

道路インフラの評価手法に関する基礎的分析 ～空撮画像から構築した 3D モデルを用いて～

三宅 寛之¹・中山 晶一郎²・藤生 慎³・高山 純一⁴

¹学生会員 金沢大学 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 金沢市角間町)

E-mail: abotussss@stu.kanazawa-u.ac.jp

²正会員 金沢大学教授 環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

E-mail: snakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 金沢大学准教授 環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

E-mail: fujju@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴フェロー会員 金沢大学教授 環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

E-mail: takayama@t.kanazawa-u.ac.jp

近年、わが国では高度経済成長期に建設された膨大な道路インフラの劣化やそれに対する点検、維持管理によるコストが問題となっている。定期点検には近接目視が基本であり、道路構造物に接近するには交通規制による交通容量の低下が発生したり、高所作業車や橋梁点検車などの特殊車両が必要になったりすることが課題である。一方で、小型 UAV(以下ドローン)の普及により容易に空撮することや高所構造物に接近することが可能になったことで、低コストかつ効率的に道路インフラの点検に利用することが期待される。ドローンによる写真や動画は SfM 技術によって 3D モデル化することが可能であり、これを用いれば詳細な情報(凸凹や損傷の連続性など)を得られるため、以上の背景をもとに多視点 3D モデルによる道路インフラの評価手法について基礎的分析をする。

Key Words: drone, SfM technology, infrastructure, inspection, 3Dmodel

1. 序論

(1) 本研究の背景と目的

近年、誰でも簡単に手に入れることの出来るドローン。このドローンを用いることで上空からすばらしい景色を撮影し、ドラマチックな映像を手に入れることができる。ドローン(ここでは PHANTOM3 Professional を用いる)の特徴は、安定したホバリング飛行が可能なことと、4K 画質での動画撮影が可能なことである。風が吹いていても揺れる事はないので、簡単に操作することが出来る。また 100m 以上の高度を飛行でき、1 km 程度先までなら無視界飛行で操作できる。

ドローンは人が簡単には見る事の出来ない箇所を撮影できるので、橋梁や構造物などのインフラ点検に活用することが期待されている¹⁾²⁾³⁾。わが国のインフラ設備の多くには、経年劣化によってクラックやゆがみなどの損傷があるため、効率的な点検方法とその評価方法の構築は必須である。

本研究での目的は、インフラ設備の劣化をドローンに

よって抽出する手法の構築の検討である。それに伴いインフラ設備を点検するに当たっての要求される性能を満たすことが必要である。点検メンテナンスにおいて人身事故が発生してはいけけないので、それに対する安全性も必要となる。難しい手続きが不要で簡単かつ容易な手法であることが望まれており、時間をかけずより多くのインフラを点検していかなければいけないので、効率的であることも要求される。人が行う点検よりも正確であり、そして経済的にも安く、低コストで実施できる手法であることも望まれる。これらの要求される性能は今後のインフラ点検においては満たしていく必要がある。本研究では、ドローンを用いることでこれらを満たしつつ、実用的な方法であるのかを検証する狙いもある。

手法を構築するために橋梁の桁や構造物の壁を主に対象としてデータにする。ひび割れやその他の損傷、劣化は基本的には目に見えて分かるものが多いため、過去の状態との比較をすることでどこに異常があるのか把握することが出来る。本研究で扱う損傷はコンクリート構造物には重要かつ代表的なひび割れを限定している。ひび

割れに関していえば、近づかないと見えない程度のもので、構造物に大きな影響を与えかねない大きなものである。大きなひび割れは簡単に目で見て判断できるが、小さいひび割れだとドローンの撮影でも判別が難しいことがある。接近して撮影することで捕捉することも可能だが、接近することで構造物との接触の危険性があるため困難な要素が大きい。現状、ドローンの操作は有人によるものなので、どうしてもヒューマンエラーによる何らかの危険性は孕む。展望としては自動飛行によって決められた飛行ルート、撮影角度などを設定することで、対象物を毎回同じように観測し正確に比較できる。しかし、本研究では有人操作による撮影のため、3次元モデルの誤差が生じてしまう。また同じ対象物でも撮影時間や撮影日を変えることで全く同じ3次元モデルが作れるとは限らないため、今後それを考慮した研究に発展させていく計画である。

(2) 既往研究

橋梁の点検に関して、ひび割れを自動で抽出する手法に関する研究は幾つかされている。本研究では擬似的に用意した損傷を画像処理でも判別するため、非常に重要な事例が盛り込まれているため、本節ではその代表的な研究に関して取り上げ紹介する。

河村ら⁴⁾は、ひび割れを抽出する方法として、原画像の2値化処理をし、ひび割れ部分とそうでない部分での変換を行った。その後これらを処理する方法として手作業の画像処理と対話型 GA システムを用いた画像処理の2パターンで検証した。ここで GA とは「個体の遺伝子および個体集団を進化させることで対象問題の最適解の探索を行う」⁴⁾としており、対話型 GA は、GA による処理過程における評価を人間が行うことで人間の完成をシステムに組み込むことが出来る。このシステムによる処理は手作業の処理よりも結果のばらつきが小さい傾向にあるが、解探索が十分に行えていない可能性があり、改善の余地を残している。

藤田ら⁵⁾は、コンクリート構造物の高精度なひび割れ自動抽出手法の提案として、グレースケール画像を前処理し、大まかなひび割れ位置や形状を抽出、そこに段階的に閾値処理を施すことで細部まで抽出するという流れを述べている。確率的弛緩法を適用した二段階自動抽出法の有効性を示しており、提案手法が優れていることを確認している。またひび割れが 0.2mm から 1.5mm 程度までのものを安定して抽出しており、1.5mm 以上のひび割れに対する有用性を検証している。

大塚・武田ら⁶⁾は、コンクリートの非破壊検査技術に新しい手法として X 線造影法を提案している。これにより鉄筋コンクリート内部に発生したひび割れの先端位置や内部形状、劣化による発生・累積したマイクロクラッ

クを検出することで劣化の定量化の可能性を見出している。造影剤を浸透させる前後の画像をデジタル化し、両者を引き算することでマイクロクラックの抽出を行っており、劣化を引き算によって検出する方法の有用性を示している。

既往研究の中にも、ひび割れの自動抽出や引き算による抽出方法の提案が行われているが、これらと本研究との違いは、画像データでの引き算(以下減算とも表記する)により対象となる損傷や劣化を抽出することで3次元での引き算に応用する狙いがある。3次元では xyz 座標で引き算が出来るため、凹凸の変化や歪みまで検出することが出来ると考えられる。また本研究では3次元化したデータを画像データに落とし込んで比較することになるが、この時点で異常などが検出できれば3次元でも活用できるはずなので、今回はそのプロトタイプ的な提案手法の構築である。

2. 研究方法

(1) 使用データ

本研究で使用されるデータは、ドローンを実際に飛行させ取得した動画をもとに SfM(Structure from Motion) 技術を利用して3次元モデル作成しそれを用いるが、本研究では実際に使用するレベルを扱いやすい2次元レベル、つまり画像として取り扱う。これは画像の時点で検出可能ならば3次元モデル同士での比較でも検出可能なことを検証する狙いがある。データの作成にあたり使用するソフトは agisoft photoscan を使用し、3次元モデル作成までのフローを図-1に示す。このフロー図において、撮影は非常に重要であり撮影を適切に行わなければ3Dモデル化は難しい。また切り分けた画像から位置情報や相対的な位置を自動的に割り出し、低密度点群として簡易的な3Dを作り出すアライメントは、3Dモデルの作成において重要でここで3Dモデルの出来の良し悪しが決まってしまう。そのため、この段階で撮影された動画から3Dモデルが出来るか否かを判断することが出来る。アライメントの段階では動画中に写った情報のほとんどが点群として表現され、オーバーフローしたものはより形を成すように、若干しか写っていないものはとりとめの点群として表示される。ここで範囲を変え、より高密度化する範囲を限定すればばらばらの点群からある程度の形を作成することが出来る。その作業が Dense Cloud と呼ばれる作業で、これによりモデリングされる物体のおおよそのモデルが完成するといってもよい。しかしこの状態ではまだ点群の集合体であるため、拡大すると点が広がり状態を詳細に見ることが出来ない。そのため点群を物体として、形として表現するために必要な

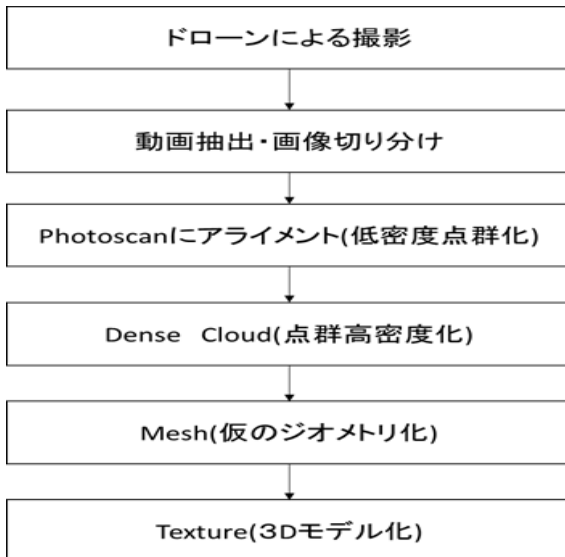


図-1 データ作成のフロー

作業が Mesh である。これにより簡易的なジオメトリ化、すなわちポリゴン体に仕上げることが出来る。このポリゴンをもとに次の作業で行う Texture 化によって 3D モデルが完成する。Texture 化されたモデルは拡大してもばらけることはないが、解像度はその分必然的にさがるので注意したい。よって 3D モデルは要求される状況に応じて作成する部分や撮影方法を考慮する必要がある。例えば橋脚のひび割れ部分をモデリングする場合は該当箇所をより詳細に動画として納める必要がある。また道路の全体を表現する場合は上空から複数視点から撮影する必要があり、斜面や盛土といった起伏や形状のあるものはより詳細に撮影する必要がある。以上を踏まえた上で、3D モデリングのフローにしたがって作成をしていく。

(2) 検証方法

本研究における検証方法は図-2 の手順に従って行われた。

対象となる構造物の、対象箇所を決定し、その部分を限定的に撮影し、図-1 のフローにしたがい SfM 技術によって 3 次元モデルを作成する。ここで 3 次元モデルが正確に作れているのかの評価を行い、不鮮明な部分があれば撮影をやり直しデータ精度を高める。データとしては、ひび割れなどの劣化が 3 次元モデルの中にも的確に盛り込まれていることを確認する。

3 次元モデルとして得られたデータを取り扱うデータレベルまで引き落とす。ここでは 2 次元化処理を行い、画像として対象箇所を含むように保存する。また比較する画像を考慮して同一精度となるように注意する。

劣化を抽出するため、過去の劣化していない状態の画像と今回作成した画像を比較する。比較方法には 2 つの画像を減算処理することで、重なっていない部分、つま

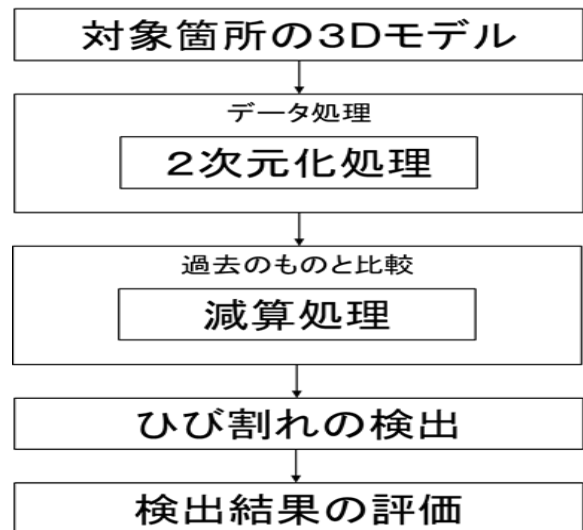


図-2 検証の手順

り劣化部分が浮き上がるようにすることが出来る。ひび割れを検出し、その劣化がしっかりと抽出されているかどうかを実画像と照らし合わせて確認する。得られた結果が有効かどうかを評価する

(3) SfM 技術と 3D モデル

本研究では SfM 技術を使用することで 3 次元モデルを作成している。SfM の基本原理は味岡ら⁷⁾によれば、「写真測量と共通するが初期条件として基準座標値を入力する以外解析はほぼ自動化されている。カメラの内外部パラメータをその過程で推定するためにキャリブレーションは不要であり、同様の理由で条件の異なる複数のカメラを用いた解析も可能である。特徴は SIFT3 と呼ばれる特徴点 4 の抽出と画像間でのマッチング機能である。適切な条件で撮影された 1000 万画素を超える画像であれば一枚あたり数百から数千点の特徴点が抽出され、画像間でマッチングされた後、各カメラの位置・姿勢の推定値と特徴点から生成された粗い点群 (Sparse point cloud) を得る。これを用いて各ピクセルの 3 次元座標を計算し、より高密度な点群データ (Dense pointcloud) を得る。この点群からメッシュデータを作成し元画像を貼り付けることで最終的な 3D データが生成される。」とされている。この 3D モデル化までのフローは図-3 になる。3D モデルは前述の通り agisoft photoscan にて作成される。3D モデルは物体を 3 次元で見ることが出来るため、対象箇所の微細な凹凸や形状が表現できる。しかし、これはメリットでもありデメリットであって、撮影方法によってはゆがみを生成し、正確な形状を表現できない場合もある。本論文では、ひび割れなどの劣化を抽出する手法の提案のために、擬似的な損傷を作成し、損傷の有無の前後をモデリングしたものを使用する。撮影時間をなるべく同一になるようにし、また撮影角度や経路が大

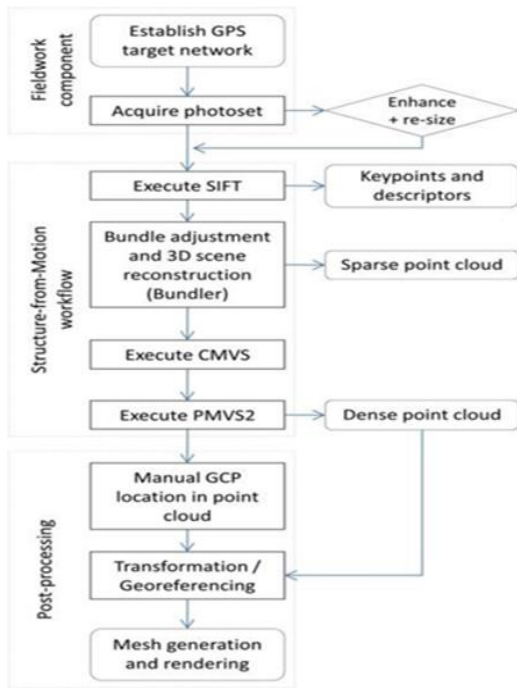


図-3 SfMのワークフロー

大きく異なるように手動で撮影した。完成した 3D モデルはほとんど差異がないようにモデル作成時に調整をし、同一モデルに近似するように作成した。実際に作成した 3D モデルが図4になる。図4における (a) は擬似的な損傷がない、健全な壁を想定している。(b) は擬似的な損傷をつけて、劣化したものを想定。ここで注意したいのが、今回擬似的につくった損傷は実際のひび割れなどと比べると大きいことである。これは劣化の抽出を明確に行うためにわざと大きくしてある。

(4) 減算処理

画像同士の引き算に用いる処理が減算処理である。これはピクセル単位に RGB 値を減算して合成することであり、色が重なる部分は暗く表示される。画像の減算は以下の式で表される。

$$g(x, y) = f(x, y) + b(x, y) \tag{1}$$

$$h(x, y) = g(x, y) - b(x, y) \tag{2}$$

$$h(x, y) = [f(x, y) + b(x, y)] - b(x, y) = f(x, y) \tag{3}$$

この原理から、抽出した箇所のみを減算して検出することが可能。減算をする上で重要なのが、比較する 2 画像がいかに同じシチュエーションで比較できるかである。

抽出したいポイントを抽出するには比較画像の各所の RGB 値が同じである必要がある。そのため、画像自体の若干の角度のずれでさえも検出してしまうので、留意



(a) 健全な壁



(b) 擬似損傷のある壁

図-4 検証に使用する 2次元化されたモデル画像

すべき点である。

3. 検証結果と考察

(1) 劣化・損傷の抽出

図2のフロー図に基づき、検証する。最終目標として劣化や損傷が抽出、つまり特徴的な点が把握することを目指す。様々なデータを取り 3D モデルを作成するが、中にはゆがみや形状が正確ではなく、欠損したデータも多いので、基本的には作成に成功したデータのみを使用する。もともと対象とするデータ数は多くないので、本論文では一つの対象データを扱うこととする。

- ① 3D モデルの作成に関して。対象となる箇所は金沢大学構内の橋、その橋脚部分。撮影日は 2016 年 1 月 26 日に Phantom3 にて撮影。動画の長さは 1 分程度。これを、擬似的損傷をつける前とつけ



図-5 撮影経路

た後 で同様の撮影方法で撮影。撮影経路は図-5の通りに飛行させた。撮影精度としては比較的良好であり、比較するには十分なデータが得られた。

- ② データ処理に関して得られた 3D モデルは、ひとまず 2次元処理画像として保存する。このときに留意すべき点は 2画像共に比較できるように画像の向きなどを考慮して保存する。(出来上がったデータは図4)
- ③ 減算処理に関して。この段階で劣化が抽出できるのか検証する。用いるデータは図4を使用し、減算処理加工を行い、特徴点を浮かび上がらせる。図-6は減算処理加工の終わったデータであり、黒く染まっているところは RGB 値が同様のために黒くなる。すなわち変化せず合致している部分になる。ここで白くなっている部分は、RGB 値の重なっていない部分、すなわち変化の起こった部分に相当する。
- ④ ひび割れの抽出に関して。図-7は変化の部分拡大したものになる。赤い丸で囲まれた部分は変化として抽出できた部分、すなわち劣化や損傷部分になる。これによれば劣化や損傷は、画像の前後で引き算することが可能であり、得られた部分はそれらを確認するには十分な精度を持っている。図4では予め擬似的に線をつけておき、そこに更に擬似的に劣化や損傷を加えて比較している。これは既存のひび割れなどの劣化や損傷から更にどれだけ劣化や損傷が進行しているのかを引き算で確認することが出来るためである。今回の引き算では、既存の線の重なりが甘く、減算処理をしても残存してしまっている。これも変化として抽出してしまっているため、まだまだ精度としては甘い部分がある。
- ⑤ 検出結果の評価に関して今回の方法で抽出した場合、撮影時に完全に一致した方法で撮影できて



図-6 減算処理後の画像



図-7 抽出された変化

おらず、出来上がったデータ自体のゆがみなども検出してしまう結果となった。しかし、前後で変化が抽出できているので、抽出方法としては優れている。今回は劣化や損傷の大きさが本来のひび割れと比べても大きいので、今後より小さい変化を抽出する必要がある。

(2) 考察

フローに則って検出した場合、得られた変化は明確に抽出できるが、抽出される変化の精度はデータの正確性に依存してしまうので、より正確なデータの作成が必須となる。また、今回は検出システムのプロトタイプ型の方法であるため、劣化や損傷が現実のものより大きくしてあるので、ひび割れの 0.3mm 程度の細かい劣化や損傷を発見するには、ドローンの飛行を自動化する必要がある。

4. 結果と展望

本論文では、劣化や損傷をその前後で比較することで抽出することに成功し、その精度は高いが、現状擬似的に表現した劣化や損傷が実際のものより大きいので、今後より小さなものまで抽出する方法を検討していく必要がある。また、作成したフローではまだまだ細かいところの比較はできないので、より細分化する必要がある。今回は擬似的なものを抽出したので、今後はひび割れを検出できるのか試行錯誤する。そして最終的な展望としては3次元モデルを用いて抽出することである。現状は3次元の引き算が可能なフローが完成していないので早急に手法を確立させることが必要。更に今回は日照時間や天候などを考慮していないため、実際の劣化や損傷を的確に抽出できるのかは検討が必要である。

参考文献

- 1) Javier Irizarry, Masoud Gheisari, Bruce N. Walker: USABILITY ASSESSMENT OF DRONE TECHNOLOGY AS SAFETY INSPECTION TOOLS, Journal of Information Technology in Construction, ISSN 1874-4753, 2012
- 2) João Marcelo Teixeira, Ronaldo Ferreira, Matheus Santos, Veronica Teichrieb: Tele-operation Using Google Glass and AR.Drone for Structural Inspection, IEEE, pp.34-35, 2014
- 3) 西村正三, 木本啓介, 松岡のどか, 大谷仁志, 緒方宇大, 松田浩: 橋梁維持管理における遠隔測定法の開発と評価, 応用測量論文集, 2013
- 4) 河村圭, 宮本文穂, 中村秀明, 佐藤亮: 対話型遺伝的アルゴリズムによるデジタル画像からのひび割れ抽出, 土木学会論文集, No.742 /VI-60, pp.115-131, 2003
- 5) 藤田悠介, 中村秀明, 浜本義彦: 画像処理によるコンクリート構造物の高精度なひび割れ自動抽出, 土木学会論文集 F Vol.66 No.3, pp.459-470, 2010
- 6) 大塚浩司, 武田三弘: コンクリート構造物の新しい非破壊検査技術 —X線造影法—, 土木学会論文集 Vol.40 No.11, 2002
- 7) 味岡収, 渡邊弘行: 画像解析による3次元形状復元の可能性についての再考, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014

(?受付)