写真計測(SfM/MVS)を活用した低コストな路面損傷調査の試行報告

(株)環境風土テクノ(株)愛亀

宮城大学

本田 陽一黒河 洋吾蒔苗 耕司

1. はじめに

経年的に劣化が進行する道路路面は継続的な損傷調査が必要となる。供用中の調査となるため,目視によるクラック分布調査やマルチロードプロファイラによる路面形状の測定を行う際には一時的に通行規制をかける必要がある。路面計測車やMMSを用いれば通行規制なしに高速かつ高精度な計測が可能であるが,コストが大きくなりがちである。AIによる画像解析により路面の損傷程度を評価する手法も有効と考えられるが,微小な変形の定量的評価は容易でないと考える。

特に、歩道では狭隘な場所や急勾配、段差などが 歩行者の通行のハザードとなる。 車いすべビーカ ーでは 2cm の段差も支障となることから微小な形 状を調査・判別する必要がある。

そこで、汎用的で入手が容易な機器やオープンソースソフトウェアを活用して路面形状の3次元点群を再構成し、損傷や通行上のハザードを測定・把握するアプローチを試行した。3次元点群はSfM/MVS技術を用いて多数の写真画像から再構成した。ハザードとなる急勾配や段差は点群情報を利用して、手間をかけずにマッピングすることができる。

2. 方法

2.1 撮影

UAVにより上空から撮影することにより広範囲の地形測量が可能である。しかし、路面損傷を対象としたとき、クラックや微小な段差を把握するためには細密な点群が要求され、路面への接近撮影が必要となる。また、細部形状の再現のためには、上空からの平行撮影よりも地上付近で多方向からの収束撮影¹⁾が適する。そこで、手持ちカメラまたは車載カメラによる路面付近からの撮影を行った。撮影はできるだけ収束撮影に近づけるため、多方向からの撮影に努め、複数回往復撮影した。

撮影に使用したカメラは単焦点レンズを備えた 一眼レフカメラと4K アクションムービーカメラ である。車道部については歩道からの撮影と車載 カメラによる撮影とした。補修工事施工時には通 航制限がかけられるため,路面上からの撮影も行った。

歩道を撮影する際には、徒歩により前方または 斜め側方の路面が画像内に含まれるようカメラを 向けムービー撮影した。撮影された映像から 0.5~ 2 秒間隔で画像を切り出し、SfM 処理の入力画像 とした。

歩道の場合、対象領域のアスペクト比が 100 を超える(幅 $2\sim3$ m の歩道に対し、一度に処理する距離を 200m ~300 m としたとき)形状でも 3 次元再構成が可能なように、多くの画像に共通して写りこむ遠方の建物や地物も含まれるよう撮影した。

2.2 3次元点群再構成

SfM/MVSにはオープンソースである COLMAP²⁾ または MeshRoom³⁾を用いた。この二つを比較すると、COLMAP はカメラモデルが充実していることと連続撮影を前提とした特徴点マッチングが可能であることなどから、高画角のアクションカメラによっても良質な点群を再構築することができた。一方、MeshRoom はテクスチャ付きの 3 次元メッシュを形成できる点に特徴があり、路面損傷を視覚的に把握する際に有用であった。

点群の編集には CloudCompare⁴⁾を,可視化には CloudCompare と ParaView⁵⁾を主に用いた。これらもオープンソースとして公開されている。

歩道調査の場合,例えば 2 km 区間で 2 cm の段差を扱う際にはスケールに 10^5 の開きがあることから,一度に処理することは難しい。そこで,200 m ~500 m ほどの区間に区分して個別に 2 sfM/MVS 処理をしたのち,結合した。一度に 2 sfM/MVS 処理を行う画像数は 2 sfM/MVS 処理を行う画像数は 2 sfM/MVS 処理を

SfM/MVS 処理に要した時間は 1 日 \sim 6 日であった(intel i7-8700K,64G,RTX2060)。

2.3 標点

供用中の車道,歩道内およびその付近に標点を 設置することは難しいため,地物 (縁石,マンホール,平板の角等)を座標合わせのための標点とした。 標点の座標測位には安価な 2 周波 RTK-GNSS モジュールを用いた。

SfM による疎な点群再構成を行う際に標点座標

を内的拘束条件 ¹⁾として与えれば得られる点群と 実空間座標の誤差は適切にコントロールされると 考えられる。しかし,今回使用したソフトウェアで はこの手法が利用できなかったために,無標点に て得られた点群内から標点となる地物を選択して 座標とスケールを与えた。

ただし、歩道では対象のアスペクト比が大きく、 無標点による SfM 処理では実空間に対する十分な 相似性を確保することができなかった。特に、屈曲 部を含み、かつ全域から見渡せる地物が少ない領 域ではその傾向が強かった。そこで、以下の手順で 補正を実施した。

- 1) 剛体変換 (CloudCompare の align 機能) で座標, スケール変換する
- 2) GNSS 測点または補正済の隣接モデルと補正 対象モデル間のずれ量 (ベクトル) を数点~十数点 計測する
- 3) 対象モデルを覆う正方格子を作り、ずれ量測 定点と格子点の距離の関数で重みづけしてずれ量 を格子上に展開する
- 4) 格子点から線形補間により点群各点のずれ量を算出し、補正する

これまでの試行では、約500mの延長でほぼ90度の屈曲部を含む幅2m前後の歩道区間(道路片側)で最大1m程度の修正が必要であった。ただし、このような事後補正では精度保証が難しいことに注意が必要である。

3. 路面補修工事への適用

車道の切削オーバーレイ工事において施工前と 切削後の路面を3次元点群化して評価した。

3.1 レーザースキャナとの比較

アスファルト表層 $10 \, \mathrm{cm}$ の切削が終了した時点でレーザースキャナおよび $\mathrm{SfM/MVS}$ により 3 次元 点群を再構成した。写真撮影には単焦点の一眼レフカメラ(SONY $\alpha7 \, \mathrm{III}$, $\alpha \, 6300$)を用い,夜間工事であったため工事用ライトまたはストロボを用いた撮影とした。図-1 は写真画像から点群を再構成してテクスチャ付きメッシュとして示したものである。切削機のビット痕まで精細に再現されている。撮影はこの図に示される範囲を再構築モデルの対象とし,周辺および内部から手持ち撮影した24MP 画像 318 枚を利用した(写真-1 参照)。図-2はレーザースキャナ(Leica ScanStation P40)による計測結果,図-3 は $\mathrm{SfM/MVS}$ による結果である。

図-4 はその両者の高さ方向に差を示したものである。SfM/MVSによる方法ではモデル縁辺部(モデル化対象範囲外)のデータばらつきが多くみられるが、モデル化対象とした切削面はではほぼ±5mm以内の差となっている。ビット痕による微細な凹凸を考慮すると、十分な精度が得られている

と考えられる。

図-5 は SfM/MVS による点群の点間距離分布である。切削面は点間距離が 10⁻⁵m 程度で,精細に再現されている。一方,対象域の周辺部(収束撮影の範囲外)は点間距離が長く,図-4 にも示されているように精度が低下している。



図-1 テクスチャ付きメッシュモデル



写真-1 切削面を撮影した画像の例 h=0.353m -0.345m

図-2 レーザースキャナによる点群 (メッシュ表現)

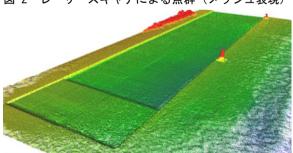


図-3 SfM/MVSによる点群(メッシュ表現)

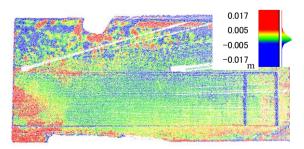


図-4 レーザースキャナと SfM/MVS の標高差

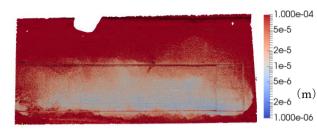


図-5 SfM/MVS による点間距離

3.2 切削深分布

図-6 は 3.1 と同様に切削オーバーレイ工法によるアスファルト道路補修について、切削前および切削後を SfM/MVS により 3 次元再構成したものである。切削前後のモデルの差から切削深分布を求めることができる。ここでは赤色から青色になるほど切削深が大きい。図左下部に切削深の浅い領域(赤色)があるが、これは切削前に路面が沈下していたところであり、切削面の平坦性は確保されている。







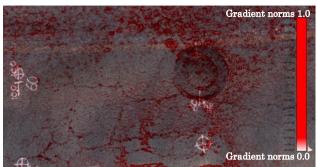
図-6 切削前後のモデルと切削深さの分布

3.3 クラックの抽出

図-6 中にあるマンホール付近の切削前後の 3 次元モデル拡大図を図-7 に示す。この図ではクラックや段差等を形状から抽出するため、3 次元モデル上に勾配分布を路面のテクスチャに重ねて示している。角度にして 9°以上の勾配を赤色で表しており、白に近い色彩ほど勾配が緩やかである。クラック部には局所的な斜面があるために勾配が大きい領域が線上に分布していることがわかる。

切削後は切削ビットの跡が一定方向に並んだ線状の高勾配域がみられるが、そのほかにクラック

と考えられるランダムな方向に連続した線状の分布が確認できる。なお、これら切削後の線状構造については、施工時の目視では判別が困難であった。



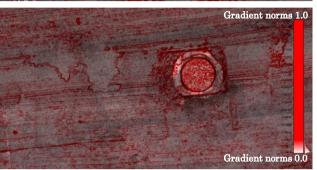


図-7 切削前後の路面表面(上:切削前,下:切削後) (テクスチャ付きメッシュモデルと勾配の重畳表現)

4. 歩道調査への適用

歩道調査では数百メートル〜数キロメートルを 対象に狭隘部や段差,勾配などについて確認して いく必要がある。特に,段差はベビーカーの通行の 障害となる 2cm を抽出しなければならず,広域, 高アスペクト比形状,精細といった困難な条件が ある。

図-8 は道路両側あわせて約 600m の歩道区間を SfM/MVS で 3 次元点群モデルとした例である。撮影は GoPro HERO6 で 4K ムービーとした。再現形状の相似性を確保するために、多くの視点から見通せる沿道のビル群も含んだ点群が作成されるが、後処理により歩道付近のみを切り出した。

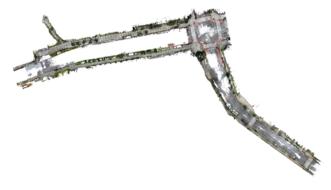


図-8 歩道モデルの例 (RGB表示)

図-9 は歩道のハザードのひとつとなる路面勾配をマッピングしたものである。勾配は点群の法線ベクトルや TIN メッシュから容易に求められる。

図-10 は段差の大きさを点群上に重畳して示したものである。平板のズレにより生じた段差が抽出されている。段差の計算は点群データ座標から以下の手順で計算した。

- 1) 画像から作成した点群情報のうち,法線の z 方向成分が 1 に近くないもの (たとえば 0.95 以下など傾きのある点) を選択 (斜面上にある点)
- 2) 上記で選択された点の半径 5 cm内の点を抽出し、k-means 法により標高で 2 つのクラスに分類
- 3)上記標高の分散が一定以上, 尖度が一定(たとえば 0.0)以上の点を選択(クラスが 2分類にはっきりと分かれているものを選択するため)
 - 4) 2 クラスの平均標高の差を段差とする

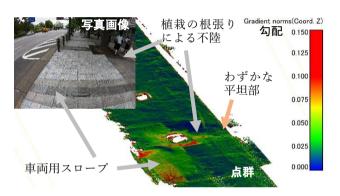


図-9 勾配図によるハザード抽出例(狭隘な平坦部)

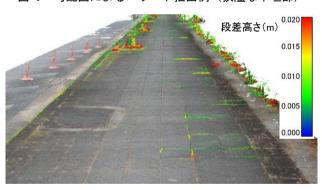


図-10 点群モデルと段差の重畳図

5. 路面調査への SfM/MVS 適用の課題と展望

以上のように道路路面の損傷調査に SfM/MVS 技術を活用した。その中で見いだされたいくつかの課題を以下に述べる。

1) 形狀誤差

アスペクト比が大きい対象領域では SfM 処理 で特徴点を共有できる画像数が限定され, 実空間 との相似性を保ちにくい。内的拘束条件を与える 場合も,標点の配置に十分注意する必要がある。

2) 撮影方法

撮影方法が結果に大きく影響する。可能な限り

収束撮影条件とする必要がある。撮影画角の最適 化も重要である。対象域全体の形状誤差を減らす ためには多くの画像で同じ物体を撮影できる広画 角画像が適するが、微小な段差を表現する点群を 得るためには狭画角の精細な画像が求められる。

3) 対象物

新設アスファルト、金属面等のテクスチャの変化が乏しいところでは SfM 計算に必要な特徴点を得にくく、再現が難しいことがあった。

また、供用中の路面を撮影することから車両や歩行者の映り込みが生じる。多少の映り込みは外れ値として排除されるが、多量の場合にはマスキング処理が必要である。これには手作業では困難なため、セグメンテーションのによるマスキング(図-11 参照)などの工夫が求められる。

4) 計算時間とマシンスペック

十分な精度の点群を得るまでには複数回の試行計算が必要なことがあり、多大な計算時間を要する。また、計算時間はマシンスペックに大きく依存し、特に現状では GPU 並列処理が不可欠である。5)2次元図面化

3 次元点群の活用には多くの利点があるが, 従来の 2 次元図面作成にこの点群を用いるには多大な 手間を要することが多い。2 次元図面化が必要な場合には, 自動処理の仕組みが不可欠と考えられる。



図-11 撮影画像(左)とセグメンテーション例(右)

課題はあるものの、オープンソースや汎用的なカメラ、パソコンおよび安価な RTK-GNSS 機器 (2セットで 8万円程度)を用いて 3次元点群を得られるメリットは大きい。試行は容易で、商用ソフトウェアを利用すればさらに扱いやすい可能性もある。狭領域であれば RTK-GNSS に代えて標尺等を用いることもできる。今後は、精度確保とその検証方法、最適な撮影方法等について検討を重ねたい。多くの場面で有効に活用されうるものと期待する。

参考文献

- 1) 日本測量写真協会: 三次元画像計測の基礎—バンドル調整の理論と実践—, pp.90~95・pp.106~109, 2016
- 2) https://colmap.github.io/index.html
- 3) https://alicevision.org/#meshroom
- 4) https://www.danielgm.net/cc/
- 5) https://www.paraview.org/
- 6) https://github.com/hszhao/PSPNet