光学的計測法を用いた新しい 橋梁点検手法について*

The Development and Evaluation of Optical Measurement Techniques in Bridge Maintenance

西村正三**
Shozo NISHIMURA

Key words

optical measurement techniques, monitoring, UAV, gigapixel imaging system, crack index, SfM, multi-view stereo

1. 緒 言

高度経済成長期に建設された膨大な量のインフラの老朽化が急速に進行し、危険レベルに達している。インフラの老朽化を加速させる理由として、効果的・効率的な検査法がない、維持管理技術者不足、各自治体の予算不足等が挙げられる¹⁾。筆者は、従来の維持管理手法の改革が急務と考え、写真測量や3Dレーザスキャナに加え、ギガピクセル画像撮影やUAV（Unmanned Aerial Vehicle—無人飛行体）等の最新の撮影手法を橋梁など鉄筋コンクリート構造物（以下RC造）へ応用し、その有効性と有用性を確認してきた²⁾。一方画像から3Dモデル生成の分野では、写真測量の発展型としてのSfM（Structure from Motion）が開発されている。これは、従来レーザスキャナ等を用いて生成していた3D点群を、デジタル画像から生成する技術である。デジタルカメラは一般的な機器であり、リーズナブルで取り扱いが容易である。本解説では、主に外観劣化情報取得を目的に、これまで実施してきた光学的計測法について紹介する。

2. デジタル画像・写真測量

2.1 3次元形状取得技術

構造物の維持管理を行うためには、構造物の形状を詳細に把握する必要がある。デジタルカメラ（以下DSLR）や3Dレーザスキャナを用い、3次元形状および表面の変状を定量的に把握する。DSLRによる写真計測は、2枚以上の画像から対象物の3次元座標および表面のテクスチャ画像を取得する。一方3Dレーザスキャナは構造物を点群として計測するが、高密度に計測しても亀裂幅までは読み取れない。

2.2 デジタル画像を用いた調査

橋梁などの大量な土木構造物の維持管理は定期点検（目視）によって行っている。点検や調査における点検員や足

場を含むコストが膨大であり、点検のばらつきや見落としも多く、客観性や確実性が乏しいとの課題があり、最近ではDSLRを用い、デジタル画像で記録することも多い。RC造のひび割れを評価するには0.2mm以上のひび割れ捕捉が必要とされ³⁾、DSLRを用いた静止画撮影の事例では、汚損のない明るい壁面の場合、画像解像度の1/10程度までの認識が可能である。例えば、撮影対象面を解像度2mm/pixで撮影すれば0.2mmのひび割れまでが、また径30mmのボルトの抜けを確認するための解像度は3mm/pixが必要であることを図1に示している。図2は、静止撮影やトンネル調査の際の動的撮影など、撮影条件の違いで各撮影機器を整理したものである。特に長大橋点検の場合には、仮設足場設置に伴う工期やコスト、また高所作業やロープワークには安全性に課題がある。一方、数十～百メートルの遠望からの撮影に活用できる自動撮影雲台は、撮影範囲内を所定のラップ率で連続的に撮影し、膨大な画像は専用ソフトにより一枚に合成処理できる。また上空から対象物に近接して高解像度の画像を取得するには、UAVにDSLRなどを搭載して撮影することで可能となる。以下では某斜張橋の調査に3Dレーザで基本形状を取得した後、自動撮影雲台とUAVを活用した例を紹介する。

3. 某コンクリート斜張橋での応用例

3.1 計測・解析の概要

某斜張橋は、幅員5m、主塔高75mのPC斜張橋である。調査は主塔P5（道路面から50m）を対象に実施した。距離100mの位置から自動撮影雲台を用いたギガピクセル画像撮影と距離約20mの位置からUAV搭載のDSLRで撮影した画像から「ひび割れ幅判読図化システム」でひび割れ幅の算出を行い、別途実施された特殊高所作業員によるロープワーク点検調査結果⁴⁾（以下〔ロープ調査〕）との比較検証を行ったものである⁵⁾。また画像から3Dモデル生成の環境が整ってきたことを反映し多視点画像3D構築についても試行した。撮影箇所を図3に、〔ロープ調査〕状況を図4に示す。また、解析処理のプロ

*原稿受付 平成26年8月19日

**（株）計測リサーチコンサルタント（広島市東区福田1-665-1）

図1 解像度と対象物の関係

図2 デジタル画像撮影機器の分類
(静止～動的・移動・走行型)

図3 某斜張橋の計測位置図

を図5に示す。

3.2 ひび割れ幅判読図化システム

コンクリートのひびわれ幅を評価するには0.2 mm以上のひび割れ幅の計測が必要である。図6は、DSLRで(a)のクラックスケールを撮影すると、(b)の拡大画像に示

図4 ロープワーク点検調査状況

図5 解析検討のフロー

図6 ひび割れのデジタルイメージ

すようにクラックは撮影取得され、(c)のサブピクセルレベルでグレイ階調表示できることを示している。これらの事項から、ひびわれ幅はクラックインデックス(以下[CI]):「特徴値×分布幅」という指標で表現できることを考案した(図7)。 $[CI]$ は分解能以下のクラックがCCDに取り込まれた際の、各グレイ階調の総和であり、

図7 特徴値の計算手法模式イメージ

図8 下地のグレイレベルとクラック幅算定の関係

図9 自動撮影雲台の機構と座標系

クラック幅が大きいと [CI] 値も大きくなる。[CI] からクラック幅を定量的に算定・図化が可能なひび割れ幅判読図化システムを構築し、ひび割れ幅の判読に普遍的に [CI] を適用することが可能否かを検証した。図8に示すように、下地のグレイレベルが変化してもひび割れ幅と [CI] 値には高い相関がある。

3.3 ギガピクセル画像を用いた擬似オルソ作成

ギガピクセル画像撮影のうち駆動部の自動撮影雲台は、2軸のモータで設定した撮影範囲を自動分割し、設置箇所を中心に垂直、水平方向に回転しながら放射状に数百枚の撮影を行う⁶⁾ (図9)。この数百枚の画像は、数十億画素の

図10 ギガピクセル画像撮影設定と詳細画像

図11 UAVの仕様

展開画像として合成される。今回対象までの撮影距離は、110 mであり解像度 1 mm/pixel で設定すると、1枚あたりの撮影範囲は 3.1×1.7 mの詳細撮影画像となる。垂直、水平方向に回転しながら縦 25×横 3枚の計 75枚の詳細画像を得る (図10)。この 75枚から合成処理された展開画像は数ギガバイトに及ぶが、画像を高～低解像度のピラミッド構造にすることで通常の PCでもストレスなく拡大縮小操作が可能である。しかし一点から放射状に撮影・生成された展開画像には歪が含まれるため、ひび割れ幅、長さなどを正確には算出することができない。そのため詳細撮影された画像ごとに幾何補正 (射影変換) を行い、模擬的にオルソ画像の作成を行う。処理は、まずカメラ位置と投影面の空間座標系を設定し、撮影開始、終了点、撮影位置の座標と撮影の分割数を入力すると各詳細画像の回転角が算出される。カメラ位置と角度、カメラの画角から射影変換を行い、幾何補正条件と解像度を求め擬似的ではあるがオルソ画像を生成できる。

3.4 UAV (無人航空体) を用いた外観調査

UAVは機体に GPS とジャイロを搭載し、あらかじめ飛行経路を設定しておくことで自動飛行により対象部位を詳細に撮影することができる。搭載の GPS は 1 周波 (誤差 5 m 程度) であり、安全性確保のため構造物から 20 m を確保して飛行した。図11に用いた機体の概要を示す。UAVに DSLR (画素数 16 MP, 焦点距離: 55 mm) を搭載しステレオ撮影した。デジタル写真測量では、人工的なターゲットを数点設置し高精度な測量を行った基準点を用いる必要がある。しかし今回は地上 50 m の高所に位置す

図 12 撮影形態および地物標定解析処理の状況

図 13 擬似オルソ画像（撮影距離：110 m）

るため 3D レーザの点群データを外部標定要素として用い、モデル生成とひび割れ判読精度について検証した。対象面における画像解像度は 2 mm/pix 程度である。1 コースを上下に飛行させ、上下ステレオ撮影を行い、撮影枚数は 25 枚である。図 12 に主塔に対する撮影形態および解析処理過程を示す。写真解析は、全ステレオペアで、パスポイント、タイポイントを手動で選定し、さらに 3D レーザ点群データを用いて、バンドル調整計算により写真の外部標定要素を同時に決定しおおむね 30 mm 程度の解析結果を得た。

3.5 ひび割れ幅判読図化システムによる検証

ギガピクセル画像撮影による擬似オルソ画像および UAV 画像のステレオ解析によるオルソ画像を用いてひび割れ幅判読の検証を行った。擬似オルソ画像（解像度 1 mm/pix）の一部を図に示す。箇所 A の擬似オルソ画像によるひび割れ幅算定結果を図 13 (a) (b) に示す。〔ロー

図 14 SfM—多視点画像 3D 構築の流れ

プ調査〕で 0.1 と記述されている部位では (b) 0.2 mm 未満の評価となった。箇所 B の〔ロープ調査〕および UAV ステレオ解析で作成したオルソ画像を基に算出したひび割れ幅を図 13 (c) (d) に示す。UAV 画像の解像度は 2 mm/pix であるが、〔ロープ調査〕で (c) 0.4 mm 相当のものが、システム判定では (d) 0.5 mm 以上とほぼ同等の評価レベルが得られた。

3.6 多視点画像 3D 構築の提案

先述したように今回 UAV 画像からの写真測量では 3D レーザの点群データを外部標定要素とし、パスポイントなどを手動で選定したがかなり時間を要した。一方、コンピュータビジョンの分野で開発されてきた SfM が、写真測量分野においても応用が進み、無料ソフトも公開され始めてきた⁷⁾。SfM とは、あるシーンをカメラの視点を変えながら撮影した複数枚の画像からそのシーンの 3 次元形状とカメラの位置を同時に復元する手法である⁸⁾⁹⁾。以下では SfM のアルゴリズムを元にした多視点画像計測手法を用いた橋梁点検手法について紹介する¹⁰⁾。図 14 は DSLR を用い約 100 枚の画像を用いて床版を撮影し、3D モデルを構築した事例である。SfM により各写真の撮影位置が計算され、高解像度の画像がテクスチャマッピングされた 3D モデルが生成される。(a) 床版撮影画像（100 枚程度）の各特徴点を自動認識し、画像ごとのカメラ撮影位置を自動解析。(b) 写真画像がマッピングされた 3D モデル生成。(c) ビューアで任意方向からの閲覧と距離測定が可能。(d) 拡大表示すると、元の撮影解像度のまま表面性状を確認でき、ひび割れ幅判読図化システムで損傷図まで

図 15 CIM3 次元モデルを活用した維持管理システム

の作成が可能となる。

解析に必要な現地作業は、デジタルカメラによる多方向から対象構造物を 60% 以上ラップさせて撮影を行うのみで 3D モデルが構築される。本技術を橋梁の調査点検に適用することで、現地作業の大幅な効率化が図れる。例えば撮影のみを地域の NPO や地域住民に委嘱すれば、地方のインフラ長寿命化に大きく貢献することが可能となる。そして撮影画像を集約し 3D 処理センター（仮称）で処理・解析・DB 化することでより効率的な維持管理への可能性がある。

4. Asbuilt な 3 次元維持管理システム構築に向けて

橋梁点検を的確に行うには、効率的に必要なかつ正確な情報を捉えること、新旧情報の比較から将来を予測することが重要となる。従来の点検により得られた情報は、変状箇所のみ画像である場合が多い。今回試行した遠隔から全体像を俯瞰し、かつ高精度なデジタル画像取得が可能なメガピクセル画像や UAV 画像さらには多視点画像 3D 構築などの手法を利用すれば、全部材、全部位の健全部も含めた情報が得られるため、経年変化を把握するためのデータとして活用できる。またこれら光学的計測手法は、足場架設の制限を受けずに点検調査に活用でき支保工などの仮設経費の削減が期待できる。提案する光学的手法が確立すると、肉眼では見ることができない、あるいは人間の眼を超えた情報を取得・分析することができる。したがって

- ・ 高信頼性・高精度化による目視点検のばらつきの解消

- ・ インフラ点検の低コスト化による点検頻度増加
- ・ 定量的な損傷データの取得
- ・ 地震や台風等の自然災害直後の緊急調査も可能となる。

取得した膨大な画像を迅速に検索・閲覧ができるためには 3 次元維持管理という概念も重要である。これまで整備・蓄積されてきた膨大な道路・橋梁台帳などの維持管理に関わる情報資産を CIM (Construction Information Modeling) と連携させて一括管理する。提案した多視点画像 3D で構築したモデルから市販の CIM ソフトに取り込み、橋梁の構成要素である桁、床版、橋脚などの属性ごとに情報化し、また点検記録の PDF データとリンクさせることができる。CIM の 3 次元モデル上に各種情報を格納またはリンクさせることで、部材や部位ごとに必要な情報を迅速に収集が可能である。3 次元モデルを用いた維持管理システムのイメージを図 15 に示す。損傷の 3 次元可視化は、損傷の連続性が確認しやすく変状原因の推定判断を補助する上でも有効である。

参 考 文 献

- 1) 国交省「道路橋の予防保全に向けた有識者会議」(<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/maintenance/index.html>).
- 2) 西村正三他：軍艦島の調査・検証からみた今後のインフラ構造物調査への提案，日本実験力学会誌，**12**, 3 (2012) 147-158.
- 3) JACIC：コンクリート診断技術'02 基礎編，(2002) 89.
- 4) 平成 20 年度 農業用施設維持事業 大芝大橋構造点検業務報告書.
- 5) 西村正三他：橋梁維持管理調査における遠隔計測手法の有効性検証，(社)日本測量協会 応用測量論文集.
- 6) 例えば <http://gigapan.com/>
- 7) 例えば <http://www.acute3d.com/>
- 8) 鳥居秋彦，奥富正敏：安定・高精度なオンライン SfM，画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011)，2011 年 7 月.
- 9) 満上育久：Bundler: Structure from Motion for Unordered Image Collections, 映像メディア学会誌，**53**, 479-482.
- 10) 小沼恵太郎他：多視点画像 3D 構築技術の橋梁調査への適用性について，土木学会第 69 回年次学術講演会概要集 (CD-ROM)，2016.

西村正三

産業遺産の調査を目的に適用してきた光学的計測手法を、インフラ構造物の変状調査とモニタリングに「より簡便に適用させる」ため、実業務で UAV、多視点画像 3D と CIM、BIM を実効的に連携させるための試行・開発を行っている。博士 (工学)、一級建築士、技術士 (建設)、測量士。