

コンクリート建物に対する UAV 搭載型レーザスキャナによる 効果的な計測法の提案と評価

富永泰正¹ 碓崎賢一² 荒木俊輔³ 向井智久⁴

概要: 地上型レーザスキャナ (TLS) は高密度かつ高精度な計測を行うことができるため、地震により被害を受けた建築物の損傷調査への利用が期待されている。一方で、計測の特性上、地上の障害物による計測欠損の発生や、高層建築物の上層階を計測困難といった問題が発生する。そこで、飛行しながら計測を行うため、これらの問題を回避可能な UAV 搭載型レーザスキャナが注目されている。しかしながら、一般的な UAV 三次元計測法にはレーザスキャナの計測平面と計測対象建物の柱や壁の側面の位置関係からそれらを原理的に計測できないという問題がある。本稿ではこの問題を解決できる UAV 三次元計測法を提案し、得られた三次元点群を評価することで提案計測法の有効性を示した。

キーワード: UAV, 3次元計測法, 三次元点群

Proposal and Evaluation of an Effective UAV-Mounted Laser Scanner Measurement Method for Concrete Buildings

Yasumasa TOMINAGA^{†1} Ken'ichi KAKIZAKI^{†2}
Shunsuke ARAKI^{†3} Tomohisa MUKAI^{†4}

Abstract: Terrestrial Laser Scanners (TLS) are expected to be used to investigate damaged buildings by earthquakes because of the capability of high-density, high-precision measurements. However, it is challenging to use the TLS to measure the upper floors of high-rise buildings due to the occlusion. Laser scanners mounted on drones can avoid these problems by taking measurements in flight. However, the problem with the UAV 3D measurement methods is that the columns of the wall of the building under test cannot be measured due to the position of the laser scanner's measurement plane in relation to the sides of the building. This paper proposes a UAV 3D measurement method that can solve this problem and illustrates the effectiveness of the proposed method by evaluating the 3D point clouds obtained.

Keywords: UAV, 3D measurement method, 3D point clouds

1. はじめに

1.1 研究背景

建築物に被害を与える規模の地震が発生した場合、二次災害の防止や速やかな復興に向けて被災建築物の損傷調査が行われる[1]。調査は目視を中心として行われるため、二次災害の危険があるほか、高所等、目視では確認困難な箇所も存在する。

これらの問題を解決するため、我々はレーザスキャナにより取得される三次元点群に着目した。レーザスキャナは計測対象から離れた位置より、網羅的かつ非接触で計測を行うため、目視よりも安全に調査可能である。特に、地上型レーザスキャナは計測対象表面を高精度・高密度に計

測できるため、我々は地上型レーザスキャナにより取得された三次元点群を利用した建物の損傷調査について研究を行っている[2][3]。

一方で、地上型レーザスキャナは地上から計測を行うという特性上、いくつかの問題が発生する。

そこで、地上型レーザスキャナで生じる問題を回避可能な UAV 搭載型レーザスキャナによる計測が注目されている。しかしながら、UAV 搭載型レーザスキャナは土木分野における利用が主流であり、一般的な UAV 三次元計測法では、建物壁面や柱の側面を原理的に計測できないという問題がある。

1.2 研究目的

本稿では、一般的な UAV 三次元計測法では計測できな

1 九州工業大学情報工学府情報創成工学専攻
Graduate School of Computer Science and Systems Engineering,
Kyushu Institute of Technology

2 九州工業大学大学院情報工学研究院 教授・博士 (工学)
Prof., Graduate School of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology, Dr. Eng.

3 九州工業大学大学院情報工学研究院 准教授・博士 (情報工学)
Assoc. Prof., Graduate School of Computer Science and Systems Engineering,
Kyushu Institute of Technology, Dr. Info. Eng.

4 国土交通省国土技術政策総合研究所
Building department, NILIM, Ministry of Land, Infrastructure,
Transport and Tourism(MLIT)

い壁や柱の側面を計測可能とする UAV 三次元計測法を提案する。そして、一般的な UAV 三次元計測法と提案 UAV 三次元計測法により取得された三次元点群を比較し、提案 UAV 三次元計測法の有効性を確認することを目的とした。

2. 地上型レーザスキャナで生じる問題

2.1 地上の障害物による計測欠損

計測対象とレーザスキャナとの間に樹木などの障害物がある場合、障害物によって光学遮蔽された部分は三次元点群が欠損してしまう。

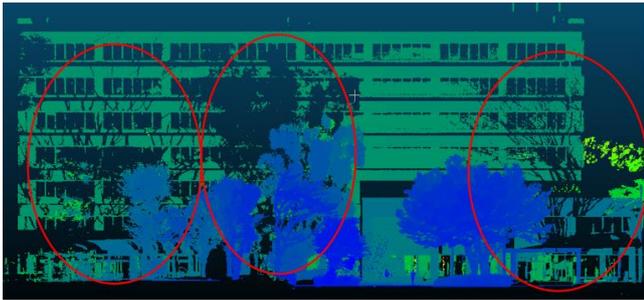


図 1 光学遮蔽により生じた計測欠損

図 1 では、地上型レーザスキャナにより取得された三次元点群を奥行方向で色付けして表示している。手前にあるものほど青色、奥にあるものほど赤色になるよう色付けされている。手前にある樹木の枝や葉によってレーザが遮られ、建物壁面に計測欠損が発生していることが確認できる。

また、図 2 のように欠損部位の周辺はマルチリターンとなり、シングルリターンよりも計測誤差が大きくなることが報告されている[4]。

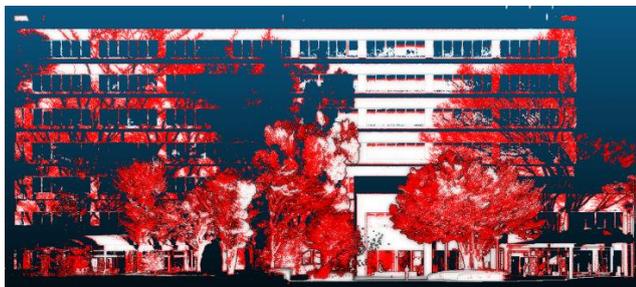


図 2 マルチリターン (赤色)

2.2 高層建築物の上層階における計測不可能な部位

地上型レーザスキャナは地上からレーザを照射するため、高層建築物にベランダなどの張り出しがある場合、張り出しにレーザが遮られ、上層階の柱や壁面は計測できないという問題が生じる。

2.3 取得三次元点群に生じる鉛直方向の疎密

レーザスキャナは計測時、鉛直方向に一定の速度で回転しながら、一定の間隔でレーザを照射する。そのため、レーザスキャナと計測対象の距離が遠い場合はレーザスキャナとの距離が近い場合よりも、取得された三次元点群の鉛直方向の点密度が低くなる。したがって、高層建築物を計測する場合、高層階と下層階で取得された三次元点群に疎

密が発生するという問題が生じる。

2.4 取得三次元点群に生じる水平方向の疎密

レーザスキャナは計測時、鉛直方向に加えて水平方向にも一定方向で回転しながら、レーザを照射する。そのため、一計測地点からの計測の場合、計測対象物とレーザスキャナの距離が遠い部分は近い部分よりも取得された三次元点群の水平方向の点密度が低くなるという問題が生じる。この問題を解決するには複数地点からの計測を行い、得られた点群データを複合させる必要がある。

3. UAV 搭載型レーザスキャナによる計測

3.1 UAV 搭載型レーザスキャナ

UAV(Unmanned Aerial Vehicle)とは、無人航空機のことである。計測に用いられる UAV にはレーザスキャナの他、GNSS 受信機(衛星測位システム)、IMU 装置(慣性計測装置)が搭載されている。



図 3 計測に用いられる UAV

GNSS 受信機と IMU 装置ではそれぞれ UAV の位置 (X, Y, Z) と姿勢 (ω, ϕ, κ) の情報を取得できる。レーザスキャナが回転することで、UAV の進行方向に対して垂直な方向にレーザを照射し、レーザの照射方向と計測対象までの距離 (D) を計測する。取得した UAV の位置と姿勢、レーザスキャナにより得られたレーザ測距データ (D) 、ミラー回転角(レーザの走査角度 θ)を用いて、計測点の三次元座標 (x, y, z) を算出することができる。

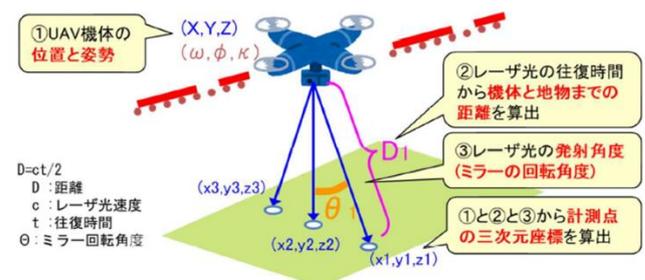


図 4 UAV による計測点の三次元座標算出表[5]

UAV 搭載型レーザスキャナは 2 章で述べた地上型レー

ザスキャナによる計測で生じる問題を以下のように回避することが可能なことから、近年注目されている。

- 地上の障害物による計測欠損
上空から計測を行うため、発生しにくい。
- 高層建築物の上層階における計測不可能な部位
計測高度を変更することで、計測可能である。
- 取得三次元点群に生じる鉛直方向の疎密
計測高度を変更しながら計測することで回避可能である。
- 取得三次元点群に生じる水平方向の疎密
地上型レーザスキャナのように設置地点から放射状にレーザを照射するのではなく、移動しながらレーザを照射するため発生しない。

しかしながら、現在、UAV 搭載型レーザスキャナは地物の計測に用いられることが一般的であり、建築物の計測に適した計測法が存在しない。次節では一般的な UAV 三次元計測法で建築物を計測した際に発生する問題について述べる。

3.2 一般的な UAV 三次元計測法で生じる問題

一般的な UAV 三次元計測法では、地物を漏れなく計測するため航路同士は平行で、コース間重複度が設定される。

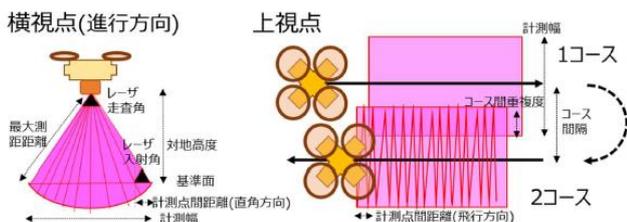


図 5 一般的な UAV 三次元計測法[5]

そのため、建築物の計測を行う際も同様の発想で航路が設定される。

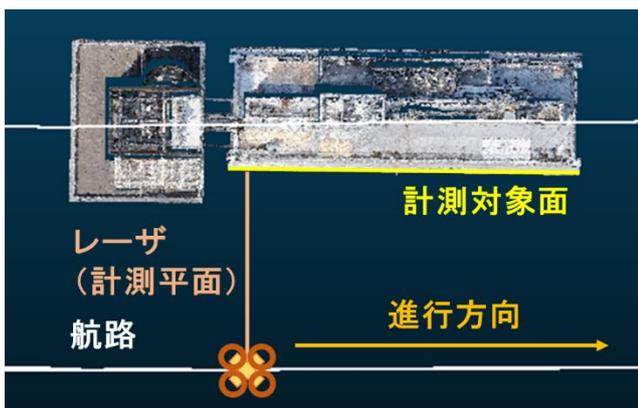


図 6 一般的な UAV 三次元計測法による建築物の計測
このとき、柱や壁の側面とレーザの放射状照射平面（計測平面）の位置関係により、原理的に壁や柱の側面を計測できないという問題が発生する。

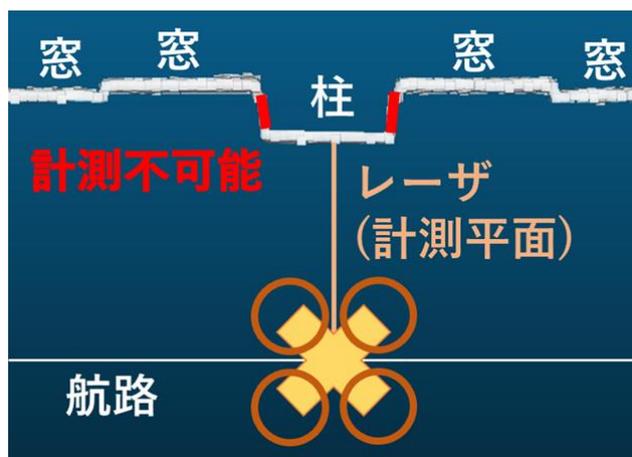


図 7 柱や壁の側面を計測不可能な状況

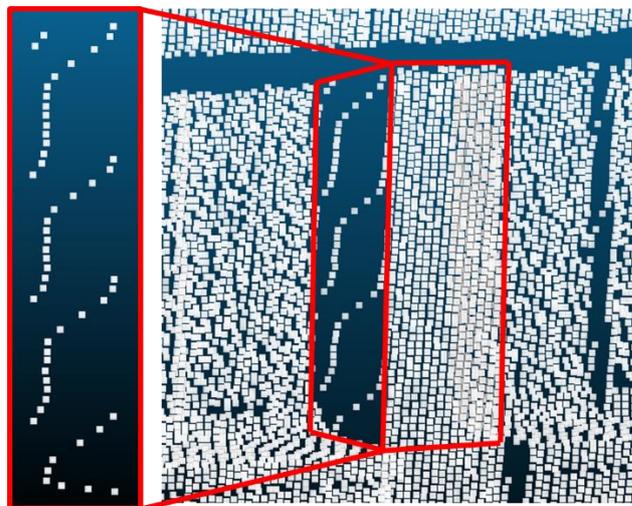


図 8 一般的な UAV 三次元計測法で計測された柱側面

4. 効果的な UAV 三次元計測法の提案

一般的な UAV 三次元計測法で柱や壁の側面を計測できないのは計測平面とそれらの位置関係が原因であった。そこで、我々は計測対象面に対して計測平面を傾斜させることで柱や壁の側面を計測できるようになると考えた。

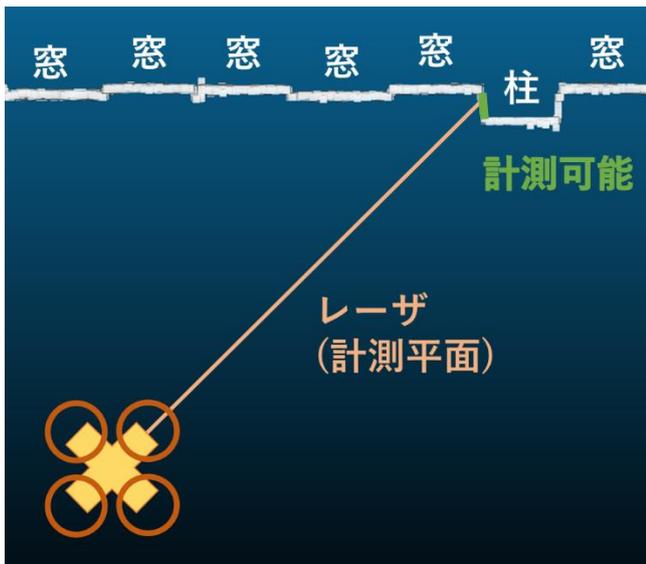


図 9 柱や壁の側面を計測可能とする方法
 計測平面の傾斜を実現する方法として、我々は

- ① レーザ計測機傾斜方式
 - ② 対角傾斜方式
- の2つを考案した。

計測を担当する企業に対し、①の方式での計測を依頼したが、当初、実績がなく計測データの処理法も不明であるため実施できないという回答があった。最終的には①の方式による計測を行えたが、そのような事情からレーザスキャナの計測平面を傾けるもう一つの方法として②の方式を考えた。

4.1 レーザ計測機傾斜方式

計測航路は一般的な UAV 三次元計測法と同様に計測対象面と平行にする一方で、UAV に搭載するレーザスキャナの取り付け姿勢を変更することによって、レーザスキャナの計測平面を計測対象面に対して傾斜させる計測方式である。計測対象の正面と側面を均一な点密度で計測するため、計測平面は 45° 、 135° 方向に傾斜させる。

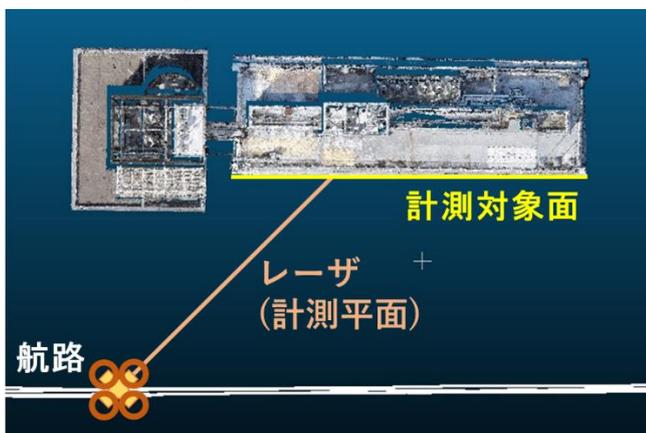


図 10 レーザ計測機傾斜方式の概念

4.2 対角傾斜方式

UAV の航路を計測対象建物の対角方向に設定することで、レーザスキャナの計測平面を計測対象面に対して傾斜

させる計測方式である。レーザ計測機傾斜方式の場合同様、計測対象の正面と側面を均一な点密度で計測するため、計測平面は 45° 、 135° 方向に傾斜させる。

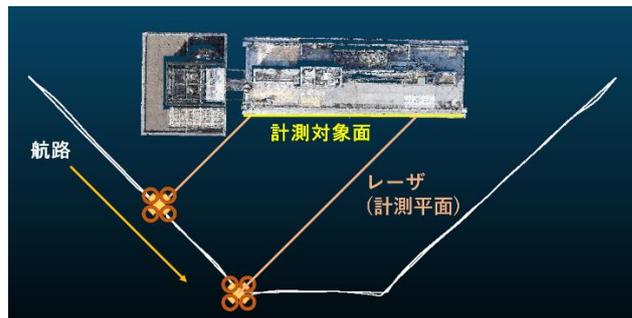


図 11 対角傾斜方式の概念

5. 実験と評価

5.1 計測対象建物

本研究の計測対象建物は、国立研究開発法人建築研究所の本館と新館である。地上型レーザスキャナによる計測と UAV 搭載型レーザスキャナによる計測（一般的な UAV 三次元計測法、レーザ計測機傾斜方式、対角傾斜方式）を行った。

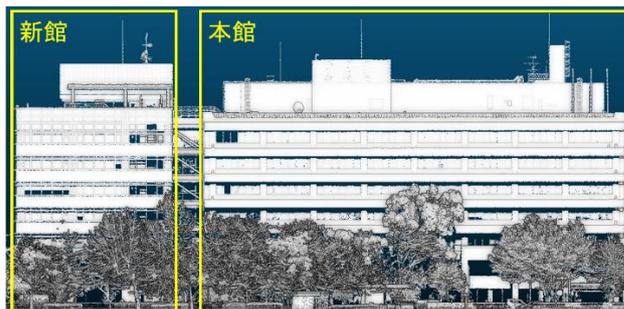


図 12 建築研究所本館と新館の外観

また、評価は以下の図に赤色で示す柱を対象に行った。

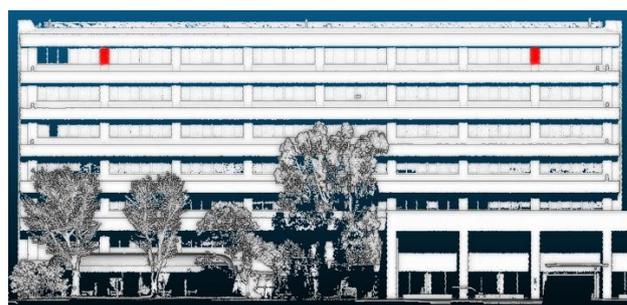


図 13 評価対象とした柱（赤色）

5.2 計測諸元

以下に各方式の計測諸元を示す。

表 1 各方式の計測諸元

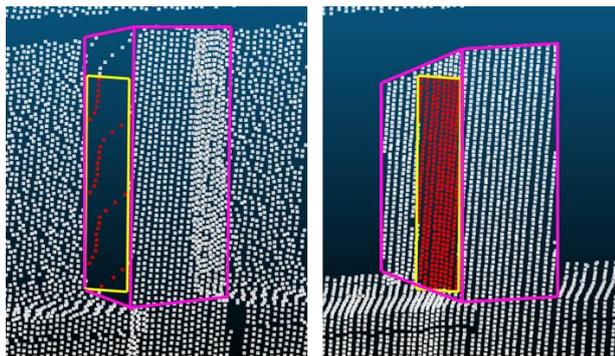
	計測対象面に対するレーザの照射角度	UAVの航行速度	計測高度
一般方式	90°	15km/h	30m
対角傾斜方式	45° 135°	10km/h	35m
レーザ計測機傾斜方式	45° 135°	15km/h	40m

一般的な UAV 三次元計測法で計測が行われた際の高度が最も理想的であったが、UAV と樹木の距離が近かったため、接触しないように徐々に計測高度を高くしている。そのため、提案計測方式は一般的な計測方式よりも計測条件が悪化していることに留意する必要がある。

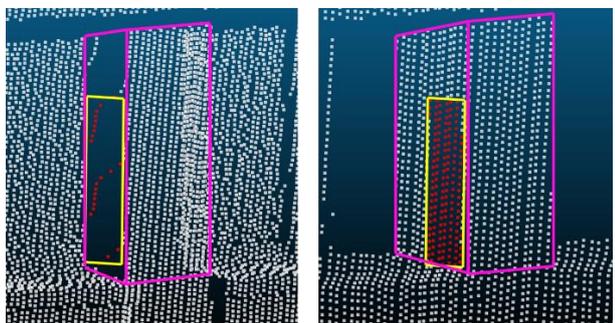
5.3 一般的な UAV 三次元計測法との比較

5.3.1 一般方式と対角傾斜方式との比較

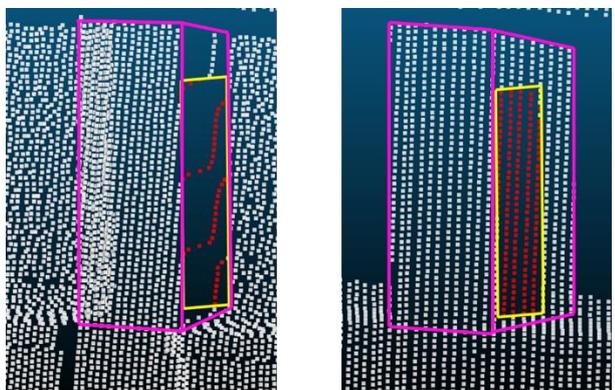
一般的な UAV 三次元計測法と対角傾斜方式により計測された柱の三次元点群を示す。ピンク色の枠線は柱の形状を表しており、黄色の枠線は柱側面の点密度を比較した領域を表している。柱側面を比較した領域は一般方式と対角傾斜方式で同じ大きさである。



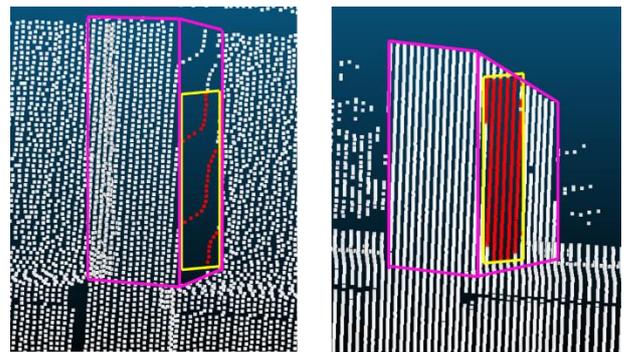
(a) 一般方式 (b) 対角傾斜方式
図 14 左の柱の計測結果 (45° 方向)



(a) 一般方式 (b) 対角傾斜方式
図 15 右の柱の計測結果 (45° 方向)



(a) 一般方式 (b) 対角傾斜方式
図 16 左の柱の計測結果 (135° 方向)



(a) 一般方式 (b) 対角傾斜方式

図 17 右の柱の計測結果 (135° 方向)

これらの結果から、一般的な UAV 三次元計測法では原理的に計測できなかった柱の側面を対角傾斜方式では面として認識できるほど高密度に計測できることが確認できた。また、柱正面と柱側面から同一面積の領域を切り取り、領域内の柱正面と柱側面の密度を比較した。

表 2 一般方式による柱正面と左側面の計測結果

柱の位置	正面	側面	正面:側面
左	128点	18点	1:0.14
右	131点	12点	1:0.092

表 3 対角傾斜方式による柱正面と左側面の計測結果

柱の位置	正面	側面	正面:側面
左	149点	146点	1:0.98
右	78点	66点	1:0.85

表 4 一般方式による柱正面と右側面の計測結果

柱の位置	正面	側面	正面:側面
左	128点	5点	1:0.039
右	208点	20点	1:0.096

表 5 対角傾斜方式による柱正面と右側面の計測結果

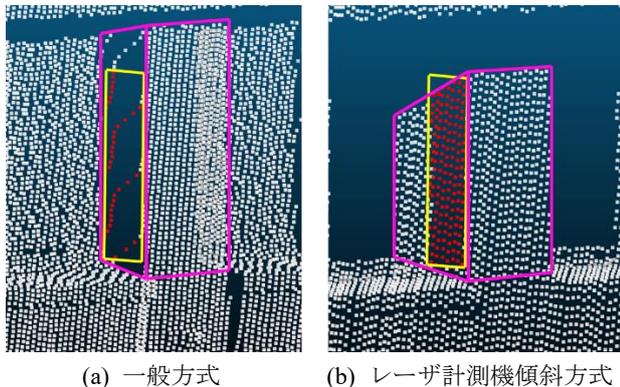
柱の位置	正面	側面	正面:側面
左	91点	68点	1:0.75
右	208点	169点	1:0.81

一般的な UAV 三次元計測法は柱正面と柱側面の点密度比が 1:0.15 未満でありほぼ柱側面を計測できていないのに対し、対角傾斜方式は柱正面と側面の点密度が 1:0.7 以上であり、柱正面と柱側面をほぼ同じ点密度で計測できることが確認できた。しかしながら、対角傾斜方式は航路上の位置により、計測対象と UAV の距離が変化するため、得られる三次元点群に疎密が発生することが分かった。したがって、対角傾斜方式は点群の疎密が問題にならない場合に

適している計測法であるといえる。

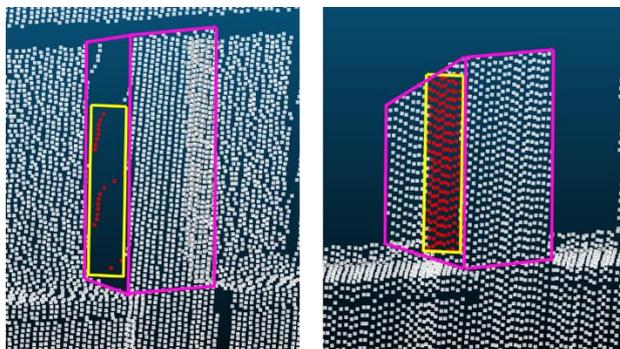
5.3.2 一般方式とレーザ計測機傾斜方式の比較

レーザ計測機傾斜方式も同様に計測実験を行った。計測された柱の三次元点群を示す。



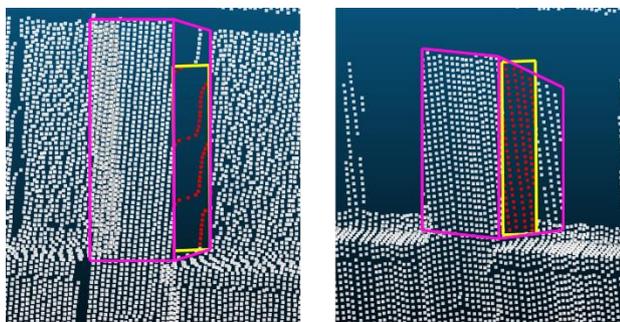
(a) 一般方式 (b) レーザ計測機傾斜方式

図 18 左の柱の計測結果 (45° 方向)



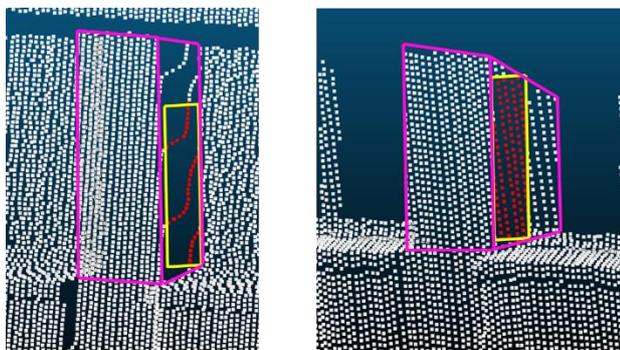
(a) 一般方式 (b) レーザ計測機傾斜方式

図 19 右の柱の計測結果 (45° 方向)



(a) 一般方式 (b) レーザ計測機傾斜方式

図 20 左の柱の計測結果 (135° 方向)



(a) 一般方式 (b) レーザ計測機傾斜方式

図 21 右の柱の計測結果 (135° 方向)

これらの結果から、一般的な UAV 三次元計測法では原理的に計測できなかった柱の側面をレーザ傾斜方式では面として認識できるほど高密度に計測できることが確認できた。また、対角傾斜方式の場合と同様に、柱正面と柱側面の密度を比較した。

表 6 一般方式による柱正面と左側面の計測結果

柱の位置	正面	側面	正面:側面
左	128点	18点	1:0.14
右	131点	12点	1:0.092

表 7 レーザ計測機傾斜方式による柱正面と左側面の計測結果

柱の位置	正面	側面	正面:側面
左	91点	96点	1:1.1
右	106点	111点	1:1.05

表 8 一般方式による柱正面と右側面の計測結果

柱の位置	正面	側面	正面:側面
左	128点	5点	1:0.039
右	208点	20点	1:0.096

表 9 レーザ計測機傾斜方式による柱正面と右側面の計測結果

柱の位置	正面	側面	正面:側面
左	95点	56点	1:0.59
右	94点	63点	1:0.67

計測位置による密度差は発生しないことが確認できた。

おわりに

本稿ではこの問題を解決できる UAV 三次元計測法を提案し、得られた三次元点群を評価することで提案計測法の有効性を示した。

謝辞

本研究は、建築研究所との共同研究「3次元データを用いた地震後の損傷評価手法の構築に関する基礎的検討」で得られたデータを基に実施している。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- [1] 内閣府, “災害に係る住家の被害認定基準運用指針,”
- [2] 碓崎, 向井, 荒木, “高密度計測による計測値の真値推定と二時期の計測データの差分算出による高精度三次元レーザー計測法,” 日本建築学会技術報告集 28 巻 68 号, pp.515-520, 2022.
- [3] 平河, 曾, 荒木, 碓崎, 向井, 石井, “大地震により損傷した

鉄筋コンクリート造建築物の三次元点群データによる壁面損傷性状評価手法に関する研究,” 第 26 回 GISA 学術研究発表大会, pp. B-5-3, 2017.

- [4] 轟, 北山, 碓崎, 荒木, 向井, “マルチリターン LiDAR で計測された三次元点群の計測精度に関する研究,” 2019 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会 (第 72 回連合大会) 講演論文集, pp. 200-201, 2019.
- [5] 国土交通省国土地理院, “UAV 搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル (案),” 2020/3.
- [6] 新発田, “地上型レーザスキャナの特性,” 著: 写真測量とリモートセンシング 52 (6), 2013, pp. 285-288.
- [7] RIEGL JAPAN, “レーザスキャナーとは | 高性能・精細なレーザ測量計 リーグルジャパン,” <http://www.riegl-japan.co.jp/about/>. アクセス日: 2023/2/17.
- [8] 三島, 碓崎, 荒木, 向井, “三次元点群を用いたコンクリートの表面性状分析手法による被災した建物の損傷分析,” 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, pp. 196-197, 2019.