論文・報告

ドローンを利用した橋梁点検システムの開発

～マルコ TM の概要と今後の展開～

Development of a Drone Bridge Inspection System, MARCO TM

金平　徳之 *1
Noriyuki KANEHIRA

林　篤史 *2
Atsushi HAYASHI

平井　正之 *2
Masayuki HIRAI

樫本　祥 *3
Sho KASHIMOTO

川田テクノロジーズ㈱技術研究所（以下，当研究所）では，NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託を受けて，ドローンを利用した橋梁点検システムの開発を行った。このシステムは，橋梁の下側を飛行し，ドローンの上部に取り付けたカメラで床版や桁の画像を迅速かつ網羅的に取得する高精細画像取得機能と，飛行して鋼橋に磁着し点検アームを展開して，遠望からでは確認できない部位の近接画像を取得する橋梁着脱機能を有する。プロジェクトではまず，従来点検の中でのドローンの有効な活用方法を検討し，それをユースケースとして設定した。そしてそのユースケースからシステムへの要求仕様を抽出し，装置の開発を行った。さらに開発したシステムに対して実橋での実証試験を繰り返し行い，有効性の確認や運用性向上のための改良を行った。本稿ではこのプロジェクトの成果概要を説明するとともに，橋梁点検へのロボット活用に向けた今後の展望を述べる。

キーワード：ドローン，橋梁点検，インフラ維持管理

1．はじめに

ドローンは３次元空間内での機動的な移動を特徴とする飛行体である。空からの俯瞰映像の撮影や農薬散布，地形の測量など，幅広い分野で利用されるようになっている。この飛行体技術を橋梁点検の分野に適用し，橋梁の老朽化という社会的課題の解決の一助とすることを目標に，川田テクノロジーズ（株），大日本コンサルタント（株），国立研究開発法人産業技術総合研究所は，2014 年度から４年間にわたり，ドローンを利用した橋梁点検システム（マルコ TM）の開発を行った。

この開発プロジェクトでは，前半の２年間でコンセプトの実証を行い[1]，後半の２年間で実用化を念頭においたシステムの開発を実施した。後半の２年間については，2016 年度に運用シナリオの明確化とそれに基づいたシステムの開発を実施し[2]，2016 年度後半から 2017 年度にかけてシステム全体の実証試験を実施した[3]（**図１**）。

実橋による実証試験は，４年間で合計 24 度実施した。この実証試験を通して，シーズとニーズのすり合わせを行い，現状の橋梁点検業務で使ってもらえるシステムになるように改良や活用方法の検討を重ねた。また，実証試験では，成果品の性能試験という枠を越え，点検員が実際に運用することを想定した評価を行った。同時にドローンを点検に利用するにあたっての必要な周辺機器の開発も実施した。このようにシーズとニーズのマッチングおよび運用性の評価を丁寧に行うことで，実用性の高い成果品を完成させることができた。

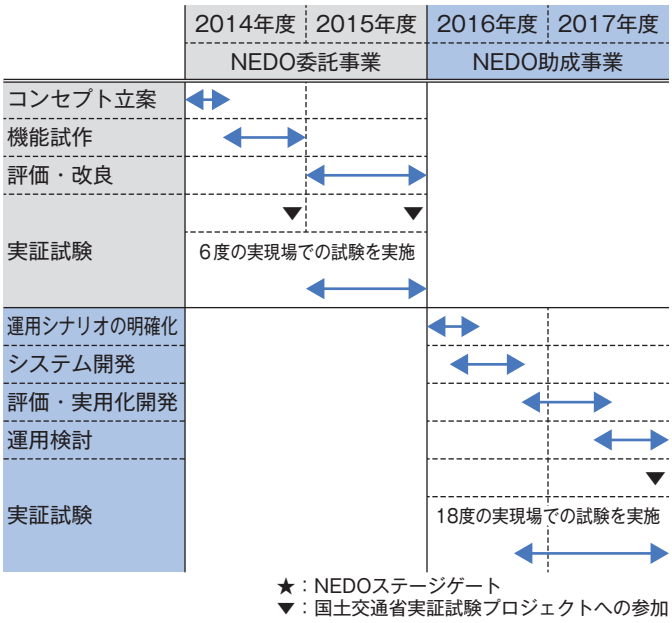


図１　開発のプロセス

＊1 川田テクノロジーズ㈱技術研究所 所長
＊2 川田テクノロジーズ㈱技術研究所 主幹
＊3 川田テクノロジーズ㈱技術研究所

本稿では，橋梁点検用ドローン「マルコ ™」について，まず設定したユースケースを説明する。次に，システム全体の概要を説明し，さらにこのシステムの実証試験での評価結果を説明する。そして最後に今後のロボットによる橋梁点検を展望する。

なお，本研究開発は，NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）が実施した「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」の一環として，NEDO より委託，助成を受けて実施したプロジェクトである。

2．ユースケース

ドローンの特徴は３次元空間での移動性と高い機動力にある。しかしながら，単に人の画像取得作業をドローンに置き換えるという考え方では逆に効率の低下を招いてしまう。これは，現行の点検要領が人による点検を想定して規定されていることや，従来の点検で行う人の作業範囲が多岐にわたっているためドローンだけではすべての作業をカバーできないことによる。そこで我々は，人による従来点検の一部にドローンを活用する方法を検討し，その活用方法を具体的なユースケースに落とし込んだ。

図２が設定したユースケースである。(a)，(b) は，赤色の部分をドローンで撮影し，その他の部分を人が従来手法で点検するシナリオである。このうち (a) は床版を点検するケース，(b) は橋梁点検車を用いて人が上部工を点検し，その続きとして橋脚の点検をドローンで行うケースである。このケースでは橋脚の下に人がアクセスできる場合，下から機体を運用することも想定している。(c) は災害等によりアクセスが困難になった鋼橋に対して，局部点検やモニタリングの目的でドローンを活用するシナリオである。このケースでは飛行して鋼桁に結合した後，安定した状態で細部点検を実施する。

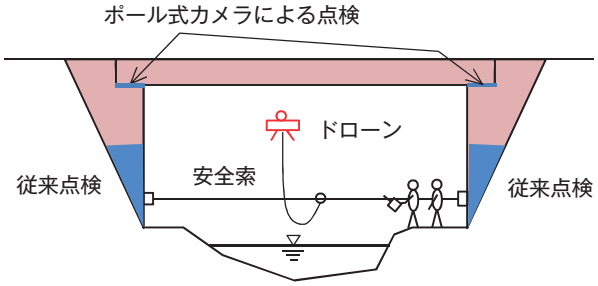
プロジェクトではここで設定したユースケースに基づきシステムへの要求事項を定め，装置の開発につなげた。

3．マルコ ™ のシステム

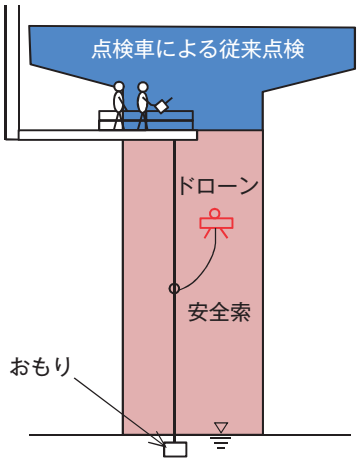
(1) システムへの要求仕様

２章で設定したユースケースに基づき，以下の要求事項を定めた。

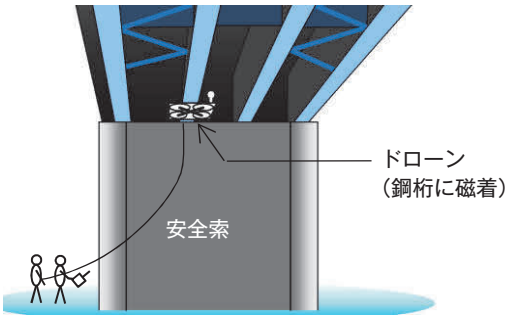
- 網羅的に高精細画像を取得できる機能と橋梁に着脱して細部画像を取得できる機能を有すること
- 橋梁点検車から運用できるサイズであること
- 橋梁近傍特有の変動の激しい風況下でも安定を保てること



(a) 高所作業車ではアクセスが困難な床版



(b) 高橋脚 / 水上橋脚



(c) 局部点検 / 定点モニタリング

図２　ユースケース

- 画像からの定量的な損傷の検出が可能となるように，取得画像に均質性が保たれていること
- システムに異常が生じた際でも機体が定められた領域から逸脱しない手段を備えること
- 後工程（画像からの損傷の判別）が効率的に行えるようなアウトプットとすること

次項にてこれらの要求仕様に基づいて開発したシステムの内容を説明する。

(2) 開発した機体

開発した機体は以下の２種類である。

① 高精細画像取得用ドローン

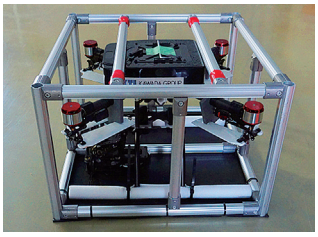
橋梁との距離を一定に保ち高精細かつ均質な画像を取得する。

② 橋梁着脱型ドローン
飛行後，鋼橋に磁着し，カメラアームを延伸して橋梁の詳細な近接画像を取得する。

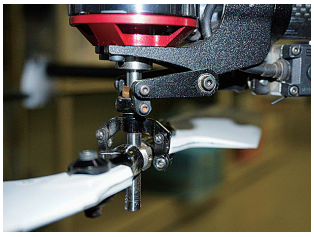
この２種類の形態は，基本となるプラットフォームの機体に，それぞれの専用モジュールを付け替える方式とした。

写真１にプラットフォーム機体の外観，**表１**に機体の仕様を示す。運搬時に宅急便で現地まで機体を搬送できるように，プロペラを折り畳み式にし，かつプロペラガードを組み立て式とした。また前項で述べた激しく変化する風況への対応として，姿勢の制御にプロペラの角度を変える可変ピッチ方式を採用した。市販のドローンは一般に機体姿勢の制御を各プロペラを駆動するモータの回転数の変更によって行う。それに対し本機体は，各プロペラのピッチ角を変えることで機体姿勢を制御する。プロペラピッチを変更した時の機体の姿勢の応答速度は，プロペラの回転数を変更した時の応答速度に比べて速いため，風況の激しい環境下で機体の姿勢を維持するためには有利となる。この可変ピッチ方式の優位性については，革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）で研究されており，本機体はその成果を利用したものである[4]。

（a）飛行状態



（b）梱包状態



（c）可変ピッチ機構

写真１　プラットフォーム機体の外観

表１　プラットフォーム機体の諸元

項　目	諸　　元
サイズ [mm]	飛行時：900×900×350 運搬時：520×520×350
質量 [kg]	5.8（バッテリ含む）
離陸質量 [kg]	7.5
電源	LiPo バッテリ：24V/8,000mAhr 35C
プロペラ基数	４基：可変ピッチ方式
飛行時間	約 10 分

写真２と**写真３**に示すのはそれぞれ，高精細画像取得用ドローンと橋梁着脱型ドローンの外観である。高精細画像取得型ドローンはプラットフォーム機体にカメラスタビライザーと照明装置を装着したものである。カメラスタビライザーは画像撮影時の対象面からの距離を計測しログに残す機能と，壁面に対して常にカメラを正対させる制御機能を有している。照明装置は床版撮影時等，対象面が暗い場合に，必要な照度を確保するために用いる。

橋梁着脱型ドローンはプラットフォーム機体に磁着装置とアーム式カメラを装着したものである。橋梁へは磁着装置に取り付けた永久磁石によって磁着する。離脱の際は，この永久磁石を鋼桁から強制的に引き離す。磁着装置にはクローラ機能が装備されており，磁着した状態で，前後･信地旋回の運動ができる。アーム式カメラは，垂直方向へのポールの延伸，カメラのパン，チルト回転が行えるようになっており，磁着後，橋梁の細部を撮影することができる。

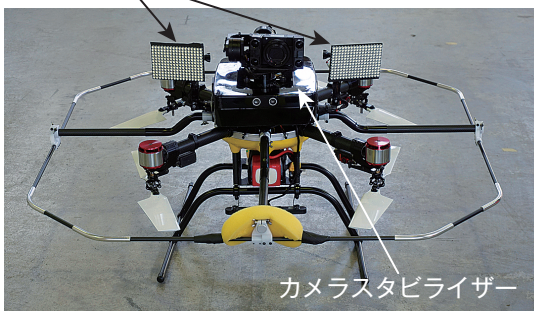


写真２　高精細画像取得用ドローン

写真３　橋梁着脱型ドローン

（3）操縦支援システム

橋梁周辺および桁下空間では GPS の取得が困難である。このため位置情報を取得することができず，操縦に熟練度が必要である。プログラム飛行も実現が容易ではない。そこで，本システムは人による操縦を操作の基本とし，これに対して操縦者への負担を低減する自動制御

システムを組み込むこととした。組み込んだ操縦支援システムは，離隔一定制御，高度制御の２種類である。これらの制御機能については本技報の技術紹介にて内容を説明しているのでそちらを参照されたい。

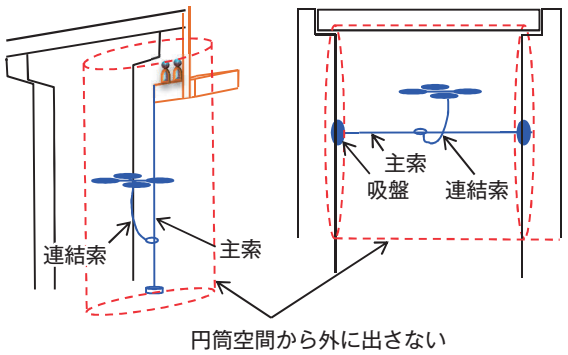
（4）安全性の確保

飛行体に不測の事態が発生すると，橋上の自動車や歩行者，周辺の施設に大きな被害を与えてしまう。したがって橋梁管理者にとっても，安全性の確保は重要な課題の一つである。我々はこの課題に，機体の係留方法を工夫して対応することとした。この方策は，ロープを用いて円筒内に飛行体の飛行範囲を制限するものであり，橋脚の点検，床版の点検の両方に適用することができる。**図３**にこの仕組みの概念図を示す。また**写真４**にこの仕組みを実際の運用に適用している様子を示す。我々はこのロープによる飛行範囲制限策をプロジェクト期間中に実施したすべての実証試験に使用し，安全を担保した。

（5）画像のハンドリング

本システムは，画像のとりもれを防ぐため，動画を撮影する方式としている。この動画から静止画を切り取り，全体画像として並べかえたものを本システムの最終出力とする。この並べかえの際に必要となるのが，静止画間の正確な位置関係の把握である。我々は当初，市販ソフトにより画像を自動でパノラマ化することを試みたが，コンクリート壁面の画像は特徴点に乏しく，自動でパノラマ化し，全体の画像を作ることが困難であった。そこで，おおよその画像間の位置を自動で算出するソフトウェアを開発し，そのソフトウェアの出力をもとに，最終的には静止画を人が並べ替えて全体画像を作る方法を構築した。画像間のおおよその位置の計算にはパターンマッチングを用いた。この方法では，切り出された静止画について，現在の静止画と一つ前の静止画について，パターンマッチングを行い，一つ前の画像が現在の静止画のどの部分にあるかを計算する。これを連続して行い累積することで，複数ある静止画間の位置関係が明らかとなる。また，対象面との距離をフライトログから読み込むことで，離隔が変化した場合でもそれに応じて移動距離を実サイズで計算することが可能である。

図４はこの仕組みの概要を示したものである。最終出力図の例は，橋脚に沿って上下１往復して撮影した結果を並べたものである。このソフトウェアの利用により画像の並べかえに必要な時間を 1/3 に短縮することができた。



（a）橋脚点検時
（橋梁点検車から機体を運用する場合）

（b）床版点検時

図３　飛行範囲制限方法の概念

（a）橋脚点検時　　（b）床版点検時

写真４　飛行範囲制限方法の実際の運用

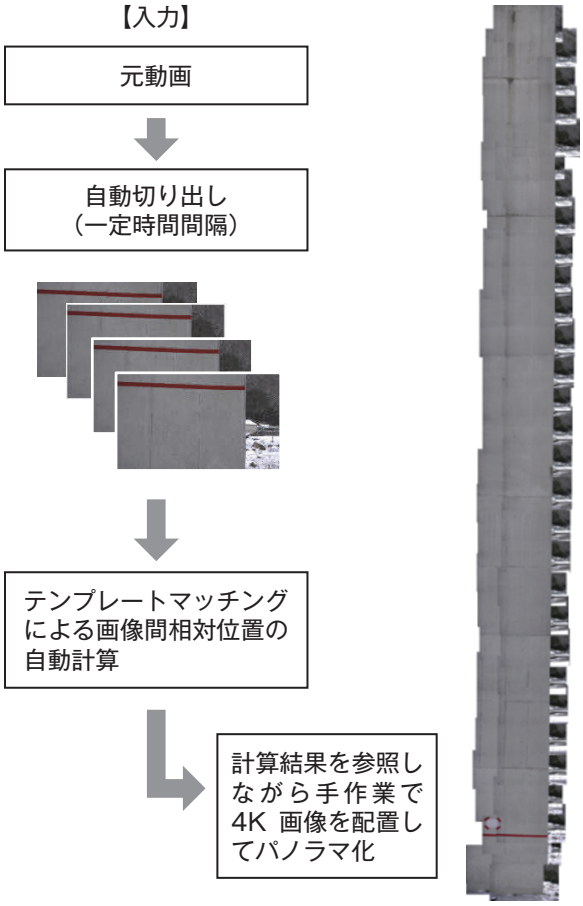
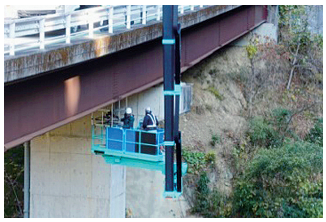


図４　画像のハンドリング方法

（a）実証実験対象橋脚



（b）桁下に展開し安全索を設置

（c）バケットから離陸するドローン

（d）バケットから離着陸し橋脚柱からの離隔を1m に自動保持しながら画像を取得

写真５　橋梁点検車から機体を運用するケースの実証試験の様子

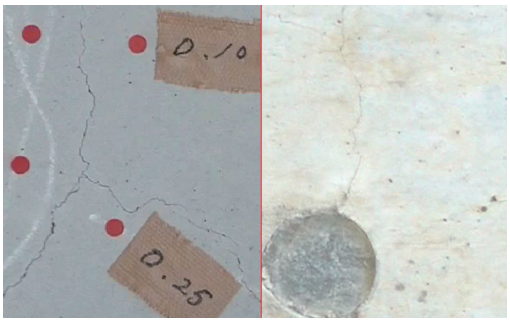
４．実証試験

2017 年度は**図２**で示すすべてのユースケースに対して有効性を確認するための実証試験を実施した。**写真５**は上部工の点検を従来点検で行い，アクセスが困難な橋脚部をドローンシステムで点検することを想定した実証試験の様子である（**図２(b)** に対応）。試験では，橋梁点検車上からドローンを離陸させ，橋脚の壁面から一定の離隔を保って飛行し，壁面の画像データを取得した。

写真６はこの実証試験で取得した画像を処理した結果の例である。ひび割れの定量的な判定は，あらかじめ取得したサンプル画像と点検画像を比較しながら行った。離隔を一定に保った画像を取得しているため，歪み直し等の画像処理による調整を行うことなく損傷を定量的に検出することができた。**写真６**の例は，離隔 1m で飛行した例であるが，0.1mm までのひび割れの検出が確認できる。従来点検とのコストの比較に関しては，外業（現場作業）において，同程度～４割程度のコスト削減効果が得られる見込みとなった。

写真７は橋梁着脱型ドローンに対する実証試験の様子である。この実証試験では，飛行，磁着，移動，マスト延伸，画像取得，離脱の一連の動作を試行し，想定したユースケースが成立することを確認した。さらに，風が強い状況下（5m/s 以上）であっても，磁着することにより，安定して対象を観察することが可能であった。運用の際は，安全索を用いて地上と係留した。なお，本ケースは災害時等のモニタリングでの利用を想定しており，コストの比較対象がなかったため，従来点検のコストの比較は行っていない。

（a）合成全体画像



（b）ひび割れ幅サンプル画像　（c）判定対象画像

・予め取得した多数のサンプル画像に基づきひび割れ幅を判定。
・0.1mm幅レベルのひび割れを検出。
※離隔1m飛行時

写真６　得られた画像の例

（a）鋼桁に磁着後，モータ回転を止め点検対象へ走行して接近

（b）得られた画像の例

写真７　橋梁着脱型ドローンの実証試験の様子

５．今後の展望

国土交通省の資料[5]には，AI・ロボットを併用した点検の将来像として，２段階での導入の構想が示されている。第一の導入段階では，人手による点検後，ロボットが点検対象の画像取得を行うことで，人による現地の記録作業の工数を削減する。第二の導入段階ではロボットが対象の点検画像を取得した後，AIによってそれらの画像を解析し，スクリーニングを行う。人はその結果を受けて現場にて診断作業を行う。これにより現地の診断範囲を縮減する。

この将来像の実現に向け，国道交通省は2018年秋より，点検記録作成支援ロボットのフィールド試行業務を開始する。我々はこの国土交通省の目指す将来像の達成に貢献するため，現在，第三者の運用に耐える機体の開発を実施中である。同時に，試行業務に参加し現場での運用を重ねることで，システムの機能・性能をより向上させていく計画である。

６．まとめ

画像を核としたAI技術などの発展およびそれらの技術の道路橋の維持管理分野への応用が進むことで，本開発品のような画像取得ロボットの重要度やニーズは増々大きくなり，道路橋の定期点検に係る省令，要領などの改正，改訂にも影響を及ぼすと考えている。近い将来，一定規模の市場が開けると見込んでおり，今後は共同開発者である大日本コンサルタント株式会社とともに，開発品を用いた点検事業，機体製造・販売・リース事業ならびに要素技術・知財展開などに係る事業化の検討を進めていく予定である。

７．参考文献

1）金平徳之，越後滋，伊豆智幸，平山博，小林大，加藤晋：“マルチコプタを利用した橋梁点検システムの開発（第２報）“，第34回日本ロボット学会学術講演会講演概要集，2016年９月．

2）金平徳之，樫本祥，越後滋，平山博，小林大，有隅仁，加藤晋：“マルチコプタを利用した橋梁点検システムの開発（第３報）“，第35回日本ロボット学会学術講演会講演概要集，2017年９月．

3）金平徳之，樫本祥，越後滋，平山博，小林大，有隅仁，加藤晋：“マルチコプタを利用した橋梁点検システムの開発（第４報）“，第36回日本ロボット学会学術講演会講演概要集，2018年９月．

4）Yasutada Tanabe et al. Multiple Rotors Hovering Near an Upper or a Side Wall, Journal of Robotics and Mecha-tronics, vol.3, no.3, pp.344-353, 2018.

5）https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/suishinkaigo2018/infla/dai2/siryou5.pdf