

研究終了報告書

「測域センサを搭載した複数 UAV による共通 IoT センシング基盤」

研究期間: 2020 年 11 月～2024 年 3 月

研究者: 廣森 聡仁

1. 研究のねらい

個々の IoT サービスがビジネスとして成り立つ都市部と異なり、地方においては、利用者が少ないだけでなく、より広範囲のエリアをカバーすることが求められるため、都市部でのノウハウをそのまま活用できるわけではない。また、都市部とは異なる需要も存在し、そのような要望に対し、地方自治体が独自に新規の投資を行うことは財政的に容易でない。必要不可欠なインフラとして、山間部や農村部の集落にも電話線が等しく敷設されており、IoT も未来の情報インフラとしてあらゆる場所での展開が望まれる。しかしながら、利用者の規模によりスケール可能で、用途に応じてセンサを使い分け、また、設置することが可能な都市部と同じような形で、山間部や農村部を有する地方自治体における IoT 基盤を維持することは困難であり、異なる用途に対しても共通化されたセンシング基盤が求められる。

本取組では、街の日常的な状況を把握するだけでなく、災害の被害状況や規模を迅速に把握するために、測域センサを搭載した複数の UAV が協調することにより、対象とする領域を効率よく巡回するための巡回戦略、測域センサにより計測された点群データを UAV に搭載された小型計算機上のみで形状把握する手法を考案し、街中における様々な人やモノの存在及びその形状を、高精度な三次元マップとして把握可能なセンシング基盤を構築する。

2. 研究成果

(1) 概要

a) 疎な点群に対する構造物推定手法

本取組では、高速に移動するドローンに搭載された、対象物までの距離を計測する LiDAR センサから得られた、疎な三次元点群データに基づき、対象物の大まかな三次元形状を復元する。ドローンが移動中に得られた三次元点群の密度は、ドローンの移動速度、LiDAR の観測周波数、LiDAR から対象物までの距離、LiDAR の分解能に依存する。対象領域全体を短時間で計測できるよう、ドローンが高速に移動する際には、観測周期毎の移動距離が大きくなるため、得られる点群の密度は低下する。このような疎な点群から、対象物の存在を把握するとともに、対象物を多角柱であると仮定することで、柱の部分を推定し、構造物の大まかな形状を復元する。実験では、一般的な一軒家サイズの対象物に対する三次元点群データを取得し、柱の平均頂点誤差を計測し、平均誤差は 20cm 以下で対象物の大まかな形状を把握できること、多角柱を対象とした評価では、40cm 以下の精度でその形状を推定できることを示した。また、ZENRIN が公開している秋葉原の 3D 都市モデルデータを使用して、都市部の構造物の特性を調査し、多くの建築構造物が幾何学的特性を満たすことを示した。IoU と高さの誤差を評価指標として導入し、復元された構造物の精度を評価した結果、60 度の観測角度でも半分以上の構造物を復元できること、150 度の角度範囲では約 70% の構造物を復元できることを示した。

b) 不完全な点群に基づく建物構造異常検知手法

本取組では、災害直後の被害軽減の一環として、LiDAR を搭載した UAV を用いて、複数の建物から得られる 3D 点群データを分析し、建物構造を迅速に把握する手法を提案した。この手法では、Fisher Vector と Normal Histogram の二つ特徴量を用いて建物構造の違いを把握し、ランダムフォレストを使用して倒壊建物を検出する。評価実験では、ZENRIN が公開する 3D 都市モデルデータを使用し、3D モデリングソフト Blender と Unity を用いて擬似的な倒壊をシミュレートした結果は、Fisher Vector と Normal Histogram の両方で ROC-AUC が 0.99 以上となり、高い精度で崩壊の程度を判定できることを示した。

c) 都市部に散乱する火山灰センシング

火山灰は小規模な噴火でも広範囲に拡散し、目や気管に害を及ぼすほか、土壌や河川にも影響を与える。現在、地表に降り積もった火山灰の状況は、主に人手による直接回収での把握となっており、本研究では、無線通信に基づくリモートセンシングにより、火山灰散乱状況を推定する方法を提案する。火山灰に含まれる金属成分によって反射波が拡散する特性を利用し、地表面に電波を照射する簡易的な実験を実施し、その結果、反射波のデータから火山灰の存在を 98% の精度で推定する深層学習モデルを構築した。

(2) 詳細

a) 疎な点群に対する構造物推定手法

本取組においては、高速に移動するドローンに搭載された、対象物までの距離を計測する LiDAR センサから得られた、疎な三次元点群データに基づき、対象物の大まかな三次元形状を復元する。ドローンが移動中に得られた三次元点群の密度は、ドローンの移動速度、LiDAR の観測周波数、LiDAR から対象物までの距離、LiDAR の分解能に依存する。対象領域全体を短時間で計測できるよう、ドローンが高速に移動する際には、観測周期毎の移動距離が大きくなるため、得られる点群の密度は低下する。このような疎な点群から、対象物の存在を把握するとともに、対象物を多角柱であると仮定することで、柱の部分を推定し、構造物の大まかな形状を復元する。直線移動のように、制限された動きから、対象物を観測する際には、対象物全体を観測できるわけではなく、構造物を構成する柱の一部のみが点群に示されることとなる。提案手法では、観測によって得られた点群から柱の存在を把握するとともに、構造物の特性に基づき、点群に含まれなかった柱を推定する。点群から、対象物の二つの面を把握できる場合には、一本の柱のみを推定することができ、一方、対象物の三つの面を把握できる場合には、二本の柱を推定することができる。対象物の柱は概ね鉛直方向に直線状になっているものと仮定し、対象物を地表面に投影することで、柱の存在を把握する。二次元投影された点群に対し、RANSAC (RANdom SAmple Consensus) を用いて線分を検出し、線分が交差する点を柱として推定する。RANSAC により導出された二つの線分の端点が近い位置にあり、また、それらの線分が 90 度に近い形で交差している場合、線分が交差している位置を柱として推定する。点群から柱が一本しか推定できなかった場合、その対象物の形状を直方体であると仮定し、直方体の図形的性質である点対称を用いて、残りの三本の柱の位置を推定する。柱が一本認識されているということは、線分が二本以上推定されていることを意味する。柱を構成する二本の線分について、柱ではない方の端点をそれぞれ柱とし、直方体の点対称という図形的性質を用いて、四本目の柱の位置を推定することで、直方体全体の構造を推定する。同様に、点群から二本以上の柱を推定できた場合においても、多角柱を構成される全ての柱を点群から推定できるものではなく、観測できている部分の情報をもとに推定によって柱の位置を推定する。この場合、検出された線分のうち片方の端点のみが柱として認識されているものに対し、多角柱を構成する辺同士は 90 度の角度を成すものとし、この内の一本の線分に直交するように面が存在するものとする。そのため、ひとつの柱は線分の端点となり、別の線分については、その線分を伸ばし、面と交差する部分を柱とすることで、二つの柱を推定する。最終的に、構造物を三次元化する際には、最も近傍にある二本の柱同士を結合することにより、面を算出する。図 1 にこれまでの一連の処理を適応し、得られた構造物の一例を示す。

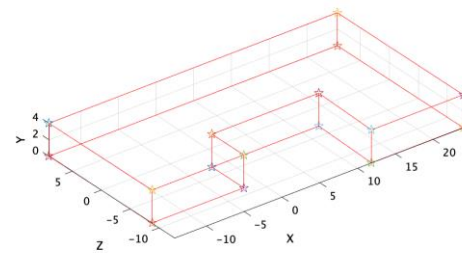


図 1 三次元復元により得られた構造物の例

提案する推定手法を評価するため、ゲーム開発ツール Unity 上に、一般的な一軒家の大きさを対象とした、幅 12m、奥行き 8m、高さ 10m の対象物を配置し、仮想空間上におけるシミュレーション上で、この対象物に対する三次元点群データを取得し、柱の平均頂点誤差を計測した。その際、観測者の移動速度は 40km/h、LiDAR の観測周波数は 20Hz、LiDAR の分解能を 1 度にて、対象物を計測した。この点群の密度は、60 点/m² となっている。対象物に対し、様々な方向から 70 回、観測者を直線移動させ、対象物の柱を推定して得られた直方体の各頂点の平均誤差の分布を、図 2 に示す。柱の存在を一本だけ直接把握できており、残りの三本の柱は、提案手法により推定されている。この図に示されるように、平均頂点誤差は 20 cm 以下となっており、対象物の大まかな形状を把握できていることがわかる。

同様に、シミュレーション上で得られた三次元点群を用いて、多角柱を対象とした柱推定手法を評価する。観測物が対象物に対し、直接移動した際、対象物が直方体である場合には、柱が高々二本のみ直接観測され、対象物が直方体より複雑な多角柱である可能性がある場合には、柱が三本以上直接観測される。図 3 に示すような多角柱に対し、様々な移動経路から、三次元点群を計測し、その形状を推定する。この多角柱の大きさは、幅 12m、奥行き 10m、高さ 8m の直方体と幅 6m、奥行き 4m、高さ 8m の直方体を結合させたものである。図に示されるように、この多角柱は、六本の柱から構成されるが、移動経路により、直接観測できる柱の本数は変化する。対象物に対する平均頂点誤差を図 4 に示す。この図に示されるように、疎な点群から平均頂点誤差 40cm 以下の精度で多角柱の形状を推定できることがわかる。

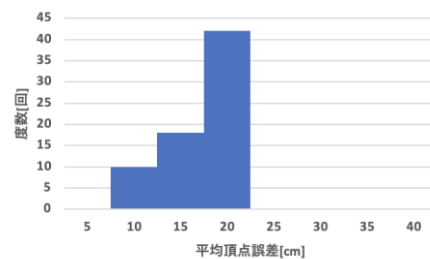


図 2 直方体に対する平均頂点誤差の分布

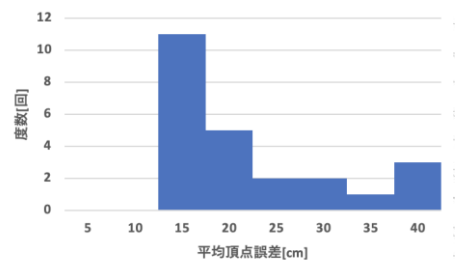


図 4 多角柱に対する平均頂点誤差の分布

図 3 多角柱の対象物

また、株式会社ZENRINが公開している秋葉原の3D都市モデルデータを対象に都市部の構造物の形状の特性を調査した。このデータセットには高さ4mのものから100mを超えるもの、敷地面積10m²から500m²以上のもの、直方体のものから複雑な形のものまで1068の構造物が含まれている。提案手法において仮定する建築構造物として幾何学的な特性の一つである、建築構造物を構成する側面同士のなす角について調査した結果、全ての角が概ね90度で構成されている建築構造物は全体の87.7%であった。また、建築構造物を地表面に対して鉛直方向に見た時、その二次元上の輪郭が高さ毎に変化しない性質を満たす構造物は全体の84.6%を占めていた。以上の調査から、これらの特性は多くの一般的な建築構造物にも共通する特性であると考えられる。

また、本取組では構造物の存在そのものとその大きさ、位置をある程度把握することが目的としており、二つの領域が重なっている程度を表し、復元した構造物と本来の構造物の違いを大まかに比較可能な、IoU (Intersection over

Union) を評価指標として導入した。このIoUは、二つの領域の共通部分面

積を和集合面積で割ったものとして計算でき、完全に一致した場合は1、全く重なっていない場合は0、同じ正方形を斜めに1/9だけずらした場合に約0.65となる。構造物の大まかな存在と位置を把握するためには、ある程度のIoUの値が必要であることから、復元が成功する基準値を0.7と設定する。また、構造物の大きさに関しては構造物の高さにも依存する。そこで本来の構造物の高さと復元によって得られた推定の高さの相対誤差も考える。この高さ誤差に関しては、20%の誤差を許容し、それを復元成功の基準値とする。図5にIoUと高さ誤差の異なる復元結果の例を示す。また、この指標に基づき、前述する都市モデルデータにおける構造物群に対する評価実験を実施し、基準値以上で構造物の構造復元が成功した割合を表1に示す。この表に示されるように、提案手法により、60度程度の狭い角度範囲で観測を行った場合においても、半分以上の構造物の構造を復元でき、また、150度の角度範囲で計測を行った際には、7割程度の構造物の三次元構造を復元できることを示した。

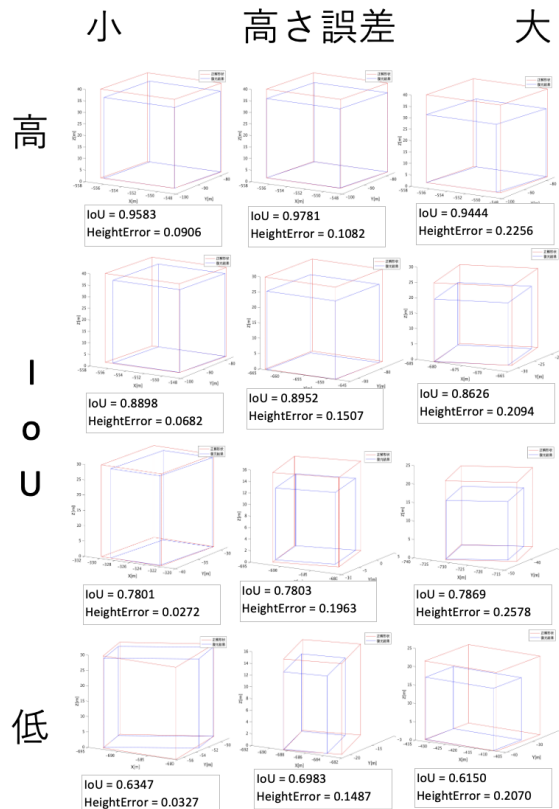


図 5 IoU と高さ誤差による復元結果の違い

表 1 復元成功割合

角度範囲	角度間隔	
	30 度	10 度
30 度	5.2%	11.0%
60 度	49.1%	59.9%
90 度	57.7%	65.2%
120 度	63.9%	67.5%
150 度	66.0%	68.5%

b) 不完全な点群に基づく建物構造異常検知手法

災害直後の被害を減らす取組の一つとして、建物の構造に着目し、建物の空間的損失割合が50%を超えるなど、崩壊する可能性が高い建物を特定することが挙げられる、これらの災害により被災した建物に対し、二次災害を防止するためだけでなく、補修の必要性や方法を判断するために、調査員により建物の内外部が調査されているが、莫大な時間や人手を必要とするものであり、また、災害直後においては、調査員自身が被災してしまうことも問題となる。近年、人工衛星画像や、UAVによって撮影された画像に基づき、より安全にかつ迅速に被災情報を収集し、これまで人手を使って行われていた現地調査を自動化しようとする試みが行われている。人工衛星画像を用いる手法では、一度に広い範囲の建物の被害を把握できる一方、主に屋根の形状に基づいて判断するため、必ずしも建物の壁面の被害を把握できるものではない。また、人工衛星が地球を周回する周期に

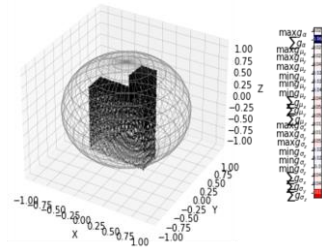


図 1 Fisher Vector

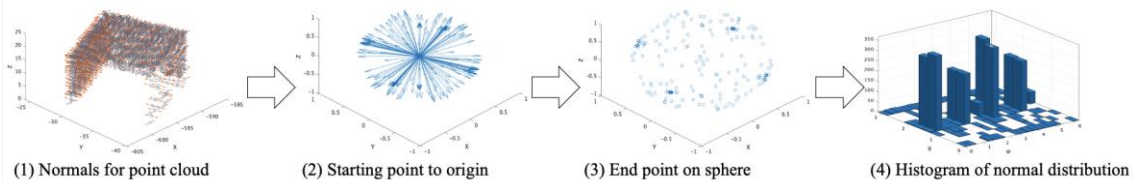


図 2 Normal Histogram

も依存するため、被災地域を即座に観測できない場合も多い。一方、UAVにより撮影された、航空斜め画像から生成される三次元点群は、建物の屋根と外壁に関わる幾何学的形状やラジオメトリック形状を得られるため、災害発生後の詳細な建物被害評価に適した情報源となっている。また、損傷による亀裂など壁面の状況も、ガボールウェーブレットと勾配方向特徴のヒストグラムにより、詳細に把握できるが、個々の建物に関する多くの画像を必要とするため、多数の建物に対する調査には多くの時間を要する。

本取組では、LiDARを搭載したUAVが、複数の建物に対する三次元点群を観測することにより、建物構造を迅速に把握可能な手法を考案した。この手法では、複数の建物をまとめて観測することで、観測に要する時間を削減することに加え、個々の建物に対し、異なる二つの特徴量を使いわけることにより、建物構造の判定処理にかかる時間を調整することができる。建物構造に関わる点群の特徴量の一つとして、三次元物体分類に用いられるFisher Vector(図1)を用い、ある建物の点群に対し、Gaussian Mixture Modelを与え、各点が各Gaussianに属する尤度を用いて点群分布を表すことにより、建物構造の違いを把握する。また、別の特徴量として、建物を構成する面の法線ベクトルをNormal Histogram(図2)として集約し、建物倒壊に伴い、本来の壁面が崩壊し、表面の数が増え、その向きが分散することを表現し、建物に対する被害を表現する。これらの特徴量に基づき、学習および評価が高速であるランダムフォレストを用いて倒壊建物を検知する。ランダムフォレストは、各樹木が、フォレスト内のすべての樹木に対して同じ分布で独立にサンプリングされたランダムベクトルの値に依存するような樹木予測器の組合せである。フォレストの汎化誤差は、フォレスト内の木の本数が多くなるにつれて、ある限界に収束

する。木分類器の森の汎化誤差は、森に含まれる個々の木の強さと木々との相関に依存するため、各ノードの分割に特徴のランダムな選択を用いる。既存の取組においては、鉄筋コンクリート造建物の破壊度を空間的損失の割合によって分類しており、本取組においても、この基準を参考に、建物の崩壊度合いによって危険性を判定し、50%以上の空間的損失が特に危険であるとする。評価実験では、株式会社 ZENRIN が公開する 3D 都市モデルデータに対し、3D モデリングソフト Blender を用いて擬似的に倒壊させ、Unity 上で LiDAR を模した観測から、建物の点群を取得し、ランダムフォレストを用いて倒壊判定を行なった。Fisher Vector と Normal Histogram による判定要した実行時間と、ROC 曲線下の面積を示す ROC-AUC を用いたモデル精度を図 3 と図 4 に示す。点群の密度が高い場合に実行時間が増加しているが、Fisher Vector, Normal Histogram 共に ROC-AUC が 0.99 以上となっており、高い精度で崩壊の程度を判定できていることがわかる。また、点群に対し、ノイズを加えた際には、Normal Histogram は 0.99 以上、Fisher Vector も 0.96 以上の ROC-AUC を達成しており、計測において生じる誤差に対してもある程度ロバストであることを示した。また、崩壊の程度が異なる建物に対して実験した結果、Fisher Vector での検出においては、崩壊の程度が低い場合精度が落ちる一方、Normal Histogram においては、被害が生じている面に対し、法線のばらつきがより顕著に現れることから、崩壊の程度が低い建物に対しても、被害の状況を適切に把握できることを示した。

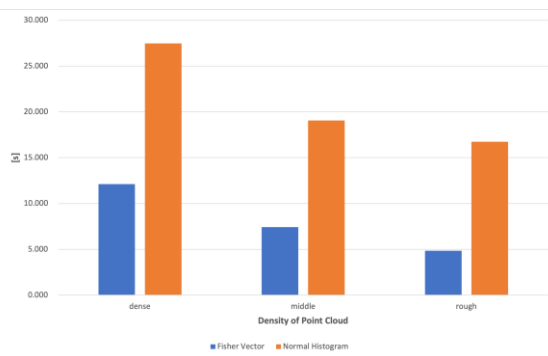


図 4 実行時間

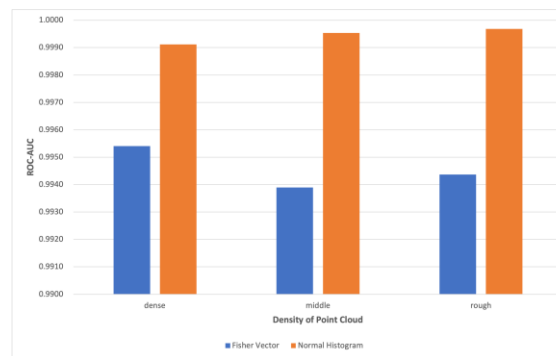


図 4 ROC-AUC

c) 火山灰センシング

活火山による噴火の被害の一つとしては、火山灰が挙げられる。この火山灰は、活火山が一定の活動レベルに落ち着いても日常的に発生する現象であり、小規模な噴火でも風向きや風速に影響され、広範囲に拡散する。そのため、活火山の活動が完全に休止するまで、気象レーダーを用いて、大気中に飛散する火山灰の観測が行われている。一方で、火山灰は空中を漂い、多くの人が生活する都市部にも降下するケースが少なくない。例えば、火山灰が目に入ると結膜炎や角膜傷を引き起こし、気管に留まると気管支や肺の炎症を引き起す。また、地表に降り積もった火山灰は、一時的に土壌の品質を向上させる効果がある一方で、厚く積もった火山灰は植物の生育を阻害する。さらに、火山灰が雨で流された後、最終的には河川に達するが、そこで固まって滞留するため、潜在的な流量は大きく減少することとなり、洪水の危険性が懸念され、河川だけでなくその周辺環境にも多くの影響を与える。現状、地表に降り積もった火山灰の状況については、人手による直接の回収でしか把握できておらず、多地点での計測や継続

的な観測は行われていない。本取組では、地表で散乱する火山灰の状況を広範囲かつ継続して計測可能な手法を考案する。

まず、火山灰の存在を把握する基礎的な手法として、リモートセンシングにより、火山灰の散乱状況を推定する手法を考案する。火山灰には金属成分が少なからず含まれているため、火山灰に電波を照射した際には火山灰の量に応じて、その反射波は拡散する。これにより、例えば、火山灰が存在しない場合と比較して、反射波の電波強度が弱まるなど、反射波の性質が変化することが見込まれる。この性質に基づき、火山灰の存在を把握するために、実際の火山灰をサンプルとして収集し、その地表面に電波を照射する簡易的な実験を実施した。得られた観測データを基に深層学習モデルを構築し、実際の反射波の観測データから火山灰の存在を98%の精度で推定することを示した。

3. 今後の展開

現状、疎な点群に対し、柱を推定することにより、構造物の存在を把握する手法を提案している。これに加え、構造物の横木や角などを表す特徴量を導入し、多角的な観点から、構造物の存在を少ない情報から推定する手法へと発展させる。また、単一の UAV だけでなく、複数の UAV から単一の構造物を効率よく計測する手法を考案し、災害時に代表される緊急時における早期の状況把握に貢献する。

都市部における火山灰センシングについては、火山灰の存在だけでなく、火山灰が付着する背景物体自体を LiDAR により計測した三次元点群により把握することで、背景物体への反射波の性質を仮定し、より正確に火山灰の存在を把握できる手法へと発展させる。これにより、例えば、車のルーフやボンネット、家屋の屋根など、適度な大きさの平面を持つ背景物体を発見し、その平面に対して電波を照射することで、それらに対する反射波の性質から火山灰の散乱状況を詳細に推定する。さらに、無線送受信機と LiDAR を UAV に搭載し、背景物体を推定しつつ、多様な位置から電波を送信および受信し、広範囲での火山灰をセンシング可能な手法へと発展させる。鹿児島大学 酒向一成教授とともに、河川敷からの UAV の観測などにより、桜島からの実際の降灰度合いを推定する計画を取りまとめている。

4. 自己評価

Structure from Motion (SfM)に代表されるように、複数の静止画像から物体の三次元構造を再構築する技術について、様々な取り組みが実施されており、構造物を構成する詳細な部品まで把握可能となっている。一方で、詳細な構造把握のためには、多くの画像及び点群を必要とするもので、個々の構造物への計測時間が必要になり、UAV の場合については、低速度の観測が必要となることを意味し、必ずしも UAV の機動性を活かしたものでない。本取組においては、少ない

情報から、構造物を推定する手法であり、UAV による早期の状況把握に貢献する、他にない取り組みであると考えている。

また、火山灰のセンシングについては、引き続き、計測機器のプロトタイプの開発や実証実験など、実用化を目指した研究開発をすすめていき、多地点での計測や継続的な観測は行われていない状況の解消を目指し、広範囲かつ継続して計測可能な手法の確立として発展させていく。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 2 件

1. Ayumu Harada, Akihito Hiromori, Hirozumi Yamaguchi, “A Method for Building Recognition from Point Cloud obtained by UAV with Simple Trajectory Patterns”, The 2022 IEEE 8th World Forum on Internet of Things (WF-IoT 2022), 2022 年 10 月.

This paper introduces a method for recognizing the 3D structure of urban buildings from sparse point clouds gathered by UAV-mounted LiDAR following simple trajectories. It efficiently identifies buildings based on geometric assumptions: building sides are about 90 degrees and shapes remain consistent vertically. In tests using ZENRIN's 3D city model, the method accurately recognized about 70% of the observed buildings.

2. Ayumu Harada, Akihito Hiromori, Hirozumi Yamaguchi, “Anomaly Detection of Building Structure from Incomplete Point Cloud Obtained by UAV”, Journal of Information Processing, Vol.32, pp.1-14, 2024 年 6 月 (Specially Selected Paper).

This paper presents two methods using UAVs for rapid building assessment in earthquake-prone Japan. The first method identifies building structures from partial 3D point clouds with geometric assumptions, successfully recognizing 70% of undamaged buildings. The second method employs machine learning with Fisher vector and normal histogram to detect collapsed buildings, achieving ROC-AUC values above 0.99, indicating high accuracy.

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 原田 歩, 廣森 聡仁, 山口 弘純, 東野 輝夫, “LiDAR を用いた疎な観測による多角柱復元手法の提案”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2021) シンポジウム論文集, 2021 年 6 月, pp. 1400 -1407.
2. 原田歩, 廣森聡仁, 山口弘純, “3D 都市モデルを対象とした点群データによる大まかな建築群復元手法の検討と評価”, 研究報告モバイルコンピューティングと新社会システム(MBL), 2021-MBL-101(33), 1-8 (2021-11-30), 2188-8817.