

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01554

研究課題名（和文）3次元点群データの圧縮・更新技術の開発

研究課題名（英文）Development of techniques for compressing and updating 3D point cloud data

研究代表者

布施 孝志（Fuse, Takashi）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：80361525

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,300,000円

研究成果の概要（和文）：近年、3次元点群データの取得が進み、その利活用が期待されている。3次元点群データは、その膨大なデータ量、および更新方法が課題となる。本研究では、MMSや航空機レーザなどから得られた3次元点群データを対象とし、それらのデータ圧縮手法、および変化点・地物数・位置推定を含むデータ更新手法の構築を行った。さらに、圧縮・更新の両者の視点から、総合的に提案手法を評価し、今後の基盤データ整備・更新に対する方法論を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3次元点群データは、自動運転、防災・減災、インフラ維持管理などに重要なデータであるが、データ量やその後の処理に対する負荷も大きく、幅広い分野における利活用を阻害する一因にもなってきた。3次元点群データをデータ基盤と考えた場合、継続的な整備・利用の視点から、いかに更新するかを検討も重要になる。これらの課題を包括的に解決するために、状態空間モデル、スパースモデリング、深層学習の手法を統合・発展させ、新規性かつ創造性の高い方法論を構築した。

研究成果の概要（英文）：3D point cloud data acquisition has been rapidly progressive. The 3D point cloud data is expected to be widely utilized. Dealing with the 3D point cloud data is still challenging due to its massive data and updating strategy. This study developed a data compression method for 3D point cloud data obtained from MMS and aerial lasers scanner, and so on. The study also developed data updating methods, including change detection and geographic feature number/location estimation. The proposed framework was comprehensively evaluated from both compression and updating viewpoints. Accordingly, the proposed methodology for maintaining and updating essential data is shown.

研究分野：空間情報学

キーワード：3次元点群 レーザ計測 変化検出 圧縮 更新

1. 研究開始当初の背景

Mobile Mapping System (MMS) や航空機レーザに代表される移動体計測技術の普及により、広範囲の 3 次元点群データの取得が進んでいる。3 次元点群データは、詳細な幾何情報を有することから、自動運転、防災・減災、インフラ維持管理などを対象に、その利活用が期待されている。3 次元点群データの利活用に向けては、単目的でのデータ取得ではなく、多様な目的で利用されるよう取得することが、効率性の観点から望ましいことは言うまでもない。様々なアプリケーションにおいてデータを共有・共用するためには、データ量が課題になることも多い。3 次元データは、もともとのデータ量が膨大であることから、現状では、地物抽出など、その後の処理に対する負荷が非常に大きな状況にあり、幅広い分野における利活用を阻害する一因にもなっている。詳細な情報を保持したまま、データ量を圧縮することは、上記の目的から重要になる。

さらに、3 次元点群データをデータ基盤と考えた場合、継続的な整備・利用の視点からの検討が重要になる。そのためには、データ更新技術を同時に考慮する必要がある。現状の移動体計測のコストを考えると、全ての空間を高精度・高頻度に観測することは現実的ではない。変化部分を抽出し、その部分を対象として高頻度に更新するための枠組みが必要になる。この際、変化部分を自動的に抽出することが必要不可欠であるが、複数の 3 次元点群データからのスクリーニング技術は未だ確立されたものではない。一方で、例えば、道路空間を対象とすると、今後の自動運転車の開発に伴い、簡易なセンサによる 3 次元点群データが高頻度に取得されることが予想されるが、これらのデータをデータ更新のために効果的に利用することも課題となる。すなわち、異なる精度・密度のデータから、変化点を抽出する技術に対する要請は高いものである。

本研究では、3 次元点群データを直接取得できる、レーザ計測を対象とする。レーザ計測においては、そのプラットフォームとして、航空機（ドローンなども含む）と車両（MMS）が主なものとして挙げられる。いずれも、点群の高解像度化が進んでいるが、換言すると、冗長な計測を行っている場合も存在する。すなわち、解像度が高ければ高いほど、物体の認識性能向上にそのまま直結するわけではない。より少ない計測データから、これまでと同等の 3 次元空間復元が可能になれば、上記の効率的なデータ整備にもつながる。ここにデータ圧縮技術の貢献が期待される。また、航空レーザ測量では、従来の離散的にレーザの反射強度を記録する「パルス記録式航空レーザスキャナ」に代わり、より詳細に反射強度を記録できる「波形記録式航空レーザスキャナ」が一般化してきている。パルス式においては、地物からの反射波として、4 点程度を記憶するにとどまっていたものが、波形記録式の登場により、連続的にレーザの反射強度を記録することが可能になった。しかし、波形データから地物数とそれらの位置を抽出するための解析が追加的に必要になっている。そのため、地物数・位置の自動推定技術も大きな貢献が期待される。これにより、地物の出現・消失に対応することも可能になり、あわせて、地物位置のみのデータ記録により、データ量の圧縮にもつながるものと考えられる。

上述の通り、近年のセンサの高解像度化を鑑みると、データ圧縮技術とデータ更新技術（主に、変化点や地物抽出）は密接にかかわっており、両者を総合的に考慮した手法の開発が望まれている。これにより、計算負荷の高いその後の処理を格段に効率化できることも期待される。

2. 研究の目的

上記の背景の下、本研究では、レーザ計測によって得られる 3 次元点群データを対象として、データ圧縮およびデータ更新手法の開発を行うことを目的とする。さらに、データ圧縮・更新の両者の観点から、提案手法を総合的に評価する。

具体的な手法については、データ圧縮においては、機械学習の枠組みに基づいて手法を構築する。一方のデータ更新における変化点抽出や地物抽出においても、機械学習の枠組みを応用するとともに、状態空間モデルに基づく手法の開発を行う。さらに、これらの枠組みにより、データ圧縮・更新の両者を統合した枠組みの構築が可能になる。例えば、3 次元点群データを対象としたスパースモデリング手法は未だ提案されていない。この点で、本研究は高い学術的独自性を有する。また、これまで、データ圧縮と更新の両者を同時に考慮した方法論は提示されておらず、その創造性も高いものである。

3. 研究の方法

(1) 圧縮手法の開発

圧縮においては、3 次元点群データが疎になる可能性があるため、それらを事後的に復元する手法が重要になる。そのため、スパースモデリングの一手法である圧縮センシングをベースに、基礎手法を開発する。特に、3 次元点群データに対するスパース性の定義に関して比較整理を行い、基礎手法に対して、複数の制約条件および特徴空間を検討する。提案手法を適用し、圧縮率と 3 次元復元精度の関係性を評価する。評価結果に基づき、圧縮手法に対する要件を整理する。

前者では、主にスパース性に着目したが、圧縮性能や汎用性の向上を目指し、深層学習ベース

手法への改良を行う。特に、入力形状の多様性への汎用性に対して表現学習を導入し、微細形状への対応のため近傍点間の関係性を明示的に組み込み、大量の入力点数に対するパラメータ増加の抑制を行う。

(2) 変化抽出手法の開発

ここでは、異なる精度・密度の点群データからの変化抽出手法を開発する。空間をボクセル分解し、ボクセルにおける点群占有率を考慮した判別を行う。この結果を考慮し、スパースモデリングと状態空間モデルを統合したデータ圧縮手法の改良を行う。次に、スパースモデリングの一種であるロバスト主成分分析に基づき、手法の拡張を行う。対象は、ボクセルだけではなく、2次元表現されたデータに対しても拡大する。提案手法に対して、圧縮率と3次元復元精度との関係性を再評価する。また、データ密度や観測数等との関係性も分析する。

さらに、変化点抽出手法として、3次元点群データ、メッシュ型データ、ボクセル型データを対象とし、異なる計測精度・密度・頻度に関する視点を導入した枠組み・手法を開発する。高頻度・低精度・低密度データを用いた変化領域抽出手法を、時系列のベイズ型手法により構築し、さらに、変化形状を抽出するため、低頻度・高精度・高密度データにスパース性および低ランク性を導入した手法としてまとめる。

上記では、異なる精度・密度のデータを扱うため、それらの結合手法も開発を行う。

(3) 地物数・位置の同時推定手法の開発

主に、波形記録式データを対象とし、系列データとしてみたレーザ計測データから、ノイズと地物を区別し、地物数とそれらの位置を同時推定する手法を開発する。ここでは、系列データを扱うことから、状態空間モデルをベースとし、地物の出現・消失に対応可能な手法を構築する。波形記録式レーザ計測データに対して、連続的な反射強度記録である特性を活かし、データ同化具体的には、PHDフィルタのモンテカルロ実装を行い、精度評価を行う。

さらに、レーザ計測データを対象とした地物数・位置推定手法の改良を行った。地物位置パターンへの柔軟性や計算量等の課題に対してフィルタリング手法をLMBフィルタへ大幅に改良し、前手法との比較分析を行う。

以上を総合的に評価し、圧縮・更新の両者を考慮した枠組みを提案する。

4. 研究成果

(1) 圧縮手法の開発

スパースモデリングをベースとした基礎手法の開発を行った。レーザ計測で対象となる地形は、限られた地形量に基づいた分類や表現が良く行われるが、汎用性を高めるためにも、少数の基底による表現が重要なる。ここでスパースモデリングの有用性が出てくる。そのために、データ構造(地物特徴)のスパース性、および観測のスパース性に着目した手法を構築した。これには地理的な空間パターン、周波数パターン、空間的な地形変化量の視点が重要であることを確認した。整理結果に基づき、各特徴空間における制約条件としてパターン数や平滑性を導入した手法を開発した。提案手法を航空レーザデータ(航空レーザ計測DEMデータに加え、ALB計測データにも拡張)に対して適用し、精度、欠損率との関係の視点から評価し、提案手法の有効性と特徴を整理した。その結果、大規模な欠損があったとしても十分な性能を有することも確認した。

次に、深層学習ベースの圧縮手法の開発を行った。圧縮に対する要件を整理し、その結果、次の事項を考慮することとした。1番目に、膨大なデータ量に対して高圧縮率を実現可能な非可逆圧縮手法であること、2番目に、多様な入力形状に対する汎用性をもつこと、3番目に微細な形状の表現が可能であるように局所形状の表現力をもつこと、4番目に、大量の入力点数に対して、その点数に依存しない復元精度をもつことである。以上の要件を満足する手法として、深層学習により強い非線形性も含んだデータ間類似性を扱い、近傍点間の関係を明示的に導入し、パラメータ数の増加を抑制する手法の開発を行った。具体的には、局所形状を考慮するための畳み込み処理を導入したエンコーダを開発し、パラメータ数の抑制を行うためにグリッド行列を導入したデコーダを開発した。提案手法をベンチマークデータに適用し、従来の高性能手法と比較して20~30%の性能向上を達成した。MMSより取得した実データにも適用し、その有用性を確認した。さらに、後述する変化抽出手法との関係性、未観測部分推定手法への拡張可能性に関して整理を行った。また、データ密度や観測数等との関係性も分析した。

(2) 変化抽出手法の開発

変化点抽出手法として、3次元点群データ、メッシュ型データ、ボクセル型データを対象とし、変化抽出手法の開発を行った。

レーザ計測においては、プラットフォーム、計測対象、計測自体に起因するノイズが存在する。変化抽出ではこれらのノイズの影響が無視できず、ノイズに頑健で、かつ汎用的な手法が要求される。それらの課題に対して、スパースモデリングの手法であるロバスト主成分分析に着目し、変化抽出手法を構築した。ここでは非変化部分は低ランク行列に、変化部分はスパースな行列に対応することを利用してモデリングを行い、変化抽出を達成した。提案手法を実データに適用し、

その性能を評価した。実データとして、メッシュ型データに対応した距離画像・航空レーザ DEM と、ボクセルデータに対応する MMS データを対象とした。これにより、提案手法の精度を評価し、従来の差分に基づく手法と比較して、高精度での変化抽出が可能であることを確認した。

次に、更新の枠組みも考慮した手法への拡張を行った。特に、異なる計測精度・密度・頻度に関する視点を導入した枠組み・手法を開発した。一般に、高精度だが高コストのセンサを利用すると観測が低頻度にならざるを得ない。一方で、簡易センサによれば、低精度ではあるが、高頻度の観測が実現する。これらから精度と頻度を両立した手法を構築した。高頻度・低精度・低密度データを用いた変化領域抽出手法を、時系列のベイズ型手法により構築し、さらに、変化形状を抽出するため、低頻度・高精度・高密度データにスパース性および低ランク性を導入した手法を開発した。ベイズ型手法においては、点群の占有度の変動パターンに着目し、状態更新を行う手法を開発した。MMS データに提案手法を適用し、更新の枠組みとして有効であることを確認した。これにより、時系列点群データ解析への方向性を示した。

また、異なる精度・密度のデータに対する結合手法を開発した。疎なデータの表現手法を検討するとともに、階層的な粗密レジストレーション手法を開発した。レーザスキャナと画像計測による 3 次元点群に提案手法を適用し、十分な精度での統合が可能であることを確認した。これまでの成果に基づき、データ更新方法を検討し、圧縮性能、精度、更新頻度の関係から、総合的な評価を行い、枠組みの提案を行った。

(3) 地物数・位置の同時推定手法の開発

波形記録式レーザ計測データに対して、連続的な反射強度記録である特性を活かし、状態空間モデルの枠組みにより地物数・位置の同時推定手法を構築した。広く利用されているデータ同化手法においては、地物数を同時推定することが困難である。そのため、ランダム有限集合の概念を導入し、PHD フィルタにより近似を行い、それをモンテカルロ実装により解く手法を開発した。ここでは、地物の出現・消失に対応した予測・観測モデルのモデル化も行っている。ただし、PHD フィルタによると、出現・消失のパターンによっては十分に対応できない可能性やラベリングにおけるアドホックさといった課題も残されている。そのため、LMB フィルタも新たに導入し、この課題に対応した。LMB フィルタでは PHD フィルタのような近似を行わず、対象と観測組みごとの更新結果を用いてフィルタ計算を行うことができる。そのため、ラベリングのアドホック性も回避できる。これにより、地物位置パターンへの柔軟性や計算量等の課題を解決した。波形記録式レーザの実データに適用し、PHD フィルタにより高精度の地物数・位置の同時推定が可能であることを確認し、さらに LMB フィルタにより、より精度が向上することや、前述の課題を解決できることを確認した。

以上の通り、3 次元点群データに対して、圧縮手法の開発、変化抽出手法の開発および更新枠組みの提案、地物数・位置の同時推定手法の開発を行った。これらにより、3 次元点群データのさらなる利活用につながることを期待される。なお、各研究成果については、国内外の学術誌等で発表し、一定の成果を挙げている。他分野の動向を見ても、それぞれ個別の研究開発が主なものである。全体を総合的に扱うことにより、3 次元点群データをインフラデータ基盤として有用なものにすることができ、本研究の大きな意義と考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Fuse T., Ikezawa H. | 4. 巻 XLII-2/W18 |
| 2. 論文標題 DEVELOPMENT OF MULTI-VIEW STEREO CONSIDERING ACCURACY OF EXTERIOR ORIENTATION ELEMENTS | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences | 6. 最初と最後の頁 47~52 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-47-2019 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Fuse T., Kajihara Y. | 4. 巻 V-2-2020 |
| 2. 論文標題 3D Measurement Combining Multi-View and Multi-Focus Images Using Light Field Camera | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 ISPRS - International Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences | 6. 最初と最後の頁 633-640 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/isprs-annals-V-2-2020-633-2020 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Fuse Takashi, Ohkura Takashi | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Development of Shoreline Extraction Method Based on Spatial Pattern Analysis of Satellite SAR Images | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Remote Sensing | 6. 最初と最後の頁 1361~1361 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/rs10091361 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Fuse T., Yamano T. | 4. 巻 XLIII-B2-2021 |
| 2. 論文標題 Change detection of time-series 3D point clouds using robust principal component analysis | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences | 6. 最初と最後の頁 163-169 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/isprs-annals-V-2-2020-633-2020 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takashi Fuse and Hiroki Ikezawa |
| 2. 発表標題 Development of Multi-View Stereo Considering Accuracy of Exterior Orientation Elements |
| 3. 学会等名 Optical 3D Metrology Workshop (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山野俊樹, 布施孝志 |
| 2. 発表標題 ロバスト主成分分析に基づく時系列3次元点群データからの変化形状認識 |
| 3. 学会等名 日本写真測量学会平成30年度秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 布施孝志 |
| 2. 発表標題 3次元点群圧縮と変化抽出 |
| 3. 学会等名 SPAR2021J 3次元計測フォーラム (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 布施孝志 |
| 2. 発表標題 Deep Autoencoder-Based Point Cloud Compression |
| 3. 学会等名 AIRDA Seminar |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|