した場合、グラウンド四方に 4 点設置した場合、グラウンドの縦ライン上に 3 点設置した場合の 3 パターンとする。

評価結果を表 6-7 に示す。

表 6-7 ターゲット位置と個数の評価結果

項目	6 点 (四方と中間)	4 点 (四方)	3 点 (縦ライン)
配置図			
点群生成結果 (上：俯瞰 下：平面)			
絶対誤差	0.084m	0.234m	3.473m

点群生成結果に着目すると、全パターンで欠損なく点群データが生成できている。一方、絶対誤差に着目すると、ターゲットの個数が減少するにつれて結果が悪化している。特に、縦ラインの場合の結果が非常に悪い。これは、直線上のみに設置したため、水平、奥行きと標高方向の 3 軸の補正が正常に行われなかったためと考えられる。このことから、本調査では全ターゲットの標高が一定であったが、標高方向に対しても補正するために、高低差を持たせて設置する必要があることが示唆される。また、ターゲット個数は、補正精度を向上させるために、多く設定するほうがよい。

以上より、ターゲットは、高低差を持たせて計測範囲を網羅するように設置し、なるべく多くの個数を用いることが望ましいと考えられる。

## 6.2.5 写真ラップ率の調査

本項では、撮影写真の縦と横のラップ率を調査する。ラップ率とは、隣同士の写真が重なった部分の割合であり、縦方向の重なりを縦ラップ率、横方向を横ラップ率とする。

本調査は、表-2 のグラウンドで実施し、カメラ  $\alpha 6000$  を用いて評価する。評価方法は、縦と横のラップ率を 80, 60, 40%に変更し、点群データの生成結果を確認する。そして、点群データを欠損無く生成できている場合は「○」、一部が欠損し半分の範囲以上を生成できている場合は「△」、生成範囲が半分未満の場合は「×」と判定する。なお、縦ラップ率の調査では横ラップ率を 80%に固定し、横ラップ率の場合も同様に一方を固定する。

縦ラップ率と横ラップ率の評価結果をそれぞれ表 6-8 と表 6-9 に示す。

表 6-8 縦ラップ率の評価結果

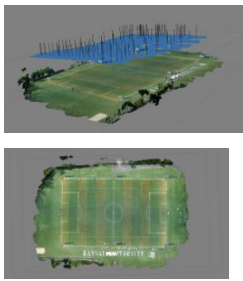
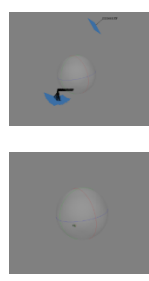
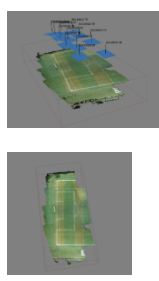
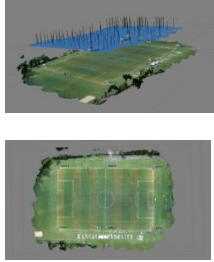
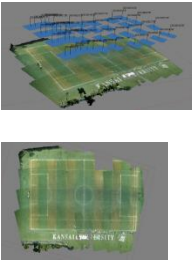
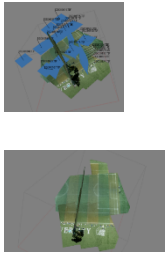
項目	縦ラップ 80% 横ラップ 80%	縦ラップ 60% 横ラップ 80%	縦ラップ 40% 横ラップ 80%
点群生成結果 (上：俯瞰 下：平面)			
結果	○	×	×

表 6-9 横ラップ率の評価結果

項目	縦ラップ 80% 横ラップ 80%	縦ラップ 80% 横ラップ 60%	縦ラップ 80% 横ラップ 40%
点群生成結果 (上：俯瞰 下：平面)			
結果	○	△	×

この結果から、縦と横のラップ率が 80%の場合は、欠損無く点群データを生成できている。それに対して、どちらか一方を 60~40%のラップ率とした場合は、一部または全体の点群データが生成できていない。したがって、本調査の計測環境においては、正常に点群データを生成するために、縦と横のラップ率がそれぞれ 80%以上に設定する必要があることがわかった。


## 6.2.6 UAV空中写真測量の計測精度の評価

### (1) 実験概要

本実験では、前述の調査結果をもとに、UAV の空中写真測量に影響を与える可能性のある計測条件を整理し、最適と考えられる値を設定する。そして、設定した計測条件の有効性を評価するため、土工現場において UAV による空中写真測量を実施し、その計測精度を評価する。実験場所は、表 6-2 の直線ヤードと曲線ヤードで実施する。

本実験の設定を表 6-10 に示す。

表 6-10 計測条件および本実験の設定

計測条件		条件の設定方針		本実験の設定
カメラ	機種	写真測量に適した一眼カメラを選択すること		ソニー社 $\alpha$ 6000
	カメラパラメータ	フォーカス	マニュアルフォーカスで高度に応じた値を設定すること	マニュアル
		シャッタースピード	値を小さくするほど露出時間が短くなり、写真が暗くなる代わりに被写体ブレを最小限に抑えられるため、航行速度に応じて小さめの値（1/250～1/1000程度）を設定すること	1/250
		F 値	値を小さくするほどフォーカスの合う範囲が狭くなるため、周囲の明るさに応じて大きめの値（F8～F11 程度）を設定すること	10
		ISO 感度	値を大きくするほど感度が高くなり、少ない光でも明るくなる代わりにノイズが発生するため、周囲の明るさに応じて 1600 程度までを設定すること	100
UAV	飛行ルート	ルート設計	飛行ルートは長手方向に沿って設定すること	長手方向に 飛行側線を 4 本
		側線数	2 本以下の場合、生成する点群データに歪みが発生する可能性があるため、飛行側線は 3 本以上とすること	
		ラップ率	ラップ率は縦横ともに 80%以上とすること	縦横とも 80%
		高度	飛行高度は 30～50m とすること	30m/50m
		速度	1秒間隔の撮影で80～90%程度のラップ率となるように、飛行速度は3～4m/s程度とすること	4m/s
現場	対空標識	形状	側線などから中心点を推測することができる形状を採用すること	 (X 型)
		設置位置	約 1,000 m <sup>2</sup> に 9 枚以上配置すること。また、高低差を持たせ、同一直線上に配置しないこと	約 1,000 m <sup>2</sup> に 9 枚を疎らに 配置
ソフト ウェア	写真測量 ソフトウェア	点群データの精度向上と絶対座標への変換のために、対空標識 (GCP : Ground Control Points) の設定が可能なソフトを使用すること		PhotoScan Professional

カメラパラメータ，UAV の飛行ルートと対空標識については，現場の状況に合わせて最適と考えられる値を設定する．また，カメラ機種は，一眼カメラの  $\alpha 6000$  が適しているが，比較対象とするために GoPro も使用する．さらに，飛行高度は，30m と 50m の2種類に設定して計測する．

本実験では，TS 計測値から点群データの再近傍点までの3次元空間における直線距離の平均値を算出し，計測精度を評価する．評価対象は，表 6-2 に示すように，TS で計測した直線ヤード 633 点と曲線ヤード 110 点とする．

## (2) 実験結果と考察

本実験の結果を表 6-11 に示す．

表 6-11 計測精度の評価結果

対象データ		点群データと TS 計測値との距離	
カメラ	高度	直線ヤード 633 点の 平均値(mm)	曲線ヤード 110 点の 平均値(mm)
$\alpha 6000$	30m	33	32
	50m	32	36
GoPro	30m	45	126

一眼カメラの  $\alpha 6000$  の結果に着目すると，直線と曲線ヤードのそれぞれにおいて，30m と 50m とともに出来形管理要領の要求精度である  $\pm 50\text{mm}$  を満たしている．一方，GoPro を用いた場合は，45～126mm と精度が悪化した．これは，カメラの解像度の違いやレンズの歪みが原因と考えられる．

以上のことから，一眼カメラを用いて表 6-10 に示すとおり計測条件を適切に設定することで，出来形管理要領の要求精度を満たすように，UAV による空中写真測量が可能となった．



## 6.3 写真測量ソフトウェアの解析パラメータの分析

### 6.3.1 調査概要

本調査では、写真測量ソフトウェアの解析パラメータを分析して、人的・時間的コストと精度との関係性を明らかにする。本調査では、表 6-12 に示す 4 項目を調査対象とする。

表 6-12 UAV 写真測量の解析パラメータ

項目	説明	推奨値
カメラキャリブレーション	レンズ歪み補正のキャリブレーション	未検証
点群生成処理の設定	SfM と MVS 処理の設定	
標定点の入力および補正	標定点の入力と人手の位置補正作業	

カメラキャリブレーションは、撮影写真の歪み量やレンズの中心位置などを求める処理である。写真測量ソフトウェアでは、これらを自動で推定するが、既存の要領では、事前にキャリブレーションを実施する必要がある。キャリブレーション情報の入力有無やキャリブレーション方法により、精度に影響を与える可能性が考えられる。

点群生成処理の設定は、写真測量ソフトウェアの SfM (Structure from Motion) と MVS (Multi-View Stereo) の処理における設定パラメータのことである。SfM では、複数写真から特徴点を検出後、写真間の特徴点を対応付けることで、撮影位置や撮影対象物の 3 次元座標などを算出する。また、MVS では、SfM で既知となった情報を用いて高密度な点群データを生成する。これらは、使用するソフトウェアによって、複数段階の精度設定及び品質設定が可能である。その設定によって、精度と処理時間に影響を与えるが、その関係が明らかとなっていない。

標定点の入力及び補正は、3 点以上の座標値を入力し、各写真の標定点の位置を補正する作業である。この時、標定点の補正作業の有無で精度差が生じる。

これらの解析パラメータ 3 項目は、誤差要因となり得るが、既存研究ではその影響が明らかにされていない。そこで、本研究でこれらの影響を明らかにする。

## 6.3.2 解析パラメータの調査実験

### (1) 実験概要

本実験では、写真測量ソフトウェアの解析パラメータの設定方法の違いにより、点群データの生成にかかる人的・時間的コストと精度との関係性を明らかにする。具体的には、カメラキャリブレーション、点群生成処理の設定、標定点の入力および補正の3項目に関して、異なる設定値で精度検証を行い、各パラメータの設定による影響を調査する。

### (2) 実験環境

使用する UAV は、前述した表 6-3 の SPIDER とし、カメラは  $\alpha$ 6000 を搭載する。また、計測条件の設定を表 6-13、ソフトウェアの実行環境を表 6-14 に示す。計測条件は、前述の調査結果を参考に最適と考えられる値を設定する。

表 6-13 計測条件

設定項目		設定値
カメラパラメータ	焦点距離, シャッタースピード, F 値, ISO 感度	16mm, 1/250, 10, 100
	地上画素寸法	7.2mm/画素
UAV 飛行設定	側線数	直線側線 4 ライン
	ラップ率	縦横ともに約 80%
	飛行高度	30m
	飛行速度	4m/秒

表 6-14 実行環境

項目	スペック
OS	Windows10 64bit
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-6560U-CPU @ 2.20GHz
記憶媒体	HDD 1TB
メモリ	8GB

また、実験場所は、前述の表 6-2 の日本建設機械施工協会施工技術総合研究所における土工の模擬現場の直線ヤードと曲線ヤードで実施した。この場所では、正解データとして TS 計測を実施している。

### (3) 解析パラメータの設定

調査対象の解析パラメータとその設定パターンを表 6-15に示す。

表 6-15 解析パラメータの設定パターン

解析パラメータ	設定パターン
カメラキャリブレーション	無し, 有り (付属), 有り (自動)
点群生成処理の設定	最低, 中, 最高
標定点の入力	直線 : 3, 9 枚 曲線 : 3, 5 枚
標定点の補正	補正無し, 補正有り

まず、カメラキャリブレーションは、無し、有り（付属）、有り（自動）の3種類を設定する。ここで、カメラキャリブレーションとは、写真の歪み補正のためのパラメータ情報を得る方法のことである。そのパラメータには、ピクセル単位の水平焦点距離 (fx)、垂直焦点距離 (fy)、主点のX座標 (cx)、Y座標 (cy)、レンズの歪み係数 (k1,k2,k3,p1,p2) がある。この処理により、図 6-2に示すように、歪みの無い写真を得ることが可能となる。

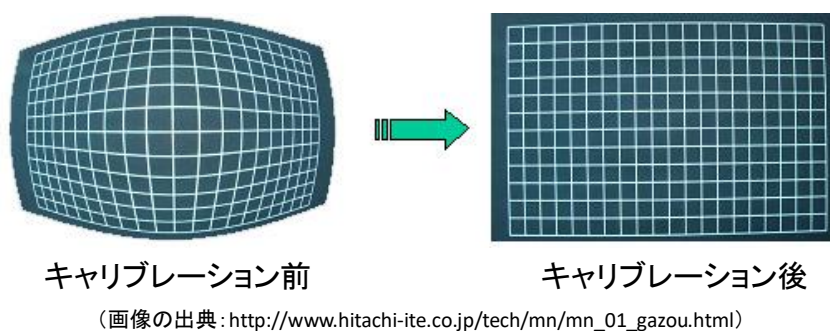


図 6-2 カメラキャリブレーションのイメージ

無しでは、キャリブレーション情報を入力せずに処理する。有り（付属）では、図 6-3に示すように、31枚のチェスボードを撮影し、付属ソフトのAgisoft Lensで推定したキャリブレーション情報を用いる。



図 6-3 有り (付属) のキャリブレーション方法

有り (自動) では, PhotoScanの写真アライメント処理でキャリブレーション情報を自動推定する機能がある. また, オプションのFIXキャリブレーションを設定した場合, パラメータはその後の処理で自動修正せずに確定される. 本実験では, 写真アライメント処理の最高の設定で自動推定したキャリブレーション情報を用いる. なお, 予備実験において, FIXキャリブレーションに設定すると誤差が増大したため, その設定は行わない.

次に, 点群生成処理の設定は, 写真アライメント処理の精度と高密度点群生成処理の品質をそれぞれ最低, 中, 最高の3種類に設定する. ここで, 図 6-4に示すように, 写真アライメント処理は複数写真から疎な点群データを生成するSfMの処理であり, 高密度点群生成処理は疎な点群データから密な点群データを生成するMVSの処理のことを指す.

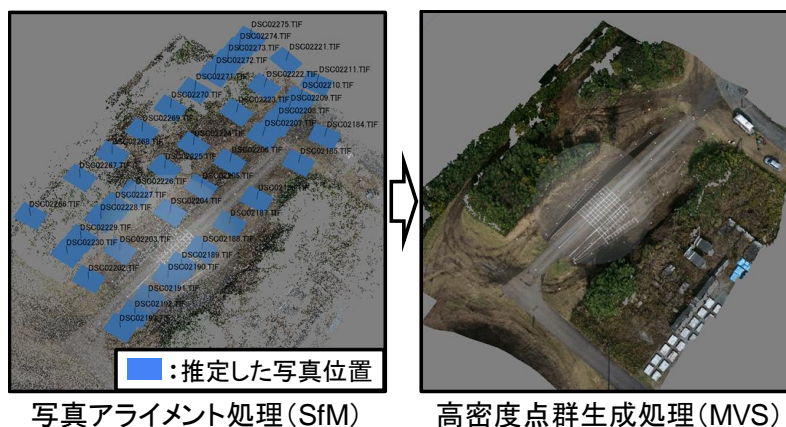


図 6-4 点群生成処理の処理イメージ

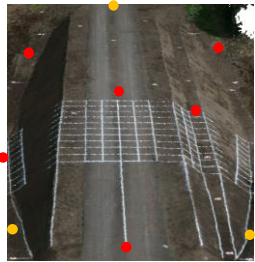

これらの設定の違いにより, 表 6-16に示すように, 処理に使用される画像の解像度が変化する.

表 6-16 点群生成処理の設定

写真アライメント処理 (SfM) の精度		高密度点群生成処理 (MVS) の品質	
設定	説明	設定	説明
最高	元画像の 2 倍	最高	元画像
中	元画像の 2 分の 1	中	元画像の 4 分の 1
最低	元画像の 8 分の 1	最低	元画像の 16 分の 1

そして、標定点の入力は、表 6-17に示すように、地理座標系の変換に最低限必要な3枚を設置した場合と、延長方向に約10～25m間隔で天端上と小段または法面下に設置した場合（直線ヤード9枚，曲線ヤード5枚）を比較する。

表 6-17 標定点の設置位置

	直線ヤード	曲線ヤード
標定点の位置	 <p>● : 9枚の標定点の位置 ● : 3枚の標定点の位置</p>	 <p>● : 5枚の標定点の位置 ● : 3枚の標定点の位置</p>

最後に、標定点の修正は標定点の手動補正有無で比較する。ここで、手動補正とは、手作業で各写真上の標定点の位置を修正し、点群データの生成精度を向上させる方法のことである。標定点の補正イメージを図 6-5に示す。



図 6-5 標定点の補正

まず、写真上から 3 点以上の標定点を指定し、マーカを設置する。次に、各マーカに対して、緯度、経度、標高を入力する。そして、標定点を指定していない写真に対して、マーカの位置を標定点の中心に修正する。この作業は、全写真に対して人手で実施する必要があるため、写真枚数と標定点の入力数に応じて作業時間を要する。

#### (4) 実験結果と考察

直線ヤードと曲線ヤードの評価結果を表 6-18 に示す。各解析パラメータを考察する。

表 6-18 解析パラメータの評価結果

範囲	No.	解析パラメータ				生成時間（概算）		評価結果（mm）			
		カメラキャリブレーション	点群生成処理設定	標定点の入力	標定点の修正	処理時間	作業時間	全点	エッジ	天端	法面
直線ヤード	A-1	無し	最高	9 枚	補正有り	30 時間	1 時間	22	24	21	22
	A-2	無し	中	9 枚	補正有り	1 時間	1 時間	26	30	21	25
	A-3	無し	最低	9 枚	補正有り	3 分	1 時間	67	78	60	61
	A-4	有り（付属）	中	9 枚	補正有り	1 時間	1 時間	25	29	21	25
	A-5	有り（自動）	中	9 枚	補正有り	1 時間	1 時間	29	30	29	38
	A-6	無し	中	9 枚	補正無し	1 時間	無し	35	44	23	38
	A-7	有り（付属）	中	9 枚	補正無し	1 時間	無し	36	44	24	38
	A-8	有り（自動）	中	9 枚	補正無し	1 時間	無し	35	43	24	28
	A-9	有り（付属）	中	3 枚	補正有り	1 時間	20 分	51	54	54	45
	A-10	有り（自動）	最高	9 枚	補正無し	30 時間	無し	33	41	20	36
曲線ヤード	B-1	無し	最高	5 枚	補正有り	30 時間	40 分	14	16	13	12
	B-2	無し	中	5 枚	補正有り	1 時間	40 分	27	28	27	25
	B-3	無し	最低	5 枚	補正有り	3 分	40 分	69	73	75	61
	B-4	有り（付属）	中	5 枚	補正有り	1 時間	40 分	27	29	28	26
	B-5	有り（自動）	中	5 枚	補正有り	1 時間	40 分	26	28	26	25
	B-6	無し	中	5 枚	補正無し	1 時間	無し	25	28	24	23
	B-7	有り（付属）	中	5 枚	補正無し	1 時間	無し	25	28	24	23
	B-8	有り（自動）	中	5 枚	補正無し	1 時間	無し	25	27	23	24
	B-9	有り（付属）	中	3 枚	補正有り	1 時間	20 分	25	31	22	20
	B-10	有り（自動）	最高	5 枚	補正無し	30 時間	無し	18	20	15	16

#### A) カメラキャリブレーション

直線ヤードのA-2, A-4, A-5と曲線ヤードのB-2, B-4, B-5をそれぞれ比較する。評価結果の全点に着目すると、直線ヤードでは、A-2の無しが26mm, A-4の有り（付属）が25mm, A-5の有り（自動）が29mmであり、A-4の有り（付属）で最も精度が良く、A-5の有り（自動）で精度が低下している。一方、曲線ヤードでは、B-2の無しが27mm, B-4の有り（付属）が27mm, B-5の有り（自動）が26mmであり、各パターンでほぼ同等の精度である。このことから、計測範囲が広い直線ヤードでは有り（付属）の精度が良いため、カメラキャリブレーションは、付属ソフトで実施することが望ましいと考えられる。

#### B) 点群生成処理

直線ヤードのA-1, A-2, A-3と曲線ヤードのB-1, B-2, B-3をそれぞれ比較する。処理時間と評価結果の全点に着目すると、直線ヤードでは、A-1の最高が30時間で22mm, A-2の中が1時間で26mm, A-3の最低が3分で67mmである。一方、曲線ヤードでは、B-1の最高が30時間で14mm, B-2の中が1時間で27mm, B-3の最低が3分で69mmである。以上より、設定を高くするほど高精度であることが確認できる。ここで、最高と中を比較すると、処理時間で約30倍の差が生じている。しかし、中の設定でも出来形管理要領の要求精度を満たすため、測量業務では中程度の設定で十分と考えられる。また、最低の設定は、数分で処理が完了するがエッジを中心に精度が著しく低下するため、状況把握などの活用に限定される。

#### C) 標定点の入力及び補正

標定点の入力について、直線ヤードのA-4, A-9と曲線ヤードのB-4, B-9をそれぞれ比較する。全点の評価結果に着目すると、直線ヤードでは、A-4の9枚が25mm, A-9の3枚が51mmであり、A-9の3枚に対して、A-4の9枚は約2倍の精度である。一方、曲線ヤードでは、B-4の5枚が27mm, B-9の3枚が25mmであり、両方でほぼ同等である。よって、直線ヤードの様に高低差と範囲が大きい場所では、標定点の数が精度向上に影響すると考えられる。

標定点の補正について、直線ヤードのA-2, A-6と曲線ヤードのB-2, B-6をそれぞれ比較する。全点の評価結果に着目すると、直線ヤードでは、A-2の補正有りが26mm, A-6の補正無しが35mmであり、A-6の補正無しに対して、A-2の補正有りは約1.3倍の精度である。一方、曲線ヤードでは、B-2の補正有りが27mm, B-6の補正無しが25mmであり、両方でほぼ同等の精度である。このことから、曲線ヤードでは補正の効果が見られないが、直線ヤードでは大幅に精度が向上しているため、手動作業による標定点の補正は精度向上に寄与するといえる。

以上の結果から、使用用途に応じて設定を変えることが望ましいと考えられる。結果に基づいて、最適と考えられる解析パラメータの設定を表 6-19 に整理する。

表 6-19 調査結果の整理

解析パラメータ	調査結果
カメラキャリブレーション	チェスボードを用いてカメラキャリブレーションを事前に行うことで精度向上に繋がる。
点群生成処理の設定	出来形管理要領の要求精度を満たすためには、中以上の設定が必要である。 最低の設定は、短時間で処理が完了するが、エッジを中心に精度が著しく低下するため、状況把握などの活用に限定される。
標定点の入力	高低差と範囲が大きい場所では、標定点の数が精度向上に影響するため、多くの標定点を設置することが望ましい。
標定点の補正	手動作業による標定点の補正により、10mm以上の精度向上に繋がる可能性がある。

## 6.4 分析結果に基づいたUAV写真測量の計測・解析手法の考案

本節では、前述の計測手法と解析パラメータの分析結果に基づいて、UAV 写真測量を施工管理に適用する場合に、一定の精度を確保するための計測・解析手順とそこで考慮すべき事項を整理する。

計測手順は、図 6-6 に示すように、事前準備、当日の行動と解析処理の3段階に分けられる。各手順で関連する誤差要因は、図中の誤差要因表のNoと対応付けている。



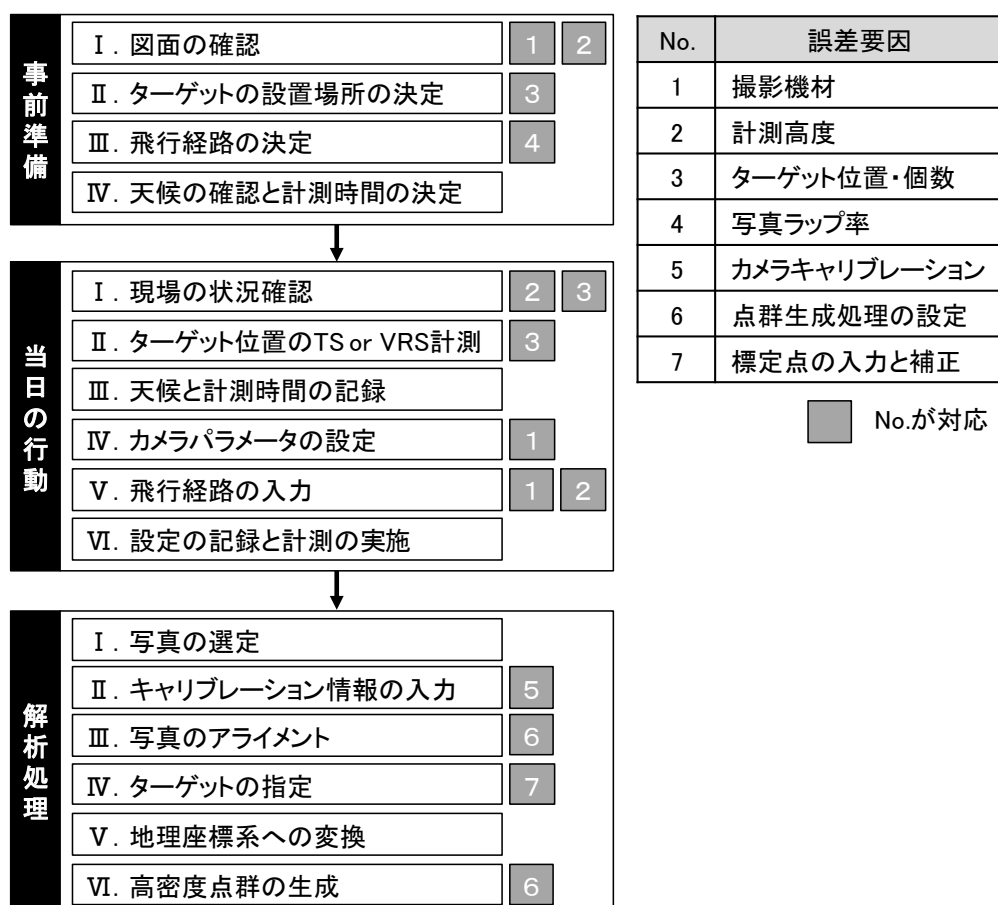


図 6-6 計測・解析手順と誤差要因との対応

## 6.4.1 事前準備

### (1) 図面の確認

「I. 図面の確認」では、計測対象物の形状および飛行経路の検討のための障害物の有無などを調査する。この工程を通じて、誤差要因である「撮影機材」および「計測高度」への対策を検討する。

本調査にて、30m および 50m であれば、計測精度に大きく影響を与えることはないことが明らかとなった。そのため、50m 以下の高度で飛行した際に次に示す事項に当てはまることがないかを確認する。

- ビルや高圧線などの障害物の有無および立ち入り禁止区域の有無を確認
- 計測対象物の全体を囲うことが可能なエリアの確認

- スタートポイントとエンドポイントとなるエリアとして適切な場所があるかの確認

これらの内容を確認し、その確認結果に基づき飛行ルートの設定やターゲットの設置場所を決定する。

また、「撮影機材」については、α 6000 と GoPro を比較し、α 6000 のほうが高精度であった。そのため、性能が高く、カメラパラメータを環境に合わせて設定可能な一眼カメラを使用することが望ましい。一眼カメラでは、次の設定が可能である。

- フォーカス・・・焦点を指す。計測時には、マニュアルフォーカスで計測距離（飛行高度）に応じた値を設定する。
- シャッタースピード・・・カメラの感光センサに光を当てる（露出）時間を指す。値を小さくすると露出時間が短くなり、写真が暗くなる代わりに被写体ブレを最小限に抑えられるため、航行速度に応じて小さめの値（1/250～1/1000程度）を設定する。
- F値・・・レンズ内を光が通過して感光センサに当たるときの明るさを指す。F値は、焦点距離／有効口径で算出されるため、小さいほどレンズを通過する光量が多く明るい写真が撮れることを意味する。小さい場合は、フォーカスの合う範囲が狭く（被写体深度が浅く）なるため、写真測量で用いる全域にピントが合った写真を撮影する場合は、周囲の明るさに応じて大きめの値（F8～F11程度）を設定する。
- ISO感度・・・感光センサの感度を指す。大きくするほど、感度が高くなり少ない光でも明るい写真が撮影できる代わりに、写真に高感度ノイズが発生し、ざらつきがある粗い画像となる。計測時には最も自由度が高い項目であるため、シャッタースピード、F値を決定した後、周囲の明るさに応じて設定する。ISO感度が1600程度までであれば、高感度ノイズを発生させずに撮影できるため、その範囲で設定する。

## (2) ターゲットの設置場所の決定

計測対象の図面および位置図を確認し、「Ⅱ. ターゲットの設置場所の決定」を行う。この工程を通じて、誤差要因である「ターゲット位置・個数」への対策を検討する。本調査の結果をもとに、留意すべき事項を次に示す。

- ターゲットの色は精度に大きく影響しないこと
- ターゲットの配置が直線的であった場合に精度が低下すること
- ターゲットの配置は可能な限り高低差があった方がよいこと
- ターゲットの数は多い方がよいこと。（本研究では、約1,000m<sup>2</sup>に9枚以上を設置）

### (3) 飛行経路の設定

配置されたターゲットの上空を網羅的に俯瞰するため、「Ⅲ. 飛行経路の設定」を行う。この工程を通じて「写真ラップ率」への対策を検討する。本調査にて、次に示す内容が明らかとなった。

- 写真ラップ率は80%超である必要があること

上記の内容を考慮しつつ、飛行経路を決定するにあたっての留意点を次に示す。

- 飛行側線は3本以上とすること。また、飛行ルートは計測対象物の長手方向に沿って飛行すること
  - 飛行側線が2本以下や飛行ルートが短手方向の場合、生成する点群データに歪みが発生する可能性があるため
- 飛行速度は3m/s程度とすること
  - 1秒間隔で写真撮影した場合、90%程度のラップ率となるため
- 電線や電波塔などの障害物がある場合は、その近くを航路に設定しないこと
  - 電線を切断する恐れがあるため
  - また、電波塔はUAVの送信機と受信機との電波を遮断する可能性が高いため

### (4) 天候の確認と計測時間の決定

「Ⅳ. 天候の確認と計測時間の決定」を通じて、計測当日のスケジュールを決定する。

本調査では、誤差要因として「日照条件」を含まなかったが、影の影響で地面に陰影ができるため、写真測量時の誤差要因となる可能性がある。そのため、太陽が天頂にある時間帯に UAV を飛行して計測するなどの対策を検討する必要がある。

## 6.4.2 当日の行動

### (1) 現場の状況確認

当日の行動では、まず「Ⅰ. 現場の状況確認」を実施する。この工程を通じて、誤差要因である「計測高度」および「ターゲット位置」への対策を検討する。

温かい季節には、植生が障害となって計測地点を隠してしまうなどの問題が考えられる。このため、計測時に周辺環境を確認し、写真測量時に確認可能な位置にターゲットを配置する必要がある。

## (2) ターゲット位置の TS または VRS による計測

次に、「Ⅱ. ターゲット位置の TS または VRS による計測」を行う。この工程を通じて、誤差要因である「ターゲット位置」への対策を検討する。

TS または VRS による計測は、計測データの地理座標系への変換に必要なターゲット位置のみに実施する。

## (3) 天候と計測時間の記録

「Ⅲ. 天候と計測時間の記録」の工程を通じて、誤差要因の可能性のある「日照条件」への対策を検討する。

## (4) カメラパラメータの設定

さらに、周囲の環境を鑑みながら、「Ⅳ. カメラパラメータの設定」を行う。この工程を通じて、誤差要因である「撮影機材」への対策を検討する。

本調査にて、撮影機材自体が持つオートフォーカスなどの機能や ISO 感度、露光時間などの要素は、写真にぶれが発生する要因となるため、計測精度に影響している可能性が示唆された。そのため、これらのパラメータは、計測高度や飛行速度、日照条件などの要素と照らし合わせながら適切に設定する必要がある。カメラパラメータの設定手順を次に示す。

1. 飛行高度と同様の距離をメジャーで測り、その距離の場所に対空標識をセットする。
2. 1でセットした対空標識をもとに、マニュアルでフォーカスを合わせる。オートフォーカスはOFFとし、可能な限り無限遠としないことが望ましい。
3. UAVの航行速度、高度、カメラの画角、画素数を考慮して、シャッターを切る間の移動距離が1画素の対地距離を超えないように、シャッタースピードを1/250～1/1000程度に決定する。
4. 飛行高度、計測対象の地形の高度差を考慮してF値を決定する。計測対象とカメラの位置が極端に近くなる可能性がある場合に十分に考慮する必要があるが、通常の飛行において計測対象とカメラの距離が数mまで極度に近づく可能性は低い。そのため、一般的なレンズが解放F値（最小のF値）から2, 3段階絞った時に最高のパフォーマンスを

発揮するよう設計されていることを踏まえて、開放F値がF2.8のレンズの場合F5.6～F8程度、開放F値がF3.5のレンズの場合F6.1～F11程度を設定する。

5. 天候（周囲の明るさ）とシャッタースピード、高度、F値を考慮してISO感度を決定する。ISO感度は、低くするほど高感度ノイズが少なく画質の向上が望めるため、天候、シャッタースピード、F値などの条件を満たす範囲内で最も低い値（1600程度まで）を設定する。これまでの経験から、暗い写真のほうがハレーションの発生割合が低いいため、高精度に写真測量が可能であることが示唆されているため、カメラの露光量が-1.0程度になるように設定する。また、ISO感度が、3200以上などの高い数値を設定しなければならない場合、撮影した画像に高感度ノイズが発生するため、F値の設定を見直すことが望ましい。
6. 上述の設定結果でカメラを撮影し、暗すぎることや歪みがないことなどを確認する。

## (5) 飛行航路の入力

「V. 飛行経路の入力」では、UAV の自動航行ソフトウェアを用いて、飛行経路の入力を行う。この工程を通じて、誤差要因である「撮影機材」および「計測高度」への対策を検討する。

## (6) 設定の記録と計測の実施

以上のフローを完了した後、「VI. 設定の記録と計測の実施」を行い、UAV による空中写真測量を実施する。

### 6.4.3 解析処理

#### (1) 写真の選定

解析処理では、まず、UAV で撮影した連続写真から「I. 写真の選定」を行う。これにより、写真測量ソフトウェアで写真から点群データを生成する際に高精度化することが可能となる。

写真測量ソフトウェアの処理において、写真が傾いている場合や、同じ地点や計測範囲外が写っている場合、点群データ生成の精度に影響することや、処理負荷がかかる可能性が高い。そのため、撮影写真を確認して、必要な写真と不要な写真を取捨選択する必要がある。写真の選定には、図 6-7 に示すような判定基準で取捨選択することが望ましい。

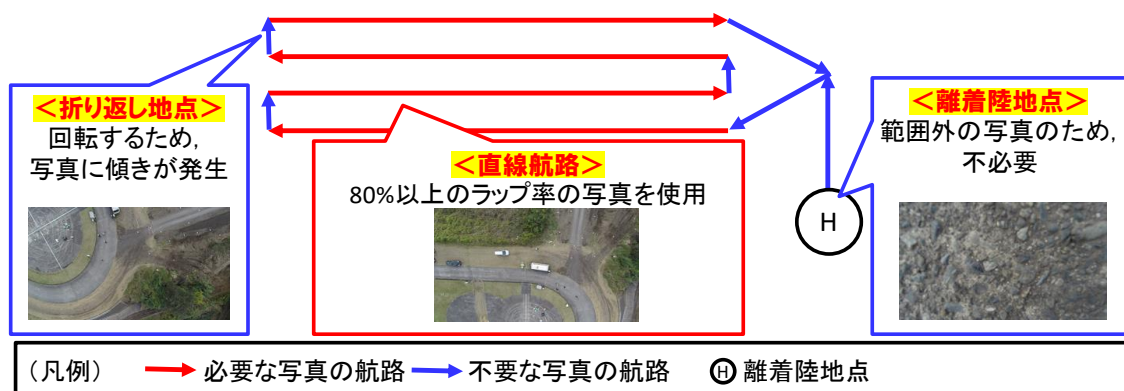


図 6-7 写真の選定の判定基準

- 必要な写真：直線的な航路  
飛行航路の決定において、ラップ率が高くなるように設定した直線的な航路は必要である。
- 不要な写真1：離着陸地点  
UAVの撮影は、離陸時に自動撮影モードを開始し、着陸時に終了させる。そのため、離着陸地点の写真が撮影されるが、そうした写真は不要である。
- 不要な写真2：折り返し地点  
折り返し地点では、UAVが旋回する関係で写真に傾きが発生する。また、折り返し後は、UAVが次の飛行ポイントを探索するため、同じ地点をホバリングする関係で同じ地点の写真が撮影される。これらの写真は不要である。

## (2) キャリブレーション情報の入力

次に、撮影したカメラの「II. キャリブレーション情報の入力」を行う。これにより、写真から歪みが補正され、点群データを生成する際に高精度化することが可能となる。この工程を通じて、誤差要因である「カメラキャリブレーション」への対策を検討する。本調査にて、次に示す内容が明らかとなった。

- 写真測量ソフトウェアの処理において、キャリブレーション情報を入力することで精度が向上すること

そのため、撮影に使用したカメラを用いて、事前にカメラキャリブレーションを行う必要がある。カメラキャリブレーションは、Agisoft社のAgisoft LensやOpenCVのキャリブ

レーション関数などで行うことができる。なお、OpenCV のカメラキャリブレーションは、Z.Zhang の手法[80]を基に実装されている。

### (3) 写真のアライメント

次に、選定した写真から「Ⅱ. 写真のアライメント」を行う。写真のアライメントとは、写真の EXIF 情報と各写真のオーバーラップから撮影位置を自動的に解析する処理である。この工程を通じて、誤差要因である「点群生成処理の設定」への対策を検討する。なお、この工程からは、写真測量ソフトの一つである PhotoScan Professional での処理を想定している。

「写真のアライメント」の処理では、数段階の正確さ (Accuracy) のパラメータ設定が可能である。これは、最高の設定にすることが望ましいが、処理時間に影響を与える。そのため、出来高算出や出来形管理などの精度が要求される場合は、中程度の設定で処理することがよい。

### (4) ターゲットの指定

写真の位置関係が正しく解析されていることを確認し、各写真に対して「Ⅲ. ターゲットの指定」を行う。これにより、写真の位置関係が補正され、より高精度な点群データを生成可能となる。この工程を通じて、誤差要因である「標定点の入力と補正」への対策を検討する。

この作業では、1 枚の写真に対してターゲットの中心位置を指定すると、他の写真の対応する位置にも自動的に指定される。しかし、その位置は、中心からわずかに誤差が発生している。全写真に対して、発生した誤差をターゲット中心位置に修正する作業を手動で行うことで、点群データの精度の向上につながる。ターゲットの指定では、次に示す点に留意する必要がある。

- 指定するターゲットの位置関係は、高低差があり、計測範囲を網羅すること
- 指定するターゲット数は、出来る限り多くすること。なお、地理座標系へ変換するため、最低3点必要であるが、6点以上あることが望ましい。

### (5) 地理座標系への変換

ターゲットの指定後、「Ⅳ. 地理座標系への変換」を行う。これにより、地理座標系の点群データが生成される。この作業では、各ターゲットに対して、VRS や TS を用いて計測した地理座標系の緯度経度と標高を入力する。このとき、世界測地系 (WGS) や日本測地系

2000 (JGD2000) などの対応した座標系を設定する。なお、JGD2000 の場合、国土地理院の HP などを参照し、対応する平面直角座標系を設定することに留意する。

## (6) 高密度点群の生成

地理座標系に変換した点群データから「V. 高密度点群の生成」を行う。これにより、空中に散在する点が除去され、高密度かつ高品質の点群データが生成される。この工程を通じて、誤差要因である「点群生成処理の設定」への対策を検討する。

「高密度点群の生成」では、数段階の品質 (Quality) のパラメータ設定が可能である。このパラメータを高くするほど高密度な点群データが生成されるが、処理時間に影響を与える。また、点密度が非常に高くなるため、点群処理ソフトウェアの解析において時間がかかる懸念がある。そのため、中程度の設定にすることが望ましい。

## 6.5 まとめ

本研究では、UAV の計測手法と写真測量ソフトウェアの解析パラメータに着目して、種々の条件の違いによる影響を調査した。計測手法の調査では、撮影機材、カメラパラメータ、撮影高度、写真ラップ率やターゲット位置と個数の違いによる誤差要因が明らかとなった。また、解析パラメータの調査では、カメラキャリブレーション、点群生成処理の設定、標定点の入力と補正の違いによる精度と人的・時間的コストの影響がわかった。そして、その結果に基づいて計測手法と解析手法を新たに提案した。ここでは、i-Construction に係る要領の要求精度を満たすための計測・解析手順と、留意すべき事項を整理した。これにより、実務者の経験量に関わらず、適切な計測と解析をするための指針を提示できたと考える。ただし、計測手法に関して、日照条件の違いによる影響を明らかにできていない。また、解析パラメータに関して、写真測量ソフトウェアの種類が変わると設定可能なパラメータが変わると考えられるが、その考慮ができていない。さらに、本研究では施工現場の地表面の計測を対象としたが、建物のエッジ、トタン屋根の凹凸形状や建設機械・ヒトなど、他の分野に適用した場合の影響が調査できていない。そのため、これらの課題に対する実験を重ねることで、土木分野以外の UAV 写真測量の適用可能性を検証することを目指す。



# 第7章 UAV写真測量を用いた災害時の状況把握の 効率化手法の提案

## 7.1 研究の概要

本研究では、維持管理段階の災害時の状況下において、UAV 写真測量を用いて点群データを生成する手法を提案し、災害時の状況把握を効率化する手法を提案する。本研究の位置付けを図 7-1 に示す。

施工	<p>①施工段階における 3次元データ作成作業の省力化手法の提案</p> <p>【課題】3次元データを個々に作成しており、作業の重複や負荷が増加すること。</p> <p>【目的】異なるフォーマットのデータを交換する流れを構築すること。</p> <p>【新規性】データ作成作業の二重化防止と、施工者の作業を省力化できること。</p> <p style="text-align: center; font-size: 2em;">3章</p>	<p>②地上レーザスキャナを用いた 施工状況把握の効率化手法の提案</p> <p>【課題】施工現場で計測時、建機や植生を除去して地表面の点を抽出する必要があること。</p> <p>【目的】傾斜のある地表面の点群データを抽出し、移動体で欠損した地表面を補完すること。</p> <p>【新規性】常設のレーザスキャナから対象地物を正確に計測し出来高算出が容易になること。</p> <p style="text-align: center; font-size: 2em;">4章</p>
	<p>③地上レーザスキャナを用いた 出来形計測の効率化手法の提案</p> <p>【課題】多地点計測時、同一地点に対して測定精度の異なる点が混在すること。</p> <p>【目的】計測位置の調整を行うことで、高精度な点群データを抽出すること。</p> <p>【新規性】レーザスキャナの特性から最確値を選択し、納品検査の品質を保証できること。</p> <p style="text-align: center; font-size: 2em;">5章</p>	<p>④UAV写真測量を用いた 出来形計測の効率化手法の提案</p> <p>【課題】UAV写真測量の解析パラメータに関して最適な値を検討する必要があること。</p> <p>【目的】解析パラメータの違いによる精度や人的・時間的コストを明らかにすること。</p> <p>【新規性】実務の経験を問わず、納品検査のための3次元データを生成できること。</p> <p style="text-align: center; font-size: 2em;">6章</p>
維持管理	<p>⑤UAV写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法の提案</p> <p>【課題】災害時、UAV写真測量で生成した点群データを地理座標系に変換できないこと。</p> <p>【目的】既存資産を用いて、災害時におけるUAV写真測量の解析手法を提案すること。</p> <p>【新規性】現地に立ち入ることなく点群データを生成し、災害規模を迅速に把握できること。</p>	

図 7-1 本章の位置付け

## 7.2 提案手法の概要

災害時の UAV 写真測量の手順を図 7-2 に提案する。平常時の手順と比較して、災害時では実施できない箇所を青字，追加で実施する箇所を赤字で示す。

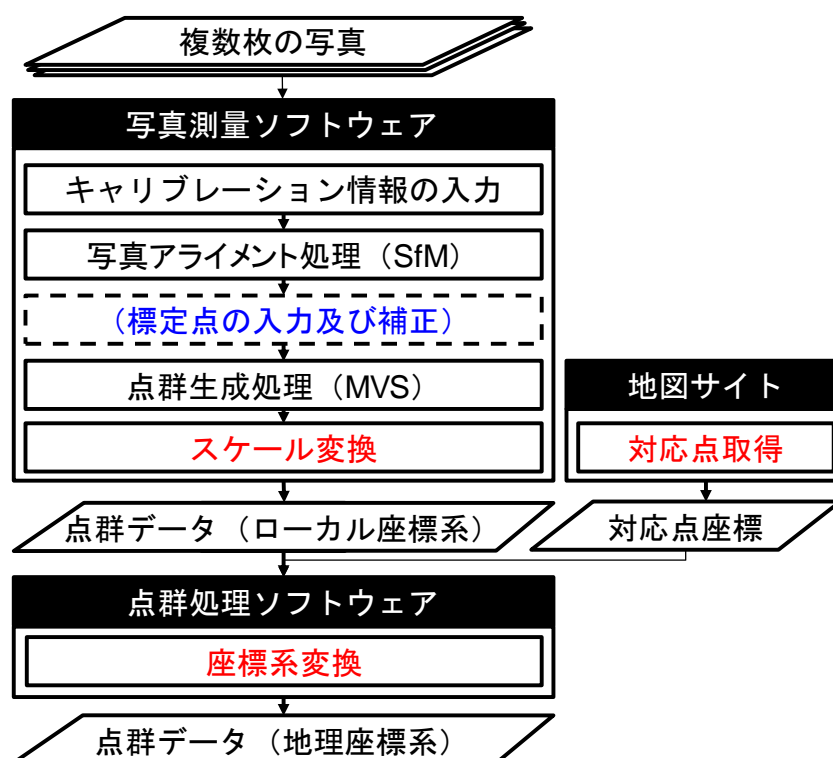


図 7-2 提案手法の手順

災害時は、標定点を設置できない状況下が想定されるため、点群データを地理座標系に変換できない課題がある。そこで、提案手法では、スケール変換，対応点取得，座標系変換により，地理座標系に変換された点群データを出力する。各処理の詳細な手順を次に記述する。なお，本章では，写真測量ソフトウェアとして，民間企業にも広く普及している PhotoScan Professional を使用する。

### 7.2.1 スケール変換

点群生成処理で生成された点群データは，スケールが再現されていないため，実空間のスケールに変換する必要がある。提案手法におけるスケールの設定方法を図 7-3 に示す。

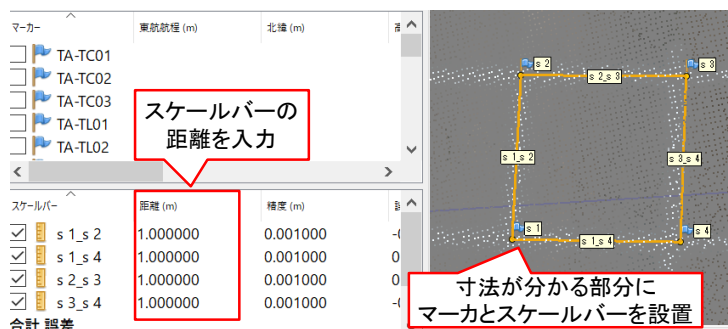


図 7-3 スケール変換

図 7-3 に示すように、生成された点群データに対してマーカを設置し、2 点間のマーカを結ぶスケールバーに距離を入力することで、その距離に合わせて点群データのスケールを修正できる。そのため、災害時、離陸地点などの人の立ち入りが可能な場所に、寸法が分かるターゲットを設置する使用方法が考えられる。なお、ターゲット寸法の正確さがスケールの精度に直接影響する点、撮影高度に応じて対地画素寸法が大きくなる点、天候が影響して写真が不鮮明になる可能性がある点から、大きいサイズ、見やすい色、正確な寸法のターゲットを設置すべきである。そのため、1m 程度の赤色ターゲットを用意することが望ましいが、ターゲットを設置できない場合は、構造物などの寸法を巻尺で測定する。

## 7.2.2 対応点取得

点群データをローカル座標系から地理座標系に変換するために、点群データと対応する実空間の座標値を取得する必要がある。提案手法における対応点取得方法を図 7-4 に示す。



図 7-4 地理院地図による対応点取得

図 7-4 に示すように、航空写真を基に点群データと対応する地点の座標値（以下、対応点）を 3 点以上取得する。このとき、航空写真から標高を取得する方法として、GoogleEarth を用いる方法と地理院地図を用いる方法がある。前者は、地理院地図よりも縮尺を拡大して詳細な地形を確認できるが、標高が m 単位で取得される。それに対し、後者は、縮尺が最大 1/2,500 であり、GoogleEarth に比べて指定位置の誤差が大きくなる。ただし、標高については、航空レーザ測量の 5m メッシュを用いており、10cm 単位で取得できる特徴がある。そこで、本研究では、対応点の指定に誤差が含まれるものの標高を詳細に取得可能な地理院地図を使用する。

### 7.2.3 座標系変換

前項で取得した対応点を用いて、点群データの座標系をローカル座標系から地理座標系に変換する。座標系の変換方法を図 7-5 に示す。

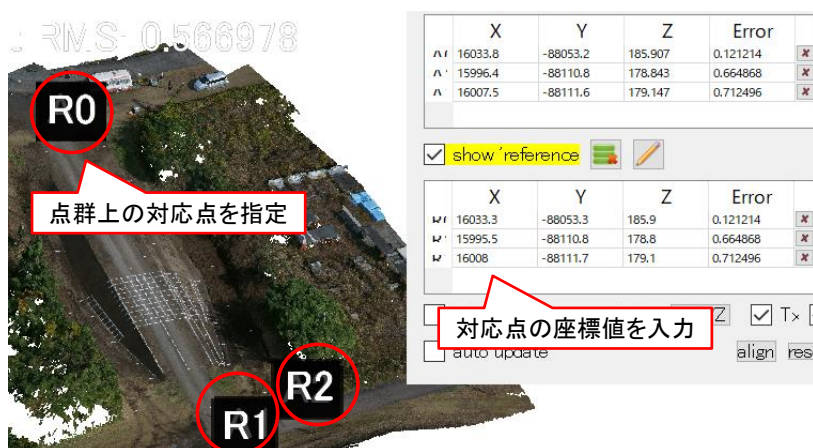


図 7-5 座標系変換

図 7-5 に示すように、点群処理ソフトウェアを用いて、点群データ上の対応点を 3 点以上指定する。そして、対応点の座標値を入力し、平行移動と回転の変換により、地理座標系の点群データを出力する。この変換は、フリーソフトである CloudCompare の Align 機能を使用する。

## 7.3 実証実験

### 7.3.1 実験計画

実証実験では、提案手法による災害時の UAV 写真測量の適用可能性を検証する。検証項目は、図 7-6 に示すように、「スケール変換の精度検証」と「座標系変換の精度検証」を実施する。

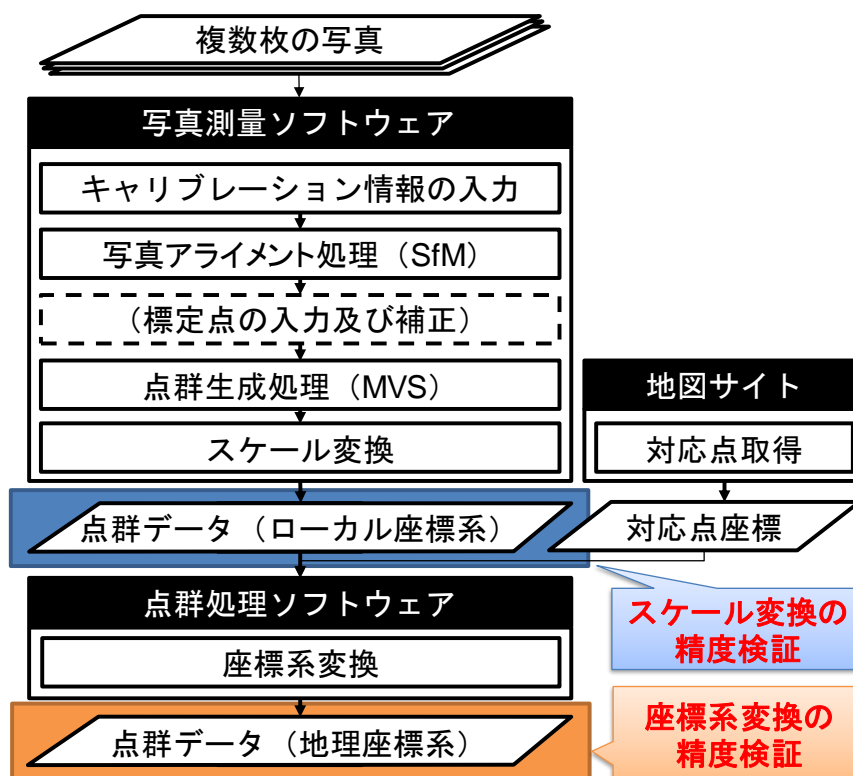


図 7-6 実験計画

スケール変換の精度検証では、提案手法のスケール変換で生成されたローカル座標系の点群データを用いて、土量の算出精度を検証することで災害現場の状況把握に適用可能かを検証する。また、座標系変換の精度検証では、提案手法の対応点取得と座標系変換で生成された地理座標系の点群データを用いて、災害前後の変位量把握に適用可能であるかを検証する。

### 7.3.2 スケール変換の精度検証

本実験では、標定点無しの提案手法でスケール変換された点群データを用いて土量を算出し、標定点有りで生成した点群データの土量との誤差を評価することで、災害現場の状況把握に適用可能であるかを検証する。

#### (1) 実験データ

対象データは、5章でも使用した表 6-2 の直線ヤードと曲線ヤードにおいて、提案手法の標定点無しで生成した点群データ（ローカル座標系）と、平常時を想定した標定点有りで生成した点群データを用いる。後者のデータは、提案手法の比較のために使用し、標定点無しでも標定点有りと比較して同等の精度で算出可能かを確認する。スケール変換方法は、図 7-7 に示すように、直線ヤードは 1m 四方の 4 点間、曲線ヤードは 1m 距離の 2 点間を指定した。

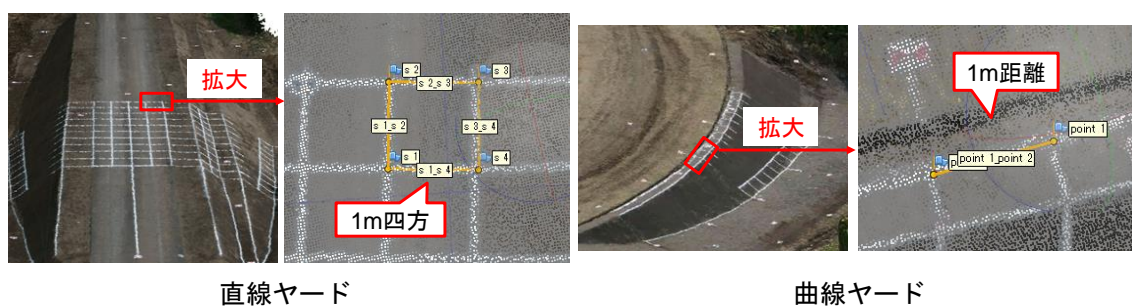


図 7-7 スケール変換方法

#### (2) 検証方法

検証方法は、AutoCAD Civ-il3D を用いて、点群データから 3 次元モデルを生成し、基準平面との土量で比較する。基準平面は、法面下の TS 計測データを基準に、延長方向 10m の範囲で生成した。生成した 3 次元モデルを図 7-8 に示す。



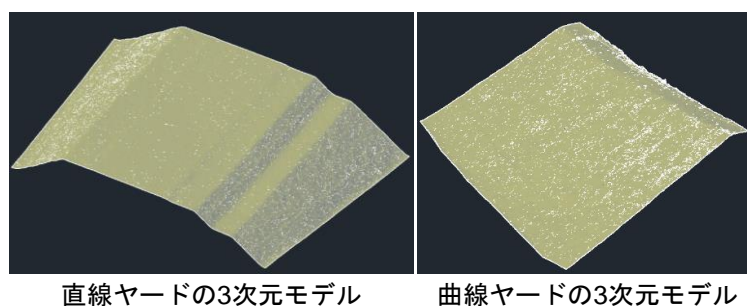


図 7-8 3次元モデルの生成結果

また、提案手法でスケール変換した点群データはローカル座標系であるため、そのままでは測地座標系の基準平面を用いて土量算出ができない。そこで、実務では必要無いが検証のために、提案手法の点群データと標定点有りで生成した点群データそれぞれに対して白線の交差部分を 3 点指定し、回転と平行移動により提案手法の点群データを測地座標系に変換した。直線ヤードと曲線ヤードそれぞれの指定した対応点を図 7-9 に示す。



図 7-9 対応点の指定

### (3) 実験結果と考察

検証結果を表 7-1 に示す。

表 7-1 検証結果

対象範囲	標定点有	標定点無 (提案)
直線ヤード	241.19 m <sup>3</sup>	233.39 m <sup>3</sup>
曲線ヤード	51.94 m <sup>3</sup>	51.91 m <sup>3</sup>

直線ヤードに着目すると、標定点有りが  $241.19 \text{ m}^3$  に対して標定点無しが  $233.39 \text{ m}^3$  であり、標定点有りを 1 倍とした場合の標定点無しの割合は約 0.96 倍である。また、曲線ヤードに着目すると、標定点有りが  $51.94 \text{ m}^3$  に対して、標定点無しが  $51.91 \text{ m}^3$  であり、同様に割合に換算すると約 0.99 倍である。このことから、提案手法を用いて、横断面を生成して災害規模を確認するなど、災害現場の状況把握に適用可能と考えられる。ただし、本実験では、10m の限られた範囲内で評価しているため、km 単位の大規模な災害現場においても同等の精度で算出可能かについては、今後の課題である。

### 7.3.3 座標系変換の精度検証

本実験では、測地座標系に変換された点群データを用いて災害前後の変位量把握に適用可能であるかを検証する。

#### (1) 実験データ

対象データは、直線及び曲線ヤードにおいて、提案手法の標定点無しで生成した点群データ（測地座標系）と、比較用の標定点有りで生成した点群データを用いる。座標系変換方法は、図 7-10 に示すように、各範囲で道路の境目などを 3 点ずつ指定して行った。

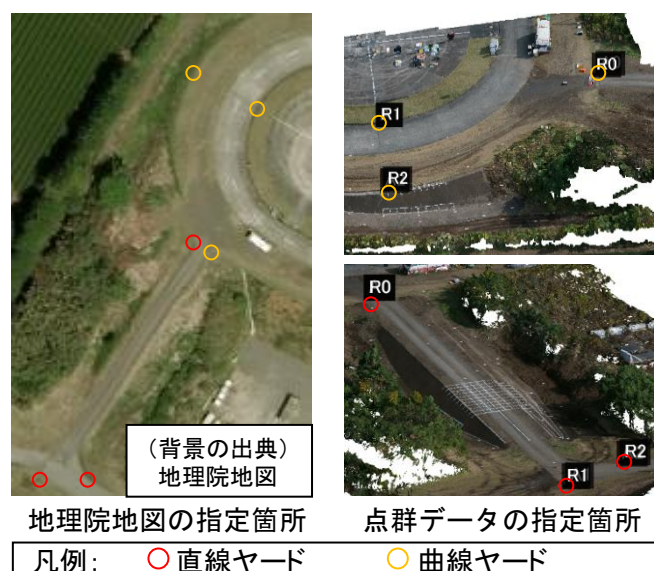


図 7-10 座標系変換の指定箇所



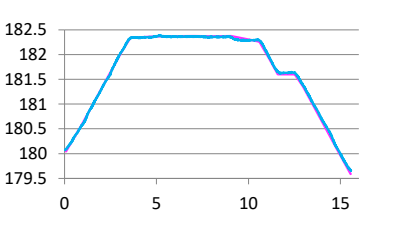
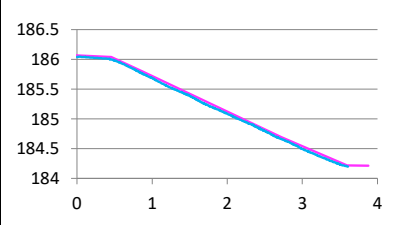
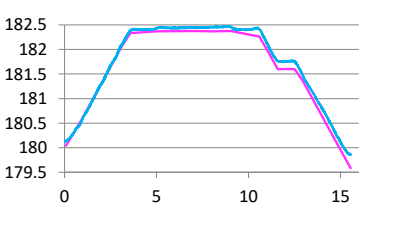
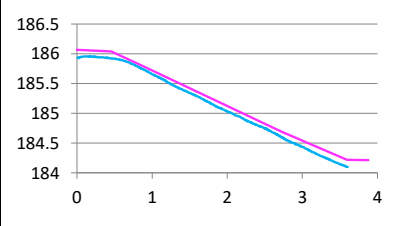
## (2) 検証方法

検証は、測点評価、断面評価、土量評価で実施する。測点評価は、正解データである TS 計測値から点群データの最近傍点までの直線距離の平均値を算出し、その誤差で評価する。土量評価は、前述のスケール変換の精度検証と同様の方法とする。断面評価は、点群データから横断面を生成して TS 計測データとの標高差で評価する。その具体的な手順として、まず、バッファ法[81]により横断線の垂直方向に 10cm の幅を指定し、その幅の中に存在する点群データを横断方向に投影して横断面を生成する。次に、横断面から 1cm 間隔で垂線を下ろし、正解データの横断面との標高差を算出する。そして、その標高差を A～C 判定で評価する。UAV 出来形管理要領の精度確認試験では、複数の検証点で±5cm 以内を満たす必要があるため、A 評価 0cm～5cm 未満、B 評価 5cm～10cm 未満、C 評価 10cm 以上に設定する。なお、評価対象は直線ヤード 5 断面 (10m 間隔)、曲線ヤード 6 断面 (5m 間隔) とする。

## (3) 実験結果と考察

断面評価で生成した横断面を表 7-2 に示す。

表 7-2 横断面の可視化結果

対象データ	横断面 (単位 : m)	対象データ	横断面 (単位 : m)
直線ヤード	標定点有り 	曲線ヤード	標定点有り 
	標定点無し 		標定点無し 

この結果から、提案手法の標定点無しでは、高さ方向に 10cm 程度の誤差が生じていることが確認できる。また、測点評価、断面評価、土量評価の結果を表 7-3 に示す。

表 7-3 検証結果

対象データ		測点評価 (mm)				断面評価 (点数 (割合))			土量 (m <sup>3</sup> )
		全て	エッジ	天端	法面	A 評価	B 評価	C 評価	
直線 ヤード	標定点 有り	25	29	21	25	5,713 (96.2%)	225 (3.8%)	0 (0%)	241.19
	標定点無 し(提案)	106	124	90	102	1,871 (31.5%)	2,516 (42.4%)	1,552 (26.1%)	252.65
曲線 ヤード	標定点 有り	27	29	28	26	2,074 (95.3%)	102 (4.7%)	0 (0%)	51.94
	標定点無 し(提案)	93	111	142	52	955 (43.9%)	841 (38.6%)	380 (17.5%)	50.36

まず、測点評価に着目すると、標定点無しでは約 10cm の精度であり、標定点有りと比較して、誤差が約 4 倍に増加している。次に、断面評価に着目すると、標定点有りが A 評価の 5cm 以内にはほぼ含まれているのに対して、標定点無しでは B 評価の 10cm 以内に 80% 程度含まれている。最後に、土量評価に着目すると、標定点有りを 1 倍とした場合の標定点無しの割合について、直線ヤードは約 1.05 倍、曲線ヤードは約 0.97 倍である。以上の結果より、提案手法を用いて、5%以内の誤差で土量を算出できる。このことから、提案手法を用いて、災害前後の土量差分や横断面比較によって、変位量の把握に適用できる可能性を示した。

## 7.4 災害時の UAV 写真測量の活用方法

### 7.4.1 概要

災害現場において UAV で計測したデータを用いて、提案手法による災害時の UAV 写真測量の活用方法を記述する。使用するデータは、北股地区（奈良県野迫川村）において、2014 年に UAV で撮影した 750 枚の写真とする。この地区では、2011 年に台風 12 号により大規模な土砂災害が発生し、復旧工事が実施されている。なお、本研究にて生成した結果の適用可能性を確認するため、災害前の 2009 年の航空レーザ測量の点群データ（以下、LP データ）及び災害後の 2012 年の LP データと比較し、災害後の概観を把握可能であるかを確認する。

## 7.4.2 提案手法による点群データの生成

対象の 750 枚の写真を入力データとし、本研究で提案した災害時の UAV 写真測量手順に従って作業を実施する。使用した設定値を表 7-4 に示す。

表 7-4 本実験の設定値

設定項目		設定値
計測条件	撮影機材	GoPro
	カメラパラメータ	オートフォーカス
	撮影高度	15～50m 程度
	写真ラップ率	縦：90%以上，横：90%以上
解析パラメータ	カメラキャリブレーション	無し
	点群生成処理の設定	中

点群データの生成手順として、まず、写真測量ソフトウェアを用いて、撮影した写真を読み込む。次に、事前にカメラキャリブレーションを実施している場合は、そのパラメータを入力する。そして、写真アライメント処理と高密度点群生成処理を実施する。さらに、図 7-11 左に示すように、寸法が分かる箇所にスケールバーを設置し、スケール変換を実施する。最後に、図 7-11 右に示すように、地理院地図から 3 点の対応点を取得し、点群処理ソフトウェアで座標系を変換する。以上の過程により、測地座標系の点群データを生成した。

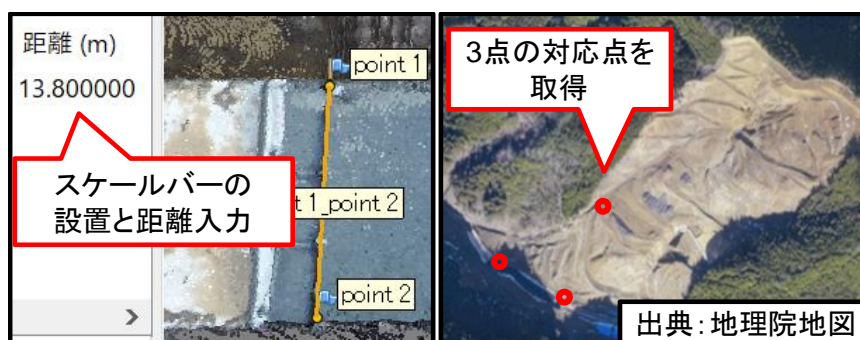


図 7-11 スケール変換と対応点取得

### 7.4.3 提案手法の点群データを用いた活用例

災害時の UAV 写真測量の活用例として、災害前後の横断面の比較結果と差分の可視化結果について、それぞれ図 7-12 と図 7-13 に示す。

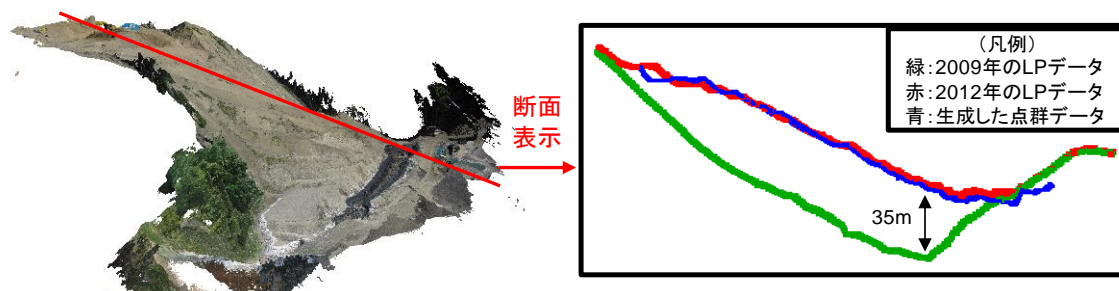


図 7-12 提案手法の点群データを用いた横断面の比較結果

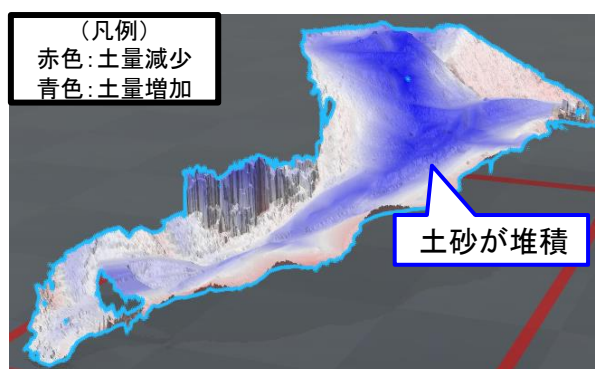


図 7-13 差分の可視化結果

まず、前者では、UAV 写真測量で生成した点群データと災害前後の LP データを用いて、指定範囲の点群データを抽出し、断面で比較している。この結果から、高さ方向に約 35m の土砂が堆積していることが確認できる。また、災害後の LP データと生成した点群データの高さがほぼ一致していることから、提案手法により点群データの一定の生成精度を確保できている。次に、後者では、災害前の LP データを基準に、UAV 写真測量で生成した点群データとの高さ方向の差分を算出し、その差分量によって色付けして可視化している。このように、災害前後の地形の変位量を可視化し、災害状況の把握が可能となる。なお、現況の LP データに関しては、国土地理院が提供する基盤地図情報の数値標高モデルにおいて 5m メッシュで取得できる。そのため、これを使用することにより、災害発生時、同様の活用が可能と考えられる。

## 7.5 まとめ

本研究では、平常時の地物の位置情報を取得する方法として、国土地理院が無償公開している航空写真地図と航空レーザ測量成果があることに着目して、災害時における UAV 写真測量の新たな解析手法を提案した。具体的には、写真測量ソフトウェアを用いたスケール変換と、地理院地図と点群処理ソフトウェアを用いた座標系変換を考案した。そして、実証実験において、スケール変換の精度検証により、提案手法のスケール変換を用いて、標定点有りと比較してほぼ同等のスケールを再現できることを確認した。また、座標系変換の精度検証結果により、提案手法の座標系変換を用いて、地理院地図から対応点を取得した場合でも、5%以内の誤差で土量を算出できることを確認した。このことから、提案手法の点群データを用いて、災害前後の横断面比較や土量算出により、災害時の状況把握や災害前後の変位量の把握に適用できる可能性を示した。ただし、本研究では、比較的規模が小さい施工現場を災害現場と想定して実験を実施している。そのため、km 単位の大規模な災害現場においても、精度を担保した上で適用可能であるかを検証し、実務に適用可能な手法へと発展することを目指す。



## 第8章 総括

本研究では、i-Construction の実現に向けて、施工、検査、維持管理の各段階において 3 次元データを利活用する手法を考案し、実証実験を通じて有用性を確認した。各章の内容について、それぞれ概説する。

第 1 章では、研究の背景として、建設業就業者の高齢化に伴って将来的な担い手の不足が懸念される状況下における建設現場の生産性の向上と施工の効率化のための現状の取り組みと課題を述べた。そして、建設生産プロセスの施工段階、検査段階、維持管理段階を対象とする 3 次元データの活用に関する既存研究と取り組みを調査・分析し、各段階における課題を概説した。その中で、本研究で解決すべき課題は、施工段階において情報化施工の 3 次元データが個々に作成されており作業の重複や負荷が生じていること、および、地上レーザスキャナで計測された点群データから地表面の点を抽出する必要があること、検査段階において地上レーザスキャナを用いて多地点からの計測時に同一地点に対して測定精度の異なる点が混在すること、および、UAV 写真測量の解析パラメータに関して最適な値を検討する必要があること、維持管理段階の災害対応において UAV 写真測量で生成した点群データのスケールと座標系を再現できないことの 5 つとした。そして、これらの課題を解決する方法として、施工段階における 3 次元データ作成作業の省力化手法と地上レーザスキャナを用いた施工状況把握の効率化手法、検査段階における地上レーザスキャナおよび UAV 写真測量を用いた出来形計測の効率化手法、維持管理段階における UAV 写真測量を用いた災害時の状況把握の効率化手法を提示した。

第 2 章では、まず、本研究で適用対象とする 3 次元データとして、3 次元ポリライン、3 次元設計データ、地上レーザスキャナおよび UAV 写真測量により取得される点群データの特徴を調査した。そして、第 1 章で提示した課題を解決する方策に適用可能な手法を調査した。そして、施工段階において情報化施工技術で用いられるデータを連携する活用方法が考えられていない課題と、地上レーザスキャナで道路や河川を計測した点群データから地表面を抽出する有効な手段が示されていない課題、検査段階において地上レーザスキャナで計測した点群データの間引き処理でレーザ計測機器の特性が考慮されていない課題と、UAV 写真測量のソフトウェアの解析パラメータの影響が明らかにされていない課題、維持管理段階において UAV 写真測量による点群データの生成手法が確立していない課題を明らかにした。本章では、これらの課題を解決する手段として、MC/MG など活用される 3 次元ポリラインから TS 出来形管理の 3 次元設計データを生成する手法、平坦部と傾斜部でグリッドサイズを変化させることと連続的に計測された点群データを活用することに着目して道路や河川における地表面の点群データを高精度に抽出する手法、計測位置の情報を用

いることで地上レーザスキャナの多地点計測において高精度な点群データを抽出する手法、計測手法と解析パラメータに着目して点群データの生成精度を向上する手法、既存資産の地図データを活用して災害時における UAV 写真測量の解析手法をそれぞれ提案した。

第 3 章では、施工段階における 3 次元データ作成作業を省力化する手法を詳述した。主に、情報化施工技術で用いられるデータを連携する活用方法が考えられていない課題に対して、本研究が取り組んだ解決手法を介して 3 次元ポリラインから 3 次元設計データを生成する手順を述べた。そして、実証実験において、提案手法で生成した 3 次元設計データの精度を検証し、技術者との協議により提案手法の有用性を示した。また、3 次元設計データの生成時間を計測し、作成作業の大幅な省力化が可能であることを実証した。

第 4 章では、施工段階における地上レーザスキャナを用いた施工状況の把握を効率化する手法を提案した。主に、平坦部と傾斜部でグリッドサイズを変化させることと連続的に計測された点群データを活用することに着目して、道路や河川における地表面の点群データを高精度に抽出する手順を述べた。そして、実証実験において、既存手法より精度が向上することから提案手法の有用性を確認した。また、高水準で欠損箇所の地表面を補完できることを確認した。

第 5 章では、検査段階における地上レーザスキャナを用いた出来形計測を効率化する手法を詳述した。主に、地上レーザスキャナで計測した点群データの間引き処理でレーザ計測機器の特性が考慮されていない課題に対して、本研究が取り組んだ解決手法により、計測位置の情報を用いることで地上レーザスキャナの多地点計測において高精度な点群データを抽出する手順を述べた。そして、実証実験において、提案手法の各機能の精度評価を実施し、結果が向上することから提案手法の有効性を確認した。また、実務の出来形管理資料を作成し、提案手法により結果が向上することから実務への適用可能性を示した。

第 6 章では、検査段階における UAV 写真測量を用いた出来形計測を効率化する手法を詳述した。主に、UAV 写真測量のソフトウェアの解析パラメータの影響が明らかにされていない課題に対して、本研究が取り組んだ解決手法により、計測手法と解析パラメータに着目して点群データの生成精度を向上する手順を述べた。そして、実証実験において、i-Construction の要求精度を満たすために必要な計測手法と解析手法を明らかにした。

第 7 章では、維持管理段階における UAV 写真測量を用いた災害時の状況把握を効率化する手法を提案した。主に、UAV 写真測量による点群データの生成手法が確立していない課題に対して、本研究が取り組んだ解決手法により、既存資産の地図データを活用して災害時における UAV 写真測量の解析手順を述べた。そして、実証実験において、平常時と比較



して、ほぼ同等のスケールを再現できることと、5%以内の誤差で土量を算出できることを確認した。このことから、提案手法の点群データを用いて、災害前後の横断面比較や土量算出により、災害時の状況把握や災害前後の変位量の把握に適用できる可能性を示した。

以上、本研究では、i-Construction の実現に向けて、施工、検査、維持管理の各段階において 3 次元データを利活用する手法を提案した。そして、実務で活用される設計データや、実現場で計測した点群データを用いて実証実験を行い、提案手法の有用性を確認した。本研究成果の今後の展開としては、提案手法を多くの実務に適用して、実務者の意見を取り入れて手法を改良したい考えである。また、本研究は土工や土砂災害現場を対象としたが、舗装工などの他の工種に適用することで、本提案手法の汎用性を確認したい。さらに、考案した手法を発展させ、地表面以外のヒトや車両などの移動体をリアルタイムに計測することで工事現場の安全管理、道路交通分析やスポーツなどの適用範囲の拡大を目指す。



## 参考文献

- [1] 小松崎弘道, 貞末道昭, 大森晃: 地上レーザスキャナによる地形測量, 日本写真測量学会, 写真測量とリモートセンシング, Vol.52, No.6, pp.301-303, 2013.
- [2] 秋山実: 写真測量, 山海堂, 2001.
- [3] 日本写真測量学会: 三次元画像計測の基礎, 東京電機大学出版局, 2016.
- [4] 田中成典, 今井龍一, 中村健二, 川野浩平: 3 次元 CAD データを用いた出来形管理支援システムの開発, 電子情報通信学会論文誌 D, 電子情報通信学会, Vol.J96-D, No.10, pp.2425-2439, 2013.
- [5] 田中成典, 窪田諭, 中村健二: 社会基盤施設を対象とした汎用 3 次元 CAD エンジンの開発と適用, 日本知能情報ファジィ学会, 知能と情報, Vol.28, No.5, pp.775-790, 2016.
- [6] 国土地理院: UAV を用いた公共測量マニュアル (案), 2017.
- [7] 国土地理院: 地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル (案), 2017.
- [8] 国土交通省東北地方整備局: UAV による河川調査・管理への活用の手引き (案), 2016.
- [9] 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, 日本知能情報ファジィ学会, Vol.27, No.5, pp.796-812, 2015.
- [10] 国土交通省: 3 次元データ利活用方針, 2017.
- [11] 国土交通省: i-Construction 新たに導入する 15 の基準及び積算基準について, 入手先 <<http://www.mlit.go.jp/common/001137294.pdf>> (参照 2018.5.25).
- [12] 近藤弘嗣, 森川博邦, 藤島崇, 椎葉祐士: i-Construction における UAV を用いた土工出来形管理の基準類の策定及びカイゼン, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.73, No.2, pp.I\_74-I\_82, 2017.
- [13] 国土交通省: ICT 土工事例集, < [http://www.mlit.go.jp/tec/tec\\_tk\\_000028.html](http://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000028.html)>, (入手 2018.5.25).
- [14] 窪田諭, 中村健二, 重高浩一, 今井龍一, 櫻井淳: 地形を対象とした 3 次元製図基準に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.70, No.2, pp. I I\_27-II\_34, 2015.
- [15] 窪田諭, 中村健二, 重高浩一, 今井龍一, 櫻井淳: 3 次元地形モデルを対象とした描画ガイドラインの提案, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.71, No.2, pp.II\_50-II\_57, 2016.
- [16] 田中成典, 中村健二, 今井龍一, 窪田諭, 近藤弘嗣, 櫻井淳: 3 次元ポリラインを用いた基本設計データ生成システムの開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.71, No.2, pp.I\_134-I\_141, 2016.

- [17] 田中成典, 窪田諭, 今井龍一, 中村健二, 山本雄平, 寺口敏生, 櫻井淳: レーザスキャナ搭載 UAV 開発のための点群データ計測の利用場面と解析・処理技術に関する調査研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.71, No.2, pp.II\_82-II\_89, 2017.
- [18] 田中成典, 窪田諭, 櫻井淳, 長谷川裕之, 森田智幸, 安井嘉文: 数値地形図データと SXF データの相互変換システムの実装と検証, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.71, No.2, pp.II\_55-II\_64, 2017.
- [19] 櫻井淳, 田中成典, 中村健二, 窪田諭, 今井龍一, 重高浩一: UAV の空中写真測量による施工管理のための計測手法の提案, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.72, No.2, pp.II\_73-II\_81, 2017.
- [20] 櫻井淳, 田中成典, 中村健二, 窪田諭, 中原匡哉, 平謙二: レーザスキャナを用いた施工現場の常時観測における地表面生成技術の開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.72, No.2, pp.I\_219-I\_230, 2017.
- [21] 櫻井淳, 田中成典, 中村健二, 今井龍一, 窪田諭, 重高浩一: レーザスキャナを用いた多地点計測における高精度な点群データの選択技術の開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.72, No.2, pp.I\_209-I\_218, 2017.
- [22] 櫻井淳, 中村健二, 田中成典: 平常時と災害時における UAV 写真測量の解析パラメータの決定とその適用に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 土木学会, Vol.73, No.2, pp.I\_268-I\_278, 2018.
- [23] Tanaka, S., Nakamura, K., Imai, R., Kubota, S. and Sakurai, J. : Design Data Generation System using Three-dimensional Polyline for Progress Control of Working Form, *Civil Engineering Conference in The Asian Region CECAR 7*, ACECC, 2016.8.
- [24] 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所: マシンコントロール/マシンガイダンス技術の手引書【施工者用】, 2013.
- [25] 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所: MC・MG ブルドーザ技術の現場対応集【施工者用】, 2014.
- [26] 国土交通省国土技術政策総合研究所: TS による出来形管理に用いる施工管理データ交換標準 (案) Ver.4.1, 2013.
- [27] 国土交通省: 情報化施工推進戦略, 2013.
- [28] 国土交通省大臣官房技術調査課, 総合政策局公共事業企画調整課: 情報化施工技術の一般化・実用化の推進について, 国官技第 23 号, 国総公第 18 号, 2013.
- [29] 建山和由: 情報化施工の現状と今後の展望について, 地盤工学会誌, 地盤工学会, Vol.58, No.5, pp.6-9, 2010.
- [30] 山陽測器: 面的施工管理システム ロードランナー, <[http://www.sanyou-sokki.co.jp/NETIS/products/product\\_01.html](http://www.sanyou-sokki.co.jp/NETIS/products/product_01.html)>, (入手 2018.5.25).
- [31] 国土交通省大臣官房技術調査課, 総合政策局公共事業企画調整課: 情報化施工技術の使用原則化について, 国官技第 291 号, 国総公第 133 号, 2013.
- [32] 国土交通省: 情報化施工推進会議 (第 16 回) 資料 2 情報化施工導入実績, 2014.
- [33] 北川順, 梶田洋規, 重高浩一, 藤島崇, 椎葉裕士, 篠原雅人: 情報化施工に用いる 3 次元設計データ作成の課題分析, 土木情報学シンポジウム講演集, 土木学会, Vol.37, pp.69-72, 2012.

- [34] 山口崇：情報化施工推進戦略の状況，建設の施工企画，日本建設機械化協会，No.740，pp.4-9，2011.
- [35] 田中洋一，阿部寛之，青山憲明，今井龍一，金沢文彦：出来形管理トータルシステムで利用するサポートソフトウェアの開発，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.16，pp.137-148，2007.
- [36] 藤島崇，椎葉祐士：レーザースキャナーによる出来形・出来高管理の実現へ向けて，建設の施工企画，日本建設機械化協会，No.726，pp.74-77，2010.
- [37] 国土交通省：地上型レーザースキャナーを用いた 出来形管理要領（土工編）（案），2018.
- [38] 石渡要介，前原秀明，宮原浩二，久野徹也：オクルージョンを考慮したレーザ点群抽出に基づく看板計測アプリケーション，情報処理学会論文誌，情報処理学会，Vol.53，No.1，pp. 379-384，2012.
- [39] 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.
- [40] 中村彰宏，戸田健太郎，前中久行：地上型レーザースキャナを用いた天然記念物に指定されたソテツの形状計測，日本緑化工学会誌，日本緑化工学会，Vol.35，No.1，pp. 63-68，2009.
- [41] 関俊明，内村圭一，上瀧剛：3 次元道路データからの道路地物の認識，電子情報通信学会技術研究報告. ITS，電子情報通信学会，Vol.112，No.318，pp.57-62，2012.
- [42] 江里口貴生：レーザースキャナーによる施工管理に関する一考察，九州技報，九州地方計画協会，Vol. 45，2009.
- [43] 鹿田正昭：地上型レーザースキャナーデータ計測の標準化に関する調査研究，JACIC 研究助成報告書，第 2010-10 号，2012.
- [44] Agisoft：PhotoScan Professional Edition，<<http://www.agisoft.com/features/professional-edition/>>，（入手 2018.5.25）.
- [45] 小泉圭吾，土肥泰之，谷本親伯，上野陽平：法面変状計測を目的とした 3D レーザースキャナの精度検証，土と基礎，地盤工学会，Vol.55，No.11，pp.8-10，2017.
- [46] 竿本英貴，丸山正，近藤久雄：RBF 補間と GA を用いた LiDAR データからの地震時地表変位抽出手法の開発，土木学会，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.70，No.4，pp.I\_161-I\_168，2014.
- [47] 守岩勉，平松晋也，阿部美沙，福山泰治郎，安海高明：地上レーザによる大規模溪岸崩壊地での凍結融解による土砂生産量の計測，新砂防，砂防学会，Vol.70，No.1，pp.31-37，2017.
- [48] 渡辺豊：平成 26 年広島市豪雨災害での小型無人ヘリ被災地状況計測，写真測量とリモートセンシング，日本写真測量学会，Vol.54，No.2，pp.72-73，2015.
- [49] 国土地理院：無人航空機（UAV）を活用した国土地理院の災害対応，<<http://www.gsi.go.jp/common/000150883.pdf>>，（入手 2017.10.20）.
- [50] 宮沢公一：平成 27 年 UAV による西之島と口永良部島の撮影について－国土地理院の対応－，写真測量とリモートセンシング，日本写真測量学会，Vol.55，No.1，pp.12-16，2016.

- [51] 尾無雅実：災害時における UAV（無人航空機）の活用について，平成 29 年度近畿地方整備局研究発表会，国土交通省，No.16，2017.
- [52] 田中成典，今井龍一，中村健二，川野浩平：LP データを用いた震災前後の被害箇所  
の自動検出結果の可視化に関する研究，土木学会論文集 F3(土木情報学)，土木学会，  
Vol.68，No.2，pp.I\_197-I\_205，2013.
- [53] Petzold, B., Reiss, P. and Stossel, W. : Laser Scanning-Surveying and Mapping Agen-  
cies are Using a New Technique for the Derivation of Digital Terrain Models, ISPRS  
Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS, Vol.54, No.1 pp.95-104, 19  
99.
- [54] 横田宏行，中島保，民野孝臣：ローラー法によるフィルタリングの紹介，写真測量  
とリモートセンシング，日本写真測量学会，Vol. 45，No. 4，pp. 18-21，2006.
- [55] 都竹正志，島周平，廣田安男，滝澤昭博，稲葉伸二：TerraScan によるフィルタリン  
グの紹介，写真測量とリモートセンシング，日本写真測量学会，Vol. 45，No. 4，pp.  
22-25，2006.
- [56] Axelsson, P. : DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Model  
s, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Vol.33, pp.1  
10-117, 2000.
- [57] Hu, X. and Yuan, Y. : Deep-Learning-Based Classification for DTM Extraction from  
ALS Point Cloud, *Remote Sensing*, MDPI, Vol.8, No.9, p.730, 2016.
- [58] Szabo, G., Enyedi, P., Szabo, G., Fazekas, I., Buday, T., Kerenyi, Paladi, M., Mecser,  
N. and Szabo, S. : Preliminary Results on the Determination of Solar Energy Potent  
ial Using LiDAR Technology, *International Review of Applied Sciences and Engineeri  
ng*, Vol.6, No.1, pp.11-17, 2015.
- [59] Ladai, A. and Miller, J. : Point Cloud Generation from sUAS-Mounted iPhone Image  
ry, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Inform  
ation Sciences*, ISPRS, Vol.40, No.1, p.201, 2014.
- [60] Forlani, G. and Nardinocchi, C. : Adaptive Filtering of Aerial Laser Scan-ning Data, *I  
nternational Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information  
Sciences*, ISPRS, Vol.36, No.3/W52, pp.130-135, 2007.
- [61] Masaharu, H. and Hasegawa, H. : Three-dimensional City Modeling from Laser Scan  
ner Data by Extracting Building Polygons using Segmentation Method, *International  
Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Vol.33, No.3, pp.556-562, 2  
000.
- [62] Sithole, G. and Vosselman, G. : Filtering of Airborne Laser Scanner Data Based on  
Segmented Point Clouds, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensi  
ng and Spatial Information Sciences*, ISPRS, Vol.36, No.3/W19, pp.66-71, 2005.
- [63] Belgiu, M., Tomljenovic, I., Lampoltshammer, T., Blaschke, T. and Hofle, B. : Ontolo  
gy-Based Classification of Building Types Detected from Airborne Laser Scanning Da  
ta, *Remote Sensing*, MDPI, Vol.6, No.2, pp.1347-1366, 2014.
- [64] 横山大：地上据置型レーザスキャナを用いた地形計測のためのフィルタリング手法  
に関する研究，写真測量とリモートセンシング，日本写真測量学会，Vol. 43，No. 3，  
pp. 22-29，2004.
- [65] 横山大：地上据置型レーザスキャナを用いた地形計測結果からの樹木の自動除去，  
写真測量とリモートセンシング，日本写真測量学会，Vol. 54，No. 5，pp. 237-247，  
2015.

- [66] 大津慎一, 佐田達典, 田中成典: 三次元形状計測における大量点群データの処理手法, 土木情報利用技術論文集, 土木学会, Vol.16, No.0, pp.27-36, 2007.
- [67] Point Cloud Library, <<http://pointclouds.org/>>, (入手 2018.5.25).
- [68] みるくる: TerraScan for MicroStation, <[http://www.mirukuru.co.jp/products/pdf/TScan\\_J151109.pdf](http://www.mirukuru.co.jp/products/pdf/TScan_J151109.pdf)>, (入手 2018.5.25).
- [69] 古屋弘: 無人飛行機を用いた地形計測と精度検証, 大林組技術研究所報, 大林組, Vol.78, pp.1-8, 2014.
- [70] 早坂寿人, 大野裕幸, 大塚力, 関谷洋史, 瀧繁幸: UAV による空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証, 国土地理院時報, 国土交通省国土地理院, Vol.127, pp.107-116, 2015.
- [71] 近津博文, 小高明彦, 柳秀治, 横山大: UAV 写真測量における三次元モデリングソフトウェアの性能評価, 写真測量とリモートセンシング, 日本写真測量学会, Vol.55, No.2, pp.117-127, 2016.
- [72] GoPro: GoPro HERO3 Black Edition, <<https://jp.gopro.com/update/hero3>>, (入手 2018.5.25).
- [73] ソニー: デジタル一眼カメラ  $\alpha$  6000, <<https://www.sony.jp/ichigan/products/ILCE-6000/>>, (入手 2018.5.25).
- [74] アミューズワンセルフ: GCSv5, <<http://amuse-oneself.com/service/gcs>>, (入手 2018.5.25).
- [75] 国土地理院: 地理院地図, <<https://maps.gsi.go.jp/>>, (入手 2018.5.25).
- [76] LandXML.org: LandXML-1.2Doc, <<http://www.landxml.org/schema/LandXML-1.2/documentation/LandXML-1.2Doc.html>>, (入手 2018.5.25).
- [77] 国土交通省国土技術政策総合研究所: 道路中心線形データ交換標準 (案) 基本道路中心線形編 Ver.1.1, 2013.
- [78] Ester, M., Kriegel, H., Sander, J. and Xu, X.: A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery*, KDD, pp.226-231, 1996.
- [79] 田中成典, 今井龍一, 中村健二, 川野浩平: 点群座標データを用いた 3 次元モデルの自動生成に関する研究, 知能と情報, 日本知能情報ファジィ学会, Vol.23, No.4, pp.572-590, 2011.
- [80] Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE, Vol.22, No.11, pp.1330-1334, 2000.
- [81] 土木研究センター: 土木用語解説, <[http://www.pwrc.or.jp/yougo\\_g/pdf\\_g/y1507-P055-055.pdf](http://www.pwrc.or.jp/yougo_g/pdf_g/y1507-P055-055.pdf)>, (入手 2018.5.25).

## 参考文献



## 謝辞

本論文を取りまとめるにあたり，御多忙の中，終始一貫して，暖かく懇切丁寧な御指導御鞭撻，またすばらしく充実した研究環境を賜りました．そして，研究全般に渡り，明確な方向付けまでして頂きました関西大学総合情報学部総合情報学科 田中成典教授に心より感謝の意を表しますと共に厚く御礼申し上げます．

また，大阪経済大学情報社会学部 中村健二教授，東京都市大学工学部 今井龍一准教授，関西大学環境都市工学部 窪田諭准教授には，終始一貫した研究への御理解ならびに貴重な御助言を賜りました．ここに謹んで感謝の意を表します．

本論文の研究を遂行するにあたり，関西大学総合情報学部総合情報学科 伊藤俊秀教授，井上真二准教授，竹中要一教授，辻光宏教授，吉田宣章教授からは，終始多大なご協力とご支援を賜りました．深く感謝する次第であります．

第 3 章の研究を遂行するにあたり，元 国土交通省国土技術政策総合研究所 近藤弘嗣氏にご協力賜りました．第 4 章の研究を遂行するにあたり，関西大学大学院総合情報学研究科 中原匡哉氏（博士課程 1 年），三菱電機エンジニアリング（株） 平謙二氏にご協力賜りました．第 5 章と第 6 章の研究を遂行するにあたり，元 国土交通省国土技術政策総合研究所 重高浩一氏にご協力賜りました．ここに記して感謝の意を表します．

最後に，勉学への意欲に対して深い理解と協力を頂いた父（櫻井雄紀），母（櫻井雅代）に感謝するとともに，末永く健康であることを切に願っております．

謝辭