

報告 小型自律飛行機による構造物の検査手法に関する研究

酒井 通孝^{*1}・関 雅樹^{*2}・佐藤 幸一^{*3}

要旨: 土木構造物の健全度調査において、直近目視での全般検査が困難な場合がある。また、一部ではヘリコプターによる鉄道構造物の広域検査も実施されている。一方、災害時の被災箇所の把握のための人工衛星等によるリモートセンシング技術研究もこれまでに報告されている。本稿では、構造物検査の補完あるいは被災箇所把握の検査手法として、GPS を活用した小型自律飛行機を活用した検査手法に関する研究内容を報告する。

キーワード: 全般検査, 広域検査, リモートセンシング, 小型自律飛行機, GPS

1. はじめに

土木構造物の維持管理のための検査において、長大橋りょうの上部工、下部工並びに自然斜面等の中には、検査員が直近で目視検査を実施することが困難な場合がある。この場合、双眼鏡による遠方からの目視、仮設足場の設置、時にはヘリコプターを活用しての検査を行っている。

ヘリコプターによる検査は幾つかの鉄道事業者で採用されている。特に、広域にわたる急峻な斜面の落石管理、斜面安定検査に有効であり、これまでも研究報告¹⁾がなされている。しかしながら、足場設置では主に設置費用に関する理由、ヘリコプター利用では広域でなく限定対象物だけの飛行計画・実施となる場合、非効率性および柔軟性に欠ける短所が明らかである。

一方、地震や降雨による被災状況把握には、鉄道事業者の場合には沿線に配置されている関係社員による目視確認が主に実施される。予め設置されている変状検知システムの動作確認は例外であり、徒歩等による現地へ出向いた被災確認となる。このため、被害発生の有無から始まって被災時には全体像を把握するには多くの時間を要した。このため飛行機、ヘリコプターによる現地調査が実施される。また、大規模な災害時には人工衛星による画像情報も活用され

ている²⁾。2004 年の新潟県中越地震時には、航空測量会社のリモートセンシングによる広範囲な被災状況³⁾⁴⁾が報告されている。最近では、人工衛星での画像情報も分解能も高くなっている。しかしながら、鉄道事業者の場合には、自社の鉄道構造物の被災状況の把握が一義的であり、しかも即時性が要求される。このため、現在有効なヘリコプターに対して、補完する目的にて鈴木ら⁵⁾⁶⁾が研究開発に取り組んでいる GPS を活用した小型自律飛行機に着目し、直接目視が困難な場合の検査の補完としての適用・有用性および鉄道構造物の被災状況把握の実効性の 2 点について検討したので報告する。

2. 鉄道土木構造物の検査

2.1 検査の種類

鉄道土木構造物の検査は、大きく分けて、「全般検査」、「個別検査」、「広域検査」の 3 種類に分類される (図-1)。

全般検査は、構造物の竣功時または初期検査データを整備するために総数を対象に実施される「特別全般検査」を除くと、2 年に 1 回以内の頻度で行う。構造物の変状もしくは既変状の進行の有無及び路線周辺の環境変化を補足し、機能低下しているもの、またはそのおそれがある

*1 東海旅客鉄道 (株) 総合技術本部技術開発部 工修 (正会員)

*2 東海旅客鉄道 (株) 総合技術本部技術開発部 博(工) (正会員)

*3 三菱電機 (株) 鎌倉製作所 工修

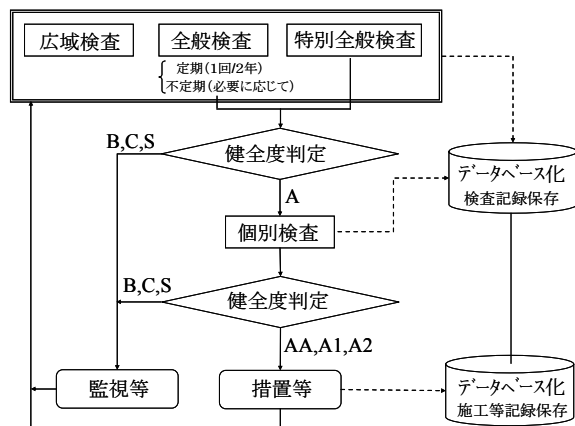


図-1 健全度判定フロー

ものを抽出する。主として徒歩巡回による目視により行い、健全度判定を A, B, C, S で区分する。広域検査は、沿線周辺環境の変化を把握するために、河川の流域、沿線自然斜面、トンネル坑口付近等を主にヘリコプター等により行う。

全般検査や広域検査において「A」と判定された構造物は必要により個別検査において健全度判定を AA, A1, A2 に区分する。個別検査においては、変状原因や機能程度を把握し、補修・補強等の対策の方法、ならびに対策時期を定めるために精度の高い検査を行う。一般的に、個別検査に従事する社員は、構造物の健全度評価を専門的に調査分析する検査熟練者を配置している。

2.2 検査実施における現状の課題

鉄道構造物の検査実施段階では、検査員による直近目視検査が困難な場合がある。例えば、長大橋りょうの鋼トラス上弦部材、河川上の PC 橋りょうの下部床面、長大橋りょうの根固め工、のり面の長い急峻な自然斜面の検査の実施があげられる。これらの箇所での全般検査では、通常の定期検査が困難であり、遠方からの双眼鏡等による目視検査に加えて、特殊な補完方法が採用されていた。特殊な補完方法としては、検査員用足場板の敷設、河川からのボート等による接近、ヘリコプターによる斜め航空写真の実施があげられる。これらの特殊な検査の実施は、検査実施付帯費用が高いこと、検査時期に

制約があることから、検査実施の効率性が低い。これは、検査の定期的な継続性の課題となっており、検査結果の精度にも影響を与えることが危惧されてきた。

このため、検査員の目視検査に代わるロボット技術の適用が必要とされてきた。適用事例研究は古く、ラジコン操作による模型ヘリコプター⁷⁾または小型気球⁸⁾を用いての斜面調査手法がある。

そこで、現状の課題の解決策として、全般検査の目視検査に着目し、また近年の画像処理技術の急速な進歩から、ロボットによる画像撮影とその処理技術の開発に取り組んだ。

3. 航空機等の画像による構造物検査

3.1 広域被災状況の把握

地震、台風時等の異常豪雨による災害時には、被災状況を迅速に把握することは、運転再開の可否、早期復旧作業の計画策定と実施のために必要である。現在、鉄道事業者では関係社員による安全確認巡回と調査派遣により対応している。しかしながら、被災箇所が広域の場合には、航空画像を活用することにより被災状況確認が迅速に情報収集可能となる。航空画像としては、人工衛星による衛星画像、航空機（飛行機、ヘリコプター等）からの航空機画像がある。衛星リモートセンシング⁹⁾に関して、地表面の電磁波を感知するセンサには、光学センサとマイクロ波の能動型センサ SAR（合成開口レーダ）の2種類があり、それぞれの長所短所がある。光学センサでは、晴天時のみに有効であるという欠点があるものの、可視化した画像は判読しやすい。一方、SAR は天候・昼夜の区別なく観測可能であるが、画像判読には専門知識が必要となる。このため、光学センサと SAR の両者を併合して使用することが効果的といわれている。

衛星画像は昨今ネット上でも簡単に見ることが可能である（例えば、Google 社の地図サービス：<http://maps.google.com/>）。市販サービスとしては、商用衛星を活用した QuickBird（Digital

Globe 社：販売代理店 株式会社 NTT データ
GC : <http://www.geocontents.jp/index.html>) などが
あげられる。

衛星画像は衛星の広域な撮影能力を生かして
短時間で画像の入手が可能であり、コストも 5
千～1 万円/平方 km 程度と比較的安価である。し
かし、解像度が数 m～数百 m と精度が低く、撮
影時の天候に画像が左右される。また、撮影時
期が決まっており、鉄道事業者はタイムリーな
情報を得ることができない。写真-1 に富士川橋
りょう付近の衛星画像の例を示す。この画像か
らは、継続的な河川の流路の変化や沿線周辺状
況変化の広域的な把握は可能である。しかしな
がら、橋りょう下部工である橋脚の状態や根固
め工の健全度まで把握することは困難である。
当然ながら洪水時の現況把握には活用できない。

飛行機から撮影した画像の例として、衛星画
像と同様の富士川の画像を写真-2, 3 に示す。
写真-3 は橋りょうの一部分を拡大したもので
ある。飛行機画像は衛星画像と比較すると精度
はあがるものの、飛行のためのコストが高い。
また飛行する際には飛行許可申請が必要となり、
迅速な被災調査としては制約が多い。飛行機は、
航空法により対地高度は最低 300m に制限され
ている。

一方、鉄道の広域検査ではヘリコプターが一
般的に利用されている。検査員が搭乗し直接被
災状況を把握することが可能であり、被災箇所
の正確な画像撮影と画像処理技術の高度化によ



写真-1 衛星画像（カラー-2.5m 解像度）

りヘリコプターによる被災状況の把握は最も有
効であると思われる。特に、ヘリコプターの使
用は、その効果と運用性を勘案すればコスト的
にも大きなものではない。しかしながら、全般
検査の補完としては効率性、柔軟性に欠ける。
また、ヘリコプターでは全般検査が不可能な対
象物があることは否めない。さらに、降雨時や
夜間飛行はほとんど不可能であることから被災
状況把握方法としても完全なものではない。

このため、全般検査の補完および災害時の被
災状況把握等、必要な場合に即時に飛行でき、
安全で、低コスト、高精度かつ簡易に画像を取
得可能な方法として、最近のロボット技術の一
例でもある小型自律飛行機に着目した。

3.2 小型自律飛行機⁵⁾⁶⁾

GPS 測位機器をはじめとする電子機器の急速
な進歩により、無人航空機（Unmanned Aerial
Vehicle）が世界的に盛んに開発されている。し
かし、これらは軍事的な目的で開発されたもの
が多く、機体の離着陸用の滑走路の確保、上空
飛行中の安全面からの制約がある。このため、
検査用小型飛行機として利用できる機体の大き
さは、重量は概ね翼幅 1m、重量 1kg 程度である。



写真-2, 3 飛行機画像

この目的により、鈴木らは 2004 年度から小型自律飛行機の開発を実施している。

本研究では、この小型自律飛行機を使い、「自律飛行」と「リアルタイム画像転送」の機能に着目して新しい検査手法として維持管理への適用を試みた。特徴として、小型かつ軽量であり、手投げで発進できるため、乗用車等に積載可能であることから、いつでもどこでも飛行が可能であることがあげられる。小型自律飛行機のシステムを図-2 に示す。

「自律飛行」のためには、GPS 受信機、慣性センサ等より、飛行中の位置・速度姿勢を把握し、基本的には当初設定した飛行経路に基づいて自動操縦装置により、自律的に飛行する。このとき、地上局とデータ通信により飛行状況のモニタおよび飛行経路の変更も可能である。

撮影画像としては、高画素数のデジタルカメラまたはビデオカメラを搭載する。夜間撮影用



図-2 小型自律飛行機のシステム

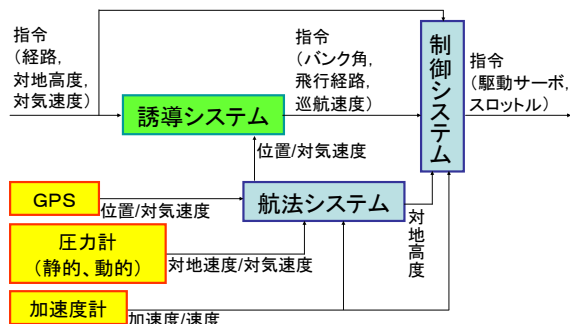


図-3 誘導・航法システム

として、近赤外線カメラも搭載可能である。なお、小型飛行機による撮影画像を無線通信によりリアルタイム伝送も可能である。地上局は、小型自律飛行機の飛行状況や搭載カメラの映像をリアルタイムでモニタし、必要に応じて飛行経路変更の指示を送信する。また、異常時には手動操縦機能やパラシュートによる回収装置作動の機能がある。

小型自律飛行機の動力源は電動モータであり、燃料が不要で取り扱い易く、騒音も小さい。また、電動ブラシレスモータとリチウムポリマーバッテリーが使用されており、小型・軽量化が図られているため、より高性能なカメラの搭載が可能である。小型自律飛行機の誘導・制御・航法システム構成を表すブロック図を図-3 に示す。GPS、ジャイロ、加速度計、圧力計の各センサからの出力と航法系により位置、姿勢、対気速度が推定される。推定された位置、対気速度と指令値からの誘導系によりバンク角や飛行経路、巡航速度の指令値が計算される。飛行制御系では、この指令値に追従するように、各操舵翼の駆動サーボ、スロットルへの入力値が計算されるというシステムとなっている。

3.3 小型自律飛行機の活用

小型自律飛行機の活用のための基礎実験として、東海道新幹線富士川橋りょうおよび当社研究所内の新幹線構造物を模擬した実物大盛土で飛行確認試験を行った。富士川橋りょう付近において小型自律飛行機を飛行させ、搭載したビデオカメラ (40 万画素動画カメラ) およびデジタルカメラ (300 万画素静止画カメラ) で撮影 (写真-4) を行った。富士川橋りょうは全長 1,373m の下路トラス橋りょうで、27 基のコンクリート橋脚を有する。過去においては、台風等の増水時に橋脚が洗掘され数週間程度の徐行を余儀なくされた履歴がある。

事前に飛行計画を策定し、PC 上に飛行経路を入力し、富士川上空約 100m、水平には線路から 200m 以上離して時速約 60km で約 30 分程度自律飛行させた。本試験飛行では、昼間の営業時間



写真-4 小型自律飛行機の搭載カメラ
による富士川橋りょう

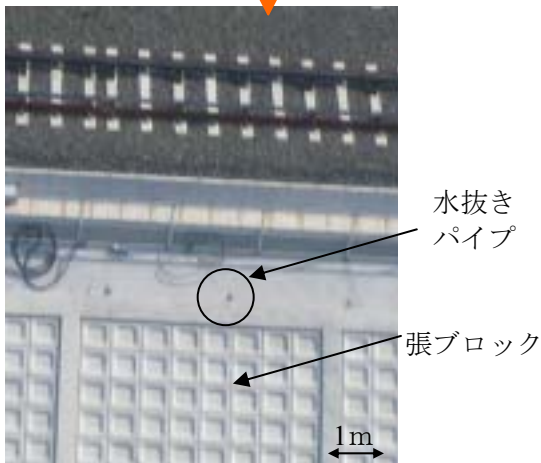


写真-5, 6 搭載デジタルカメラによる
実験線盛土

帯であり、安全のために低空飛行は行わなかった。全景写真のみ撮影であったが、比較的高い高度からの撮影でも、橋りょうの根固め工の健全度が把握できた（写真-7）。

実験段階では営業列車の上空を飛行できないため、安全面で何も制約のない当社研究施設の

実験線盛土を対象として盛土真上での飛行を実施した。試験飛行では高度約 30～50m の低空飛行試験を行った。本試験ではデジタルカメラ(600万画素)を用いて撮影を行った（写真-5, 6）。写真-6 から 500×500 の張ブロックの状況が詳細にわかるが、φ60 の水抜きパイプの詳細な判別までは困難である。

今回の試験では 300～600 万画素のカメラを使用した。最近の技術の進歩により、大きな画素のカメラが開発されている。解像度が上がれば、より精密な画像を取得することが可能になると考えられる。

4 検査への適用に対する考察とまとめ

今回の実験線盛土上の線路真上からの飛行により初めて精度確認が可能となった。撮影から得られた知見は以下の通りである。

- 1) 小型自律飛行機により撮影したデジタル画像を用いることにより、一般の航空機画像と比較して高分解能の写真が得られた。この結果、広域検査および被災状況把握には十分適用可能と考える。
- 2) 全般検査のための計測精度に関しては、定量評価をするために、今回の撮影結果をオルソ画像処理した（図-4）。これにより、高いバンク角から撮影された画像を正射投影された画像に変換する。複数枚のオルソ画像に対して、対応点探索による画素毎の視差算出処理することで構造物の 3 次元化モデル¹⁰⁾を作成した（図-5）。3 次元モデルと実構造物を比較すると、水平計測精度は 10cm 程度、垂直方向では 30cm から数 m のオーダーであった。垂直方向の精度向上のためには、ステレオ演算時の誤対応点の除去と視差精度向上が必要であることが分かった。改善方法としては、カメラ解像度の向上、画像ごとのカメラ位置姿勢推定誤差の解消、画像歪みの改良、および撮影間隔の高速化によるオーバーラップ率の増加などが必要である。

- 3) 山間部等民家のない箇所では、至近距離からの

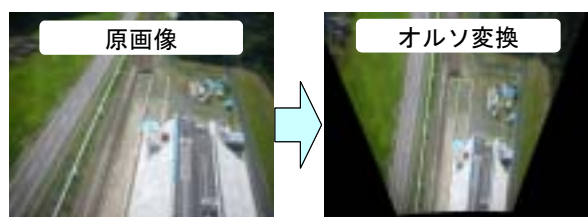


図-4 画像処理

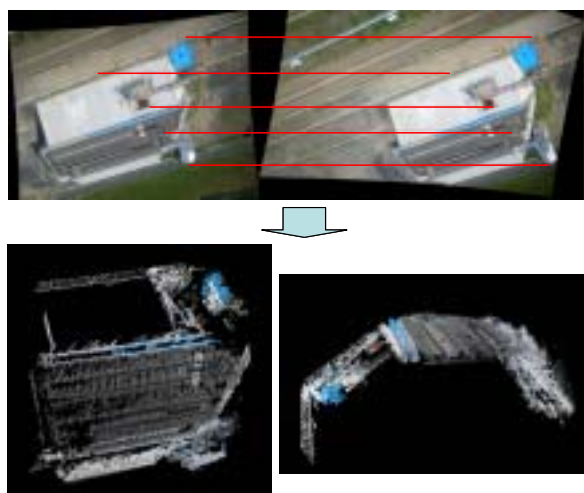


図-5 複数画像による3次元化処理

撮影も可能であるため、鋼橋りょう上弦材の健全度検査、自然斜面検査が可能である。つまり、全般検査の実施にも活用が可能である。

参考文献

- 1) 丹羽俊彦, 今井篤雄, 新川正則: 斜め写真判読による斜面災害の危険度判定, 鉄道技術研究所速報, No.81-20, 1981.2.
- 2) 能島暢呂, 松岡昌志, 杉戸真太, 神谷涼介: 地震動情報と人工衛星画像情報の統合処理による建物大破率の定量的推定方法, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, pp.1485-1486, 2005.9.
- 3) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之: 航空写真の画像解析による高速道路地震被害の把握, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, pp.493-494, 2006.9.
- 4) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 檜作正登, 岡本拓: 新潟県中越地震における高速道路被害状況と航空写真を用いた被害早期把握に

向けた基礎的検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, CD-ROM, 9p, 2005.3.

- 5) 鈴木真二, 千田泰弘: 産学連携による無人飛行機の研究開発計画, 第 42 回飛行機シンポジウム, pp.100-103, 2004.
- 6) 辰己薫・廣川類・實松洋平・鈴木真二・土谷武司・久保大輔: 小型自律飛行ロボットシステムの開発と飛行試験, 日本航空宇宙学会誌, 第 54 巻, 第 625 号, pp.41-44, 2006.2.
- 7) 森野亮宏, 今井篤雄, 土屋恂, 新川正則, 丹羽俊彦, 川口孝夫: 斜面对策における斜め写真の利用ー撮影飛翔体及び最適撮影法の開発ー, 鉄道技術研究所報告, No.1222, 1982.9.
- 8) 今井篤雄: 斜め写真の撮影と判読方法, 鉄道土木, pp.102-110, 1981.2.
- 9) 古田明広, 白木渡, 大林成行: 複数の地球観測データを統合利用した広域被災状況判読システムの開発, 土木情報利用技術論文集, Vol.15, pp.29-38, 2006.
- 10) 鈴木太郎, 目黒淳一, 瀧口純一, 佐藤幸一, 畑山満則, 天野嘉春, 橋詰匠: 小型自律飛行機を用いた高精度三次元計測, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007, 2007.5.