

報告

小型汎用ドローンを活用した橋梁点検の試み

羽田野 英明*1, 古澤 栄二*2, 松平 隆史*3, 六郷 恵哲*4

Attempts of Bridge Inspection Using Small General-purpose Drones

Hideaki HATANO*1, Eiji FURUSAWA*2, Takashi MATSUDAIRA*3 and Keitetsu ROKUGO*4

要旨：橋梁の変状部位の状況を早急に確認する簡易なツールとして、航空法の規制が少ない 200 グラム未満の小型で低価格の汎用ドローンを活用した橋梁点検を試みた。PC 橋モデルを活用した機能確認では、撮影精度をさらに向上させるために照度不足を補う必要があるものの、0.8m 幅×1.14m 高の狭隘な桁間でのドローンとカメラの操作が、操作熟度が低い技術者でも十分可能であった。実橋における実証試験では、微細なひび割れ幅の計測は難しいものの、PCT 桁橋や鋼板桁橋、プレビーム桁橋の狭隘な主桁の間に進入しての点検が十分に可能であった。

キーワード：道路橋、橋梁点検、小型ドローン、汎用ドローン

1. はじめに

道路橋の維持管理においては、橋面異状発生時の床版下面や支承周りの点検、補修部位の最新状況確認、大規模地震時における緊急点検、橋梁点検成果の再確認等、橋梁の変状部位の状況を早急に確認したい場合がある。しかしながら、橋梁点検車両の手配や橋面上の交通規制等の申請手続きもあり、迅速な作業ができない場合も多い。

平成 31 年 2 月に道路橋定期点検要領¹⁾が改訂され、ロボット等の新技術を活用した橋梁点検が可能となったが、点検支援技術性能カタログ(案)²⁾で掲載されているドローンは独自の技術ノウハウが組み込まれており、現時点では点検技術者が簡単に操作することは難しい。一方で、市販されているドローンは、GNSS 機能を搭載して操縦性を向上させ、高解像度の写真が撮影可能な機種が低価格で入手可能となっている。

本報告では、橋梁の変状部位の状況を早急に確認する簡易なツールとして、航空法の規制が少ない 200 グラム未満の小型で低価格の汎用ドローンを活用した橋梁点検の試みを紹介する。

2. ドローン活用の広がりや事故トラブル

空撮、測量、災害調査、構造物点検、農業、物流、防犯等へ、ドローンの活用が広がっている。ドローンを用いた点検の対象構造物は、橋梁、トンネル、

砂防施設、法面構造物、建物外壁、屋根、煙突、鉄塔、プラント等へ広がっている。ドローンの活用が広がることにより、墜落等の事故やトラブルも増えている。国土交通省が毎年公表している資料³⁾では、墜落や行方不明といった事故トラブルの原因として、次のものがあげられている。

- ・操縦ミス（経験不足等）
- ・飛行経路の事前確認不足
- ・バッテリー切れ（残量低下）
- ・接触（構造物、電線、樹木等）
- ・強風（突風、上空、構造物付近等）
- ・電波障害や通信途絶
- ・機体の故障（バッテリーや部品の脱落、破損等）
- ・機器の誤動作（距離測定装置等）
- ・機器制御用ソフトウェアの不具合

周囲の障害物との接触によるドローンの墜落を防止するため、接触しても転がることのできる回転球殻を持つドローンや、全周囲の障害物との距離が限界値より小さくならないよう制御されたドローンが開発されている。接触による影響を小さくするには、ドローンを軽量化することも有効である。

3. 橋梁点検で活用する小型汎用ドローンに求められる機能

橋梁の変状部位を早急に確認するような橋梁点検で必要と思われるドローンに求められる機能を以下

*1 岐阜大学工学部社会基盤工学科 客員教授

*2 (株) テイコク インフラマネジメント室 次長

*3 (株) AIR ロボ 無人航空機開発部 部長

*4 岐阜大学工学部社会基盤工学科 特任教授

に示す。

- ① ドローン操縦の熟度が低い技術者でも、事故トラブルを回避して安定した操縦ができる。
- ② 点検部位に近接してホバリング状態を保ち、そのカメラのモニター映像から点検部位の状況を遠隔で観察できる。
- ③ 飛行中にはビデオ撮影や写真撮影をすることができる。
- ④ 構造物に接触・衝突しても構造物を損傷することなく、機体も安定した飛行が継続できる。
- ⑤ 橋梁下面を点検するため、ドローンより上側の映像も取得できる。
- ⑥ 操縦者から30～50m程度（橋梁1径間分）の距離まで点検でき、狭隘な桁間を飛行して橋梁構造物に近接できる。
- ⑦ コンクリートのひび割れについては、点検時のモニター画面で幅0.5mm程度、撮影写真では幅0.2mm程度を検出できる。

4. 検討対象とした小型汎用ドローン

必要機能①～④を有するドローンとして、Mavic Mini (DJI 社製、重量199g、図-1)を2台利用した。そのうち1台は、⑤の機能を発揮できるようにカメラ視方向を図-2に示すように下側から上側に改造



図-1 小型汎用ドローン



図-2 カメラを上向きに取付けた改造機

(重量198g)した。今回の試みにおけるドローンの主要性能を以下に示す。

- ・カメラ (センサ 1/2.3CMOS)
静止画サイズ 4000×3000pixel
- ・レンズ (画角 83°) 絞り f/2.8
最小撮影離隔 1m
シャッター速度 1～1/8000 秒 (オート)
- ・最大伝送距離 2km
- ・実運用時飛行速度 1m/s 以下
- ・最大飛行時間 18分 (実運用では10分程度)
- ・実運用での飛行範囲制限
最高高度 30m, 最大距離 50m
最小撮影離隔1mでの撮影精度は0.3mm/画素で、0.1mm程度のひび割れが検出可能なカメラ仕様である。今回の試みでは、⑥および⑦の必要機能について確認を行った。

5. 橋梁点検に向けた機能確認

小型汎用ドローンの橋梁点検に向けた機能確認は、以下の4ケースについて実施した。

5.1 撮影精度の確認

撮影精度の機能確認は、岐阜大学のインフラミュージアムのPC橋モデル(図-3)で行った。図-4に示す部位(赤)を撮影箇所とし、図-5に示す指標と



図-3 インフラミュージアム PC 橋モデル

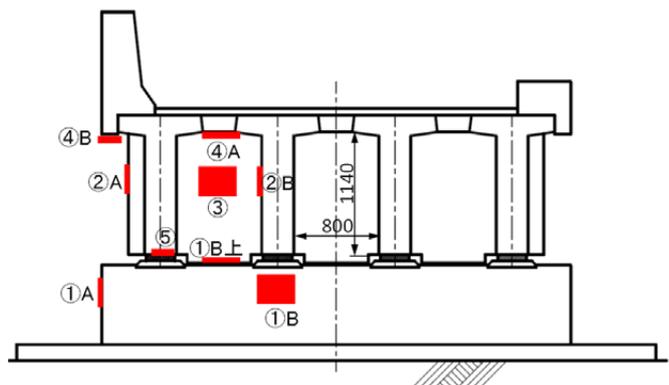


図-4 ドローンによる撮影対象箇所

クラックスケールを撮影対象とした。撮影箇所は、変状が発生しやすく、通常の維持管理で変状の早急な確認が必要な箇所を対象とした。指標には黒枠内に2.5~10mmの正方形9個を配置した。なお、操縦者はPC橋モデルから30m程度離れた位置で操縦を行った。

- ① 下部工天端の支承付近 (①A, ①B, ①B上)
- ② 桁端の主桁ウェブ (②A, ②B)
- ③ 桁端の端横桁ウェブ (③)
- ④ 桁端の床版下面 (④A, ④B)
- ⑤ 支間中央部の主桁下フランジ (⑤)

図-6に下部工天端の指標(①B上)の撮影結果を示す。この画像品質は、支承構造等の確認は可能であ

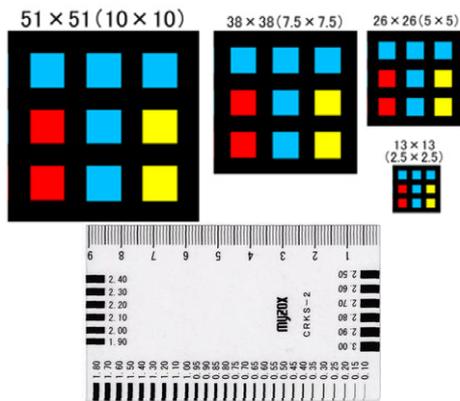


図-5 撮影指標とクラックスケール



図-6 下部工天端 (①B上) の撮影画像



図-7 ポステンPCT桁橋 (岐阜市内S橋)

るが、精度的には指標2.5mm正方形が認識できる程度であった。これは、撮影部位が主桁と端横桁に囲まれた範囲で照度が不十分で露出時間が1/12秒と長かったためと思われる。使用したドローンのカメラでは、ホバリング状態で露出時間が1/40秒以下であれば、幅0.2mm程度以下のひび割れが検出できることを後述する橋梁(図-18)で確認している。

5.2 PCT桁での機能確認

実際の橋梁での機能確認は、岐阜市内S橋の施工実績の多いポステンPCT単純桁橋(図-7)にて実施した。この橋梁は橋脚高が9m程度であり、ドローン操作は桁下の地上面から行った。上部工には指標の設置をせず、レーザー照射による計測機能の確認を行った。ここでは、主として桁端部の主桁や横桁、橋座部の点検を行った。図-8には主桁間を飛行するドローンを、ドローンが撮影した画像として図-9には床版下面・主桁・端横桁を、図-10には床版下面の状況を示す。図-8~図-10の中央縦方向の2本の緑色平行線は、寸法計測用指標として図-11に示す装置から寸法計測用指標として照射した緑色レーザー光(間隔10cm)である。図-9および図-10には、

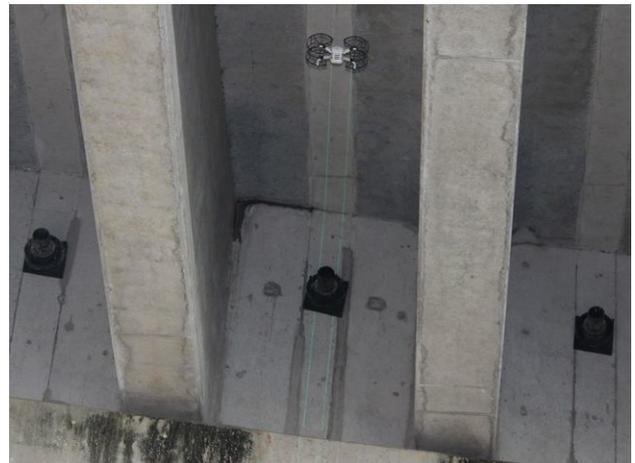


図-8 主桁間を飛行するドローン

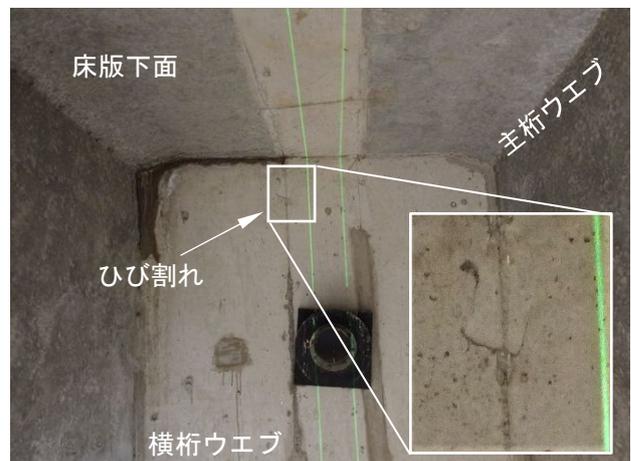


図-9 床版下面・横桁と主桁ウェブの点検画像

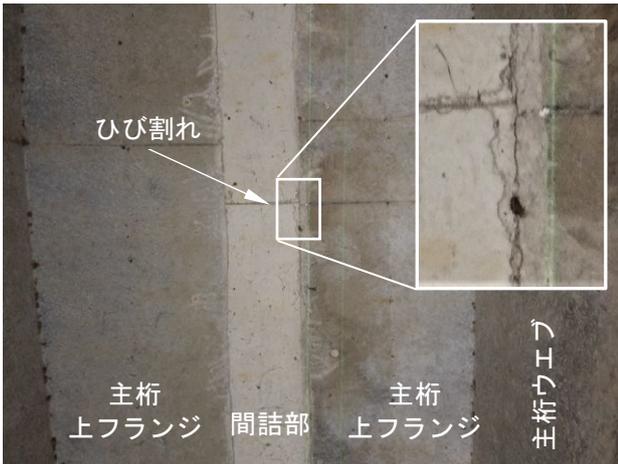


図-10 床版下面の点検画像



図-11 寸法計測用レーザー照射装置

写真から検出した幅 0.2mm 程度の乾燥収縮ひび割れ位置を示している。これらの写真についても、明度不足のため露出時間が 1/8~1/10 秒であり、ひび割れ幅を測定できるほどの精度ではなかった。

PCT 桁での機能確認の結果、1m 程度の主桁間での飛行撮影も可能で、撮影された画像はひび割れ幅を計測するほどの精度はないものの、幅 0.2mm 程度のひび割れの有無は確認でき、点検支援ツールとしての機能⑦は確保されていると判断した。

5.3 鋼鈹桁橋での機能確認

鋼鈹桁橋の桁下は、横構や対傾構などの 2 次部材が錯綜し、大型のドローンでは近接することが難しい。今回の機能確認では、横構および対傾構を通り抜ける飛行で、疲労損傷が発生しやすい対傾構や横構と主桁との接続部の補剛材やガセットプレートの近接撮影の機能を確認することとした。対象とした橋梁は、図-12 に示す岐阜市内の K 橋（5 径間連続鋼鈹桁橋）である。横構を通り抜け狭隘な桁間での点検画像を図-13 に、疲労亀裂が発生しやすい対傾構取り付け部の補剛材の点検画像を図-14 に、塗膜の劣化や現場継手部の点検画像を図-15 に、落橋防止構造が追加された狭隘な支承周りの点検画像を図-16 に示す。

鋼鈹桁橋での機能確認の結果、横構等の狭隘な部材間に進入しての飛行撮影は可能であり、微細な亀



図-12 鋼鈹桁橋（岐阜市内K橋）



図-13 狭隘な横構を通過しての点検画像

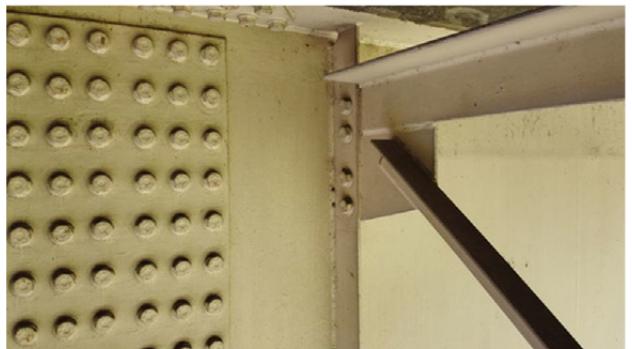


図-14 対傾構取り付け部の点検画像



図-15 塗膜の劣化や現場継手部の点検画像

裂の検出は難しいものの、鋼橋独自の腐食、ボルト脱落、破断、防食機能の劣化等の変状確認にも十分適用できる点検画像が撮影できた。



図-16 支承と落橋防止装置の点検画像



図-17 プレビーム桁橋（岐阜市内F橋）

5.4 プレビーム桁橋での機能確認

プレビーム桁橋は、外観的にはPCT桁橋に類似しているが、PCT桁橋に比べて桁高が低く、下フランジ上面が水平となっている構造特性がある。そのため、狭隘な主桁間に進入しての下フランジ上面の点検が課題である。今回の機能確認では、狭隘な主桁間に進入しての主桁下フランジ上面や支承周りの近接撮影機能を確認することとした。対象とした橋梁は図-17に示す岐阜市内のF橋（5径間単純プレビーム桁橋）である。

主桁下フランジ上面の点検画像を図-18に、支承周りの点検画像を図-19に示す。図-18では、ウェブ面の乾燥収縮によると思われる幅0.2mm程度のひび割れを、図-19では支承の塗装劣化を検出しており、プレビーム桁橋での変状確認にも十分適用できる点検画像の撮影ができた。



図-18 主桁下フランジ上面の点検画像

6. 衝突回避等の安全対策

小型汎用ドローンは、航空法の規制は少ないが、橋梁点検に活用する場合には、橋梁近傍の歩行者や車両への接触や衝突回避、あるいはドローンが河川内へ落下した場合の回収方法などを考慮しておく必要がある。以下にその対策のアイデアを提示する。

6.1 飛行範囲の制約対策

跨道橋の桁下面の点検では、桁下を通行する歩行者や車両に対する安全対策として、図-20に示すような2本の制御紐を利用して、ドローン飛行範囲を制約する対策が有効と思われる。なお、橋梁を横断する紐はドローンで張り渡し、適切な位置に重りを付けて形状を安定させた。

6.2 ドローン落下時の回収対策

大規模な河川を渡る橋梁では、ドローンが河川内に落下した場合の回収対策として、図-21に示すような釣竿を利用した1本の制御紐（釣糸）を利用して、転落したドローンを回収する対策が有効と思われる。



図-19 支承周りの点検画像



図-20 飛行範囲の制約対策

6.3 目視外飛行での安全性確保

狭隘な桁間に進入しての画像撮影は、操縦者からの目視が難しい場合がある。そのような対策として、図-22に示すように監視用のもう一台のドローンを



図-21 ドローン落下時の回収対策



図-22 目視外飛行での安全性確保

活用して、目視外飛行を支援することが有効と考えられる。

7. 機能改良に向けた提案

これまでに述べた機能確認や安全対策を踏まえて、小型汎用ドローンを橋梁点検に広く利用するためには、さらに以下のような機能改善が求められる。

- ① 撮影用の照度確保：ライトの実装あるいは別のドローンにカメラの代わりにライトを搭載し照射する。
- ② 画像からの寸法計測：直径 20mm 程度のグリーンレーザー円を照射しスケール代替させる。
- ③ 鮮明な画像取得：カメラの性能を向上させる。
- ④ ドローンの稼働時間の延長：現状では実質 10 分程度であり、バッテリーの性能を向上させる。
- ⑤ 耐風安定性の向上：現状では風速 3m/s 程度の適用が限界であり、制御性能の向上が必要である。なお、試用したドローンを構造物の点検場所に容易に近接させることができる風速は、風力階級 2（風速 1.6m～3.4m/s、顔に風を感じ、木の葉が動くレベル）である。
- ⑥ 小雨の中での利用：現状では小雨での利用は難しいため、防水性能の向上が必要である。

8. あとがき

ここでは、維持管理で求められる迅速な橋梁の損傷確認の支援ツールとして、航空法の規制が少ない 200 グラム未満の小型汎用ドローンを利用した橋梁点検の検討結果や、ドローン活用の事故トラブルを踏まえた安全対策と機能改良に向けたアイデアを報告した。

PC 橋モデルを活用した機能確認では、撮影精度をさらに向上させるには照度不足を補う対応が必要と思われるものの、0.8m 幅×1.14m 高の狭隘な桁間でのドローン・カメラ操作は、飛行操縦経験が 1 時間程度の操作熟度が低い技術者でも十分可能であることが確認された。また、30m 程度離れた位置からのドローン操作については、低速飛行モード（C モード）を使うことで比較的容易であり、桁間に隠れた撮影用ドローンの動きをもう 1 台のドローンでモニターし、撮影部位との離隔距離等を確認することで、効率的な撮影ができることが明らかとなった。

実橋における実証試験においても、微細なひび割れ幅の計測は難しいものの、PCT 桁橋や鋼鉄桁橋、プレキャスト桁橋の狭隘な主桁の間に進入しての点検が十分に可能であることが明らかとなった。今回の試用では、ドローンのバッテリーの制約もあり 30 分程度の飛行であったが、橋梁の変状部位の状況を早急に確認する簡易なツールとしては有効であると判断した。

小型汎用ドローンを利用した橋梁点検が気軽に利用できるようになれば、現地踏査や点検計画の検討段階、事前の損傷程度の全体把握などにも活用できる。遠望目視でも確認できない桁端部の事前確認ができれば、例えば、詳細計測が必要な損傷の有無、大量の土砂堆積、ハチの巣の有無など事前に備えることも可能となる。今後、小型汎用ドローンを利用した橋梁点検は、橋梁維持管理の有力な支援ツールとなることが期待される。

謝辞

小型汎用ドローンの近接撮影に際してご支援いただいた岐阜県岐阜土木事務所ならびに岐阜市役所の関係者の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，2019.2.
- 2) 国土交通省道路局：点検支援技術性能カタログ（案），2019.2.
- 3) 国土交通省：平成 31 年度 無人航空機に係る事故トラブル等の一覧（国土交通省に報告のあったもの），2020.3.