

写真計測による構造物の変状検知

鈴木崇伸¹

¹正会員，博士（工学），東洋大学理工学部（〒350-8585 川越市鯨井 2100）

1. はじめに

最近リモートセンシング技術の進展が著しく，日本ではこれらの技術を応用して国土の詳細なデータベースが整備されている．1995 年兵庫県南部地震を契機に全国的に整備された GEONET（GNSS Earth Observation Network System）により，2011 年東北地方太平洋沖地震の東日本の動きが明確になり，2016 年熊本地震においても観測点の動きから断層の動きが明確になっている．また衛星画像を利用する技術も進展し，災害直後に空中から災害監視をする体制が整えられている．

2016 年熊本地震でも最新の測量技術により，被害把握が試みられている．衛星を使って撮影する方法，航空機を使って撮影する方法，さらに最近では UAV（Unmanned Aerial Vehicle）を使って撮影する方法がある．航空機を使った測量は古くからある技術であり，使用するカメラや位置情報は格段に高性能化している．カメラの高性能化にあわせて画像処理ソフトも改良が進んでおり，複数の写真から 3 次元情報を計算するソフトが市販されている．

筆者らは 2016 年熊本地震後に写真計測技術を被害判読に応用する研究を進めている．久保寺他によれば，阿蘇市内に現れた正断層の分析では，全体に隆起した中で陥没が起きていることが明らかになり，また益城町では新旧の航空写真を対することからマンホールの移動量が計算できることを確認している．衛星画像に比べて分解能が高く，また過去からのデータ蓄積のある航空写真は被害分析の有望なツールになると考える．

2016 年熊本地震では，断層通過地域で道路ネットワークが寸断され，被害となった構造物の状況把握に時間がかかった．そのため衛星画像，航空写真あるいはドローンなどの近接画像の情報は被害の即時把握に役立つ情報として注目され，多くの研究者が分析結果を報告している．

今回の報告は，これらの技術を使って写真計測により，構造物の被害把握がどの程度できるかを試している．使用した写真は国土地理院から公開されている熊本地震直後の航空写真と被害調査の時に撮影したコンパクトデジタルカメラの写真である．これらの写真を PhotoScan Professional（Agisoft 社製）に取り込んで 3 次元座標を計算した．被災後の構造物の座標データから変状量を判読している．航空写真では地上の座標値を追加して精度を高める工夫をし，またデジタルカメラのスナップ写真では既知の距離情報を追加して変状計算を行っている．

2. デジタル写真の加工法

ステレオ写真（複数の方向から撮影した写真）を用いて物体の 3 次元形状の計測ができる．コンピュータ処理に適したデジタル写真が一般化するに伴い，急速に加工技術が進んでいる．写真撮影位置と撮影方向を未知数として適合計算を行い，3 次元座標が計算できるようになっている．レンズによる写真の歪を自動的に処理してくれるソフトもあり，簡単に 3 次元座標が計算できるようになっている．ステレオ写真の分析は訓練を受けた専門家の仕事であったが，コンピュータの画像分析技術の進展もあってデジタル写真を自動的に分析できるようになっている．

3 次元画像計測は点，線，面が数値データ化できることから距離，歪，面積，体積に換算することが可能であり，特に時間変化する現象では，画像があれば距離の変化（変位），面積変化，体積変化を計測できる．精度の限界はあるが大域的に状態を計測できる技術として活用されている．写真に写る表面情報だけしか得られないが，構造解析などと合わせれば見えない部分の推定もできると考えられる．

3 次元座標の精度を決めるのはデジタル写真の分

解能であり、画素数と撮影距離となる。画像の歪の補正も精度に影響するために画素数が多く、歪の小さい大口径レンズで近接撮影したデジタル写真を使えば3次元座標を精度よく計算できる。デジタル写真の1ピクセルに対応する距離がおよその座標の計算精度と考えられる。100Mピクセルの写真を使って10mサイズの構造物を分析するならば1辺が約10kピクセルとなり、1mm精度の分析が可能である。同じ条件で100mサイズの構造物を撮影すれば10mm精度となる。

使用した写真測量ソフトウェアは、PhotoScan Professional である。PhotoScan Professional は複数の空中写真と複数のGCP (Ground Control Point) を用いて自動的に空中三角測量可能である。また、イメージマッチングによりDSM (Digital Surface Model) の3D点群を自動的に作成でき、グラウンドに分類したポイントクラウドのみを使用することでDEM (Digital Elevation Model) を作成可能である。さらに、オルソフォトモザイクを自動的に作成可能であり、デジタル写真から3次元CADデータに変換することができる。

3. 航空写真を用いた変状の検出

(1) 使用した航空写真

国土地理院は2016年熊本地震後に被災状況の把握のために複数回、空中写真を撮影している。これらのデータは熊本県等の復旧支援のために公開されている。撮影したデジタルカメラは、キャリブレーションがされて内部定位が明確であり、RTK法GNSS測量とIMUによって、撮影時のカメラの3D座標値と姿勢が正確に得られている。

2016年4月29日に撮影された熊本断層地区Aの標定図を図-1に示す。益城町から南阿蘇村の区間で3列の空中写真が撮影されている。このうち阿蘇大橋付近の連続した写真を図-2に示す。同じ個所が複数枚の写真に写るように計画的に撮影されている。撮影位置の情報を持った高精度なデジタル写真から地表面の座標の計算が可能になる。

この日の撮影は、甚大な被害となった熊本県道28号線(俵山バイパス)のルートに該当する。航空写真により橋梁の被害がどのようなになっているか分析する。後述する大切畑大橋の写真を図-3に示す。同図(a)は橋梁部分の切り抜きであるが、曲線連続桁両端の亀裂が明瞭になっている。この両端部分の拡大写真を同図(b), (c)に示す。県道の車道は幅員が8mであり、縁石や中央線のずれから1m程度の相対変位が生じているのが確認できる。画像を拡大してセ

ンターラインを見ると2~3ピクセルの画像となっており、1ピクセルの分解能は約0.1mであると考えられる。

県道において大きな被害となった桑鶴大橋と俵山大橋の写真を図-4に示す。同図(a)は桑鶴大橋であるが、山の北面際に造られており、陰になった部分では亀裂の判読が難しいが阿蘇側においても水平ずれのあることが確認できる。一方日射がある西原側は明瞭な影から亀裂のあることが確認できる。俵山大橋は南北方向の谷を渡っており、両端の亀裂が明瞭である。写真を拡大していけば、連続桁が写真の下側に少し撓んでいることも確認できる。撮影された範囲で西原側の路面陥没が顕著であるが、車道幅員が8mという既知情報があれば最大の陥没幅は凡そ4m程度であることが確認できる。

1ピクセルが0.1m程度である写真を使えば、その精度においてずれ量が計算できることが期待される。市販の画像合成ソフトを用いて航空写真から橋梁の変状量の定量化を行い、判読制度の確認と問題点を分析してみる。

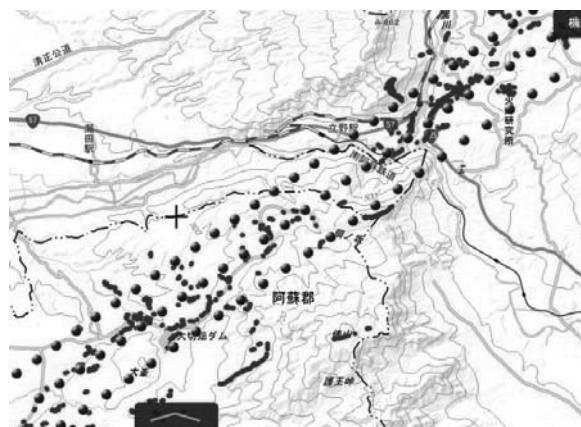


図-1 熊本断層地区A垂直写真(2016年4月29日撮影)の案内図

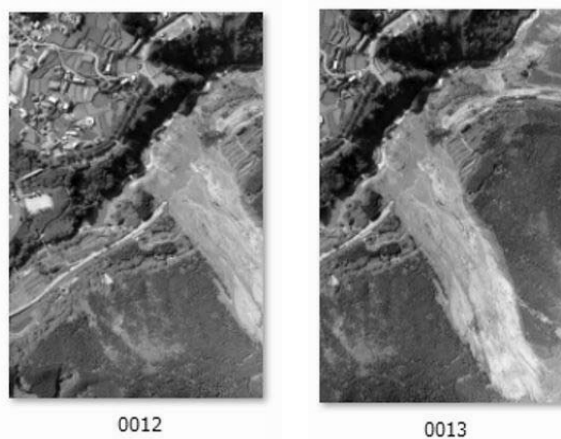


図-2 阿蘇大橋付近の連続写真の例



(a) 大切畑大橋全景



(b) 西原側橋台部

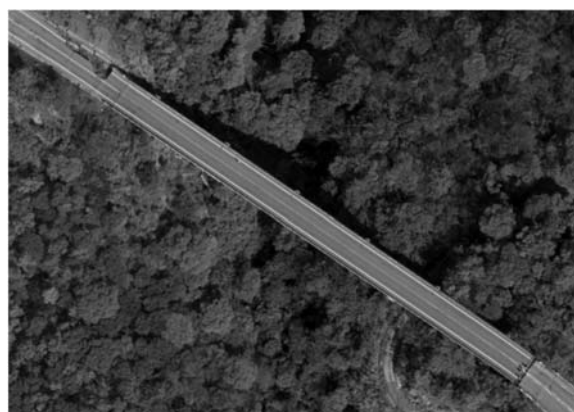


(c) 阿蘇側橋台部

図-3 航空写真で見た大切畑大橋の被害



(a) 桑鶴大橋



(b) 俵山大橋全景



(c) 俵山大橋西原側の陥没

図-4 航空写真で見た熊本県道 28 号線の被害

(2) デジタル写真の加工による変位計算

国土地理院から公開されている航空写真は撮影位置の情報を持っている。撮影位置と方向のわかった写真を用いて地表の 3 次元座標が計算できる。森やビルなど高さ方向に大きく変動する場合には精度が低下するが、道路や農地などおよそ水平となっている地区では複数の写真から標高もある程度計算できる。

この計算の精度を向上させるには写真に写った点 (GCP 点) の正確な座標を追加すればよい。道路の白線や排水柵、マンホールなどの正確な座標を追加すれば格段に計算精度が向上する。今回の熊本県道 28 号線沿いにおいて筆者らは西原村内の道路等でネットワーク型 RTK 法 VRS 方式の GNSS 測量を実施している。航空写真の位置情報に地上の位置情報を追加して 3 次元座標の計算を行った。

図-5 に前述した PhotoScan Professional により計算した航空写真の撮影位置と地表座標を示す。国土地理院の航空写真は撮影位置の座標値が計測されている。航空機は一定の高度で飛行し、阿蘇に近づくほど地表に近づいているのがわかる。図-1 では 3 列を示していたが、対象とする橋梁が撮影されている 2 列だけを計算している。西原村内で行った GNSS 測量の座標値を追加して、精度の向上を図った。複数の航空写真から合成した大切畑大橋の画像を図-6(a)に示す。橋だけを抽出して周囲の背景を消している。3 次元の座標が計算されているので任意の方向から見る事ができる。

ここで連続桁の両端を拡大してみたのが同図(b), (c)である。(b)は西原側、(c)は阿蘇側となっている。複数の航空写真を合成しているが水平方向のずれは明瞭に計算されるものの上下方向の精度が十分でなく、視線を水平方向にとると不自然な画像となるのがわかる。

水平方向の変位をセンターラインの座標値から計

算した結果を表-1 に示す。1m 前後の移動量が航空写真から計算できた。桁端部のずれ量として計算した結果であり、谷側（歩道側）への移動を正として計算している。上下方向の変位は精度よく計算できなかったが、水平移動量は航空写真から計算できることが確認された。

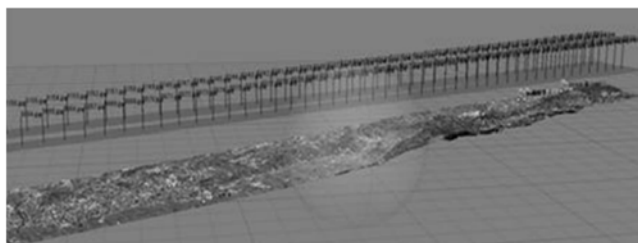
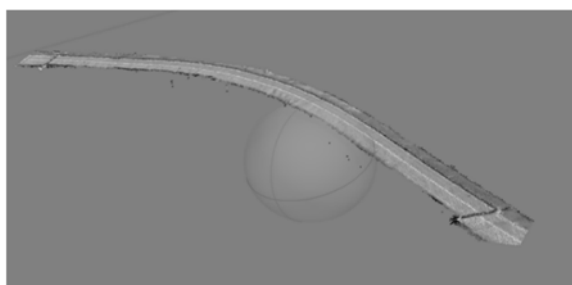


図-5 航空写真の撮影位置



(a) 航空写真から合成した大切畑大橋



(b)大切畑大橋西原側



(c)大切畑大橋阿蘇側

図-6 航空写真の合成により大切畑大橋の被害分析

表-1 大切畑大橋桁端部の変位量の計算結果
(航空写真)

	水平変位 (m)
西原側	0.84
阿蘇側	1.16

4. 現場写真を用いた変位の検出

橋梁が撮影された数枚の航空写真の加工では鉛直精度が保てないことが確認されたが、次に撮影位置情報の無いスナップ写真から変位量の計算を行ってみる。最近ではデジタル写真が主流となり、安価で画素数の多いカメラが普及し、記憶メディアが大容量化したのに伴い非常に多くの画像データが取得できるようになった。変位計算をしたい箇所において所定の写真を撮影すれば現場の状況が自動的に3次元化データにできるか検討してみる。

航空写真においては使用したカメラのキャリブレーションの情報も既知であるが、デジカメ写真においてはこの情報もなく、また焦点距離も自動であるため、解析ソフトが撮影画像から推定計算を行っている。今回の撮影はデジカメのズームを固定して得られたデータを計算する。

2016 年熊本地震におけるスナップ写真の例を図-7 に示す。場所は大切畑ダム橋の歩道部であり、橋台際にできた段差をいろいろな方向から 20 枚程度撮影し、Photoscan Professional により画像を合成した。スナップ写真なので撮影位置の座標は得られないが、画像マッチングにより3次元の立体画像は計算できる。図-8 に得られた3次元画像を示す。合成画像は情報不足で座標計算ができなかった部分はグレイ表示となる。座標計算ができた部分は元の写真のRGB情報を付与することにより、カラーの3次元画像として見る事ができる。このデータは視線を変えて立体的に眺められるようになっているが、座標値は計算されていない。また陰影情報は平均化されて表示されるために、実際の写真が再現される訳ではない。

そこで歩道の縁石間の距離が 3m であるという条件を追加し、仮想の GCP 点を入力すると地表の座標が計算され、沈下量の分布が得られる。撮影位置情報が無くても既知の長さの情報を追加すれば計算が可能になることが確認できた。

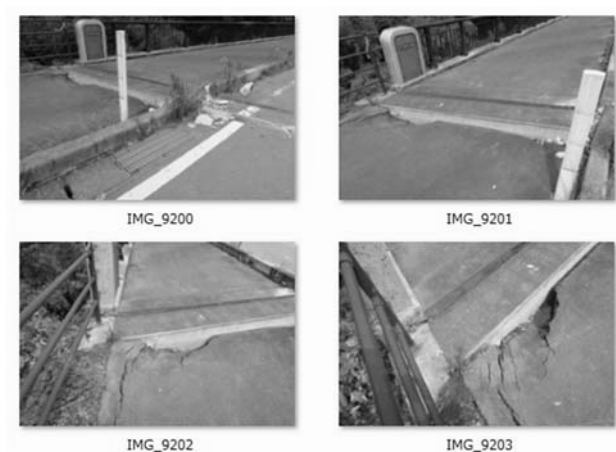


図-7 大切畑ダム橋歩道部のスナップ写真の例

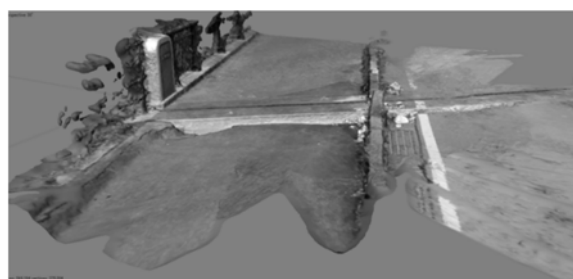
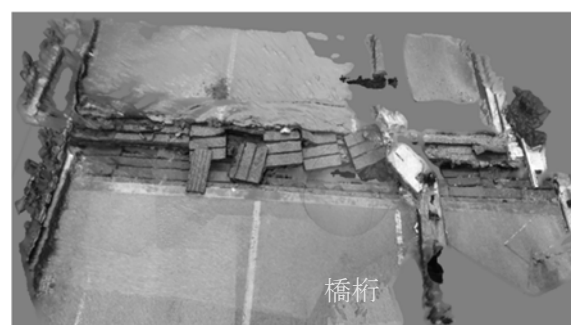


図-8 大切畑ダム橋歩道部の合成画像

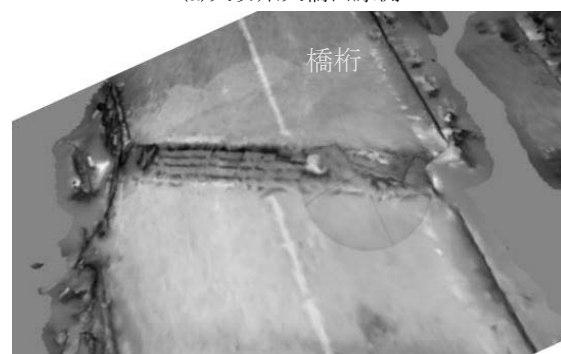
図-6 に示した大切畑大橋の両端のスナップ写真を同様の方法で 3 次元座標化してみる．使用した写真数は 20 枚程度であり，道路上から撮影しているため側面や下面の情報は無い．既知の長さの条件として，車道の縁石間の距離を 8m，歩道の縁石間の距離を 3m として GCP 点を追加入力した．

図-9 に 3 次元座標化した両端の段差を示す．座標値ごとの RGB 情報を表示している．大切畑大橋西原側は撮影枚数も多く，段差部に接近した写真も多かったので鮮明な 3 次元写真となっている．一方阿蘇側は接近写真が少なくやや不鮮明な画像となっている．特に歩道部は地表の座標値が収束していないのがわかる．センターラインのずれに注目して水平変位と鉛直変位を計算したのが表-2 である．近接写真では段差に対する方向が変化した写真を使うことになり，鉛直変位も計算される．水平変位は両端とも谷側（歩道側）に約 1m となり，桁の落下量である鉛直変位は西原側で大きく，阿蘇側で小さい結果となった．

同図(b)に示した阿蘇側の橋台部の写真を図-10 に示す．現場調査において詳細な計測は行わなかったが，有効数字 1 桁程度で変位計算ができていると考えられる．また 3 次元データ化するためには所定の写真枚数と撮影方向が必要であることが確認された．



(a)大切畑大橋西原側



(b)大切畑大橋阿蘇側

図-9 スナップ写真から得られた合成画像

表-2 大切畑大橋桁端部の変状量の計算結果
(スナップ写真)

	水平変位(m)	鉛直変位 (m)
西原側	0.81	-0.56
阿蘇側	0.93	-0.23



図-10 大切畑大橋阿蘇側の支承部の変状

5. おわりに

本報告は写真測量で用いられる市販ソフトを利用して地震で被災した箇所の定量的な分析が可能かを検討している．最近ではデジタルカメラが高性能化し鮮明な画像が安く手に入るようになった．被害調査

においても多くの写真が撮影されるが、それらの画像の分析手法の一つとして画像の3次元化があげられる。もともと3次元であった情報を写真という2次元データにしたものを再構成し、分析することになる。

航空写真は、分解能は低いものの、広域に被害を把握するのに向いている。撮影位置情報やカメラのキャリブレーションもできているので自動的に画像合成が行える。今回の計算では地上のGCP点を追加して精度を高める工夫を行った。その結果、橋桁の水平変位が定量化できた。ただし航空写真では鉛直変位は十分な精度とならなかった。

また10Mピクセル程度のデジカメを使って被災箇所を撮影したスナップ写真を使って画像合成を行った。スナップ写真は撮影位置情報を持たないが、画像合成は可能であり、既知の距離の情報を追加することで3次元データ化することができた。近接写真の場合は撮影方向の変化も大きくなり、鉛直変位も計算が可能であることを確認した。

カメラや画像分析ソフトは今後ますます高精度化していくと考えられる。画像情報を利用した被害分析技術の研究を進めていく予定である。

謝辞

本研究で用いた空中写真は、熊本県等が実施する復旧の支援のため、国土地理院非常災害対策本部情報提供支援班から提供してもらいました。国土地理院非常災害対策本部情報提供支援班に感謝申し上げます。

今回の計算は元東洋大学の播磨竜太君が行いました。またデータの入手や解析において東洋大学理工学部政春尋志教授ならびに久保寺貴彦助教の協力をいただきました。あわせて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 久保寺 貴彦, 鈴木 崇伸, 政春 尋志, 松尾 栄治: GNSS測量と空中写真測量による2016年熊本地震の地表面の変状の分析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学) Vol. 73, 2017.
- 2) 国土地理院基本図情報部災害対策班, 国土地理院ランドバード: 平成 28 年熊本地震の緊急撮影活動, 写真測量とリモートセンシング, Vol.55, No.3, pp.152-153, 2016.