

橋梁着脱型マルチコプタの開発

～鋼橋点検へのマルチコプタ適用に向けて～

Bridge Mounting Multicopter for Bridge Inspection

金平 徳之^{*1}

Noriyuki KANEHIRA

平井 正之^{*2}

Masayuki HIRAI

樺本 祥^{*3}

Shou KASHIMOTO

越後 滋^{*4}

Shigeru ECHIGO

川田テクノロジーズ(株)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、マルチコプタを利用した橋梁点検装置の開発を実施中である。このシステムは、床版や桁を迅速かつ網羅的に撮影する機能（網羅的画像取得機能）と、飛行して鋼橋に磁着しカメラアームを展開することで、遠望からでは確認できない部位を近接して撮影する機能（近接画像取得機能）を有する。開発の初めの段階ではこれら2つの機能を有する機体を別々に開発し、各々に求められる技術課題を並行して解決していった。本稿では、近接画像取得機能を検証するために開発した、橋梁着脱型マルチコプタについて、設計・製作内容と実証試験の結果を説明する。なお、本論文で報告する内容は、4年間プロジェクトの2年目終了時点での成果である。

キーワード：マルチコプタ、橋梁点検、インフラ維持管理、近接画像、非 GPS

1. はじめに

この論文では、鋼I桁橋に磁着し、桁や支承の近接画像を取得する飛行ロボット—橋梁着脱型マルチコプターの設計内容と製作結果及び実証試験での評価結果について説明する。この開発はNEDOの委託を受けて2014年度から2018年度にかけて実施しているものである。本稿の執筆時点（2016年度）では、前半2年間の初期開発期間を終え、中間審査を通過し、後半2年間の開発を実施しているところである。開発には、研究代表である川田テクノロジーズ(株)の他、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、(株)エンルートの3機関が参加している。

2. システムのコンセプト

(1) 背景

建設後50年を経過した橋梁の割合は今後10年間で現在の2割から4割に急増する。特に橋長15m未満の橋梁ではその約半数が建設後50年を経過すると推定されている。今後適切な維持管理が行われなければ、橋梁の機能不全や崩壊が発生し、社会に影響を及ぼす危惧があることが指摘されている¹⁾。これに対して国土交通省はインフラ維持・管理の方向性を示す基本計画として、

インフラ長寿命化計画を2014年5月に取りまとめた²⁾。この中では、制度の整備とともに、センサやロボット技術等の開発・導入促進が行動計画の一つとして挙がっている。現在当研究所が助成を受けているNEDOのプロジェクトの正式名は「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」であり、上記のインフラ長寿命化計画の一環として実施されているものである。

プロジェクトへの提案に当たっては、当研究所が実施してきた橋梁点検装置の開発経験を参考にした^{3), 4)}。写真1に示すのはこれまでに技術研究所で開発をしてきた橋梁点検装置である。このうち写真1(a)は橋面から橋梁下面を点検するための簡易橋梁点検装置である。幅員10m以下の橋梁の点検を行うことができる。この装置は(株)橋梁メンテナンスが実際の点検業務に使用した実績を有する。

写真1(b)は、鋼I桁を把持し移動しながら桁や床版の画像を取得できる橋梁点検ロボット「SkyLeg」である。I桁を左右から挟み込んで移動する方式のため、大きな幅員の橋や桁下へのアクセスが難しい橋梁にも対応できる。このロボットについては、実橋を用いて実証試験を実施し、機能・性能評価まで行っている。

*1 川田テクノロジーズ(株)技術研究所 次長
*2 川田テクノロジーズ(株)技術研究所 主幹

*3 川田テクノロジーズ(株)技術研究所
*4 川田テクノロジーズ(株)技術研究所 所長

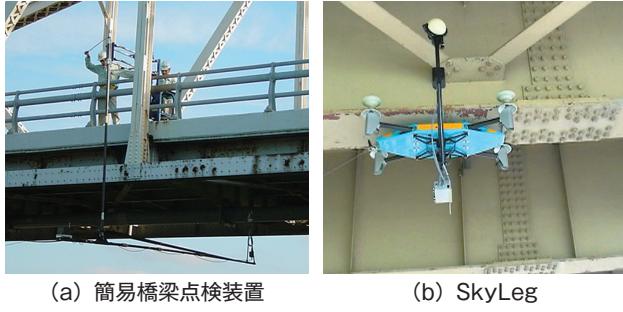


写真1 これまでに技術研究所で開発してきた橋梁点検装置

川田テクノロジーズ(株)を中心とする研究コンソーシアムの提案は、2014年7月に他の3つの研究コンソーシアムの提案とともに、NEDO事業として採択された。

(2) 開発するシステムのコンセプト

本研究開発で開発を行っているのは、2種類の機能を有する橋梁点検用マルチコプタである。一つ目の機能は、網羅的画像取得機能と呼ぶものである。これは、比較的形状の単純なコンクリート橋の床版等の点検に利用する。飛行体は橋梁下面から数メートル離隔した位置を飛行し状況画像を迅速かつ網羅的に取得する。二つ目の機能は、近接画像取得機能と呼ぶものである。鋼橋の主桁で囲まれた部分や支承等、遠望からでは確認が難しい部位の点検に利用する。飛行体は飛行して点検対象にアプローチ後、I桁のフランジ部分に磁着して点検を行う。

最終的にはモジュールを付け替えることで1台のマルチコプタでこれら2つの機能を実現することを目指している。しかしながらシステムの開発に当たっては、まずこれら2つの機能を有する機体を別々に開発し、各々に求められる技術課題を並行して解決していった。

近接画像取得機能を検証する目的で開発したマルチコプタを橋梁着脱型マルチコプタと呼ぶ。この橋梁着脱型マルチコプタは川田テクノロジーズ(株)が中心となって開発を行った。

橋梁着脱型マルチコプタのコンセプトを図1に示す。以下のような運用方法を目標としている。

- ① 橋下にアクセスできない状況を考慮し、橋上からの運用を想定する。この際、歩道の一部のみの占有で運用できるようにする。
- ② 橋上から機体を吊り下げた後、モータに電源を入れて飛行を開始する。橋上を走る自動車や歩行者の安全に配慮した運用方法である。飛行中も安全索で係留して運用する。
- ③ 機体には橋上から有線で電源を供給する。十分な点検時間を確保するためである。
- ④ 機体は、飛行して目標とする部位にアプローチ後、I桁フランジに磁着する。磁着後は移動して目標部位に接近し、カメラアームを展開して対象の画

像を取得する。

- ⑤ 操作は人が橋上から行う。
- ⑥ 得た画像データは、専用に開発する画像ハンドリングツールを用いて、点検員が処理する。

対象とする橋梁は、通常の鋼I桁橋の他、幅員の広い橋梁や箱桁上床版等、橋梁点検車では点検が困難な橋梁も念頭においていた(写真2)

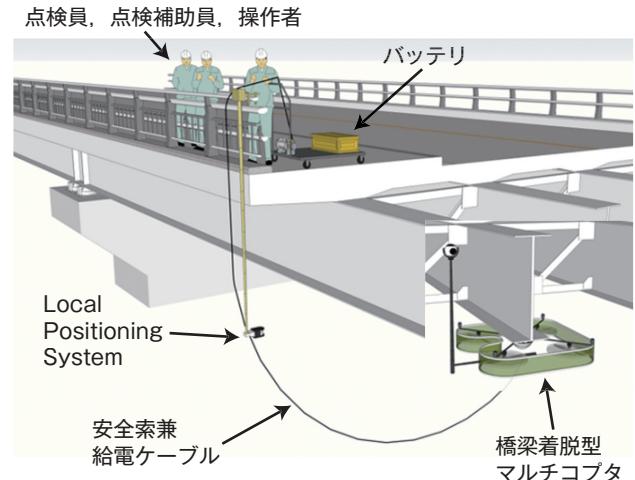


図1 橋梁着脱型マルチコプタのコンセプト図



写真2 対象とする橋梁の例(鋼橋)

3. 設計と製作

(1) システム全体の構成

図2にシステム全体の構成図を示す。システムはマルチコプタ本体、Local Positioning System、機体懸下装置から構成される。

Local Positioning SystemはGPS信号の受信が難しい橋下の環境下で、機体の位置を逐次計測するためのものである。

飛行体、着脱移動モジュール及び点検モジュールの操作は橋上から行う。マルチコプタ本体の状況は機上カメラ及びLocal Positioning System上の俯瞰カメラにより橋上でモニタできるようになっており、操作者はこのモニタリング画像を見ながら機器を操作する。

システム全体はワゴン車での運搬が可能ないように、コンパクトで軽量な設計を目指した。

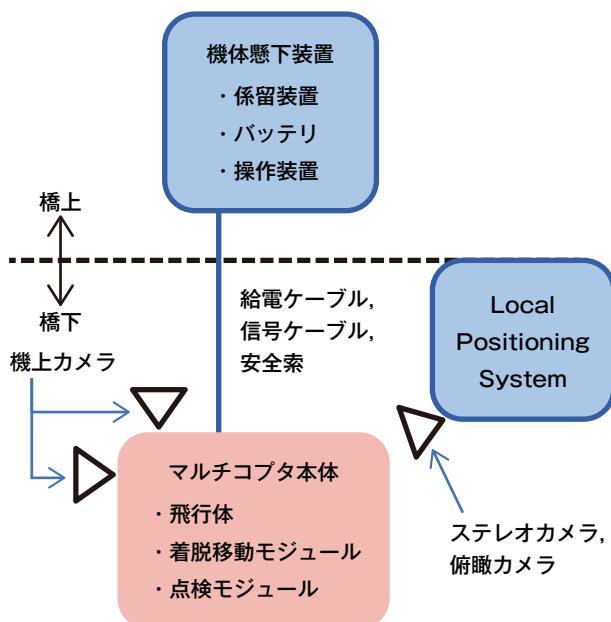


図2 システム全体の構成図

(2) マルチコプタ本体

マルチコプタ本体は、飛行体、着脱移動モジュール、点検モジュールからなる。

(a) 飛行体

概念設計の段階で、マルチコプタ本体の全備質量を8kg程度に見積もった。またプロペラの数は、製作性やメンテナンス性を考慮して原動機の数を少なくする方針とし、4枚とした。これらの情報をもとに、飛行体のプロペラサイズやモータの種類を選定した。さらに、プロペラ接触の危険回避や飛行体を懸下するためのハードポイントの確保のため、プロペラガードを取り付けることとした。

(b) 着脱移動モジュール

脱着移動モジュールは、鋼I桁橋を把持し、移動する装置である。開発当初は、当社の保有技術である橋梁点検ロボット「SkyLeg」(写真1(b))の把持方式を軽量化して用いることを検討した。写真3がこの方針で設計・製作を行った結果である。把持力にはカートリッジ式のポンベを駆動源とした空気圧を用いた。しかしながら、マルチコプタ本体を把持するだけの挟み込み力を得ることができず、走行とともに桁からずれ落ちる問題が発生した。把持力の確保には、機構の改良、空気圧源の増加が必要になったが、要求される質量を満足することが困難であると判断し、次に述べる磁着式の方式に変更することとした。



写真3 I桁把持装置初期版

写真4が新たに設計・製作した磁着式の着脱・移動機構である。中央部に永久磁石、その四方に移動用ホイールを配置した。永久磁石の表面とI桁フランジ面の隙間はタイヤを介して1mm程度の空隙が生じるようにしている。移動用ホイールは前後をブーリでつなぎ、左右独立駆動としている。これにより、前進、後退、旋回の動きをI桁フランジ上で行うことができる。I桁からの離脱の際は、強制的にI桁フランジを押し上げ、磁石と機体の距離を広げて吸着力を弱める。着脱・移動機構に用いているサーボの数は3つである。

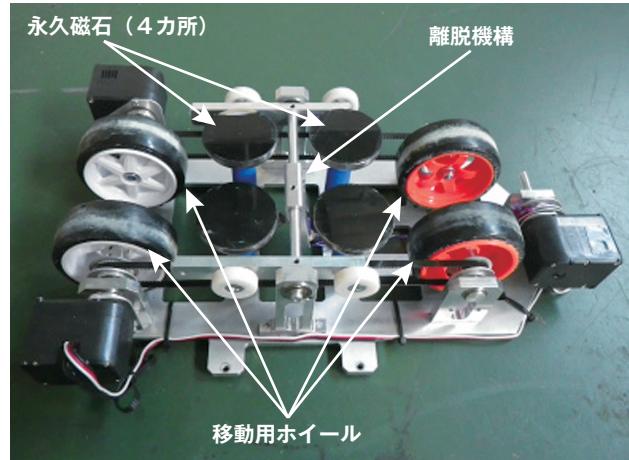


写真4 着脱移動モジュール

(c) 点検モジュール

点検モジュールは、マルチコプタがI桁に磁着後、点検用のカメラを対象に近接させるための機構である。写真5に点検モジュールの外観を示す。

マルチコプタ本体は飛行中、その重心が4つのプロペラの中心に位置しなければならない。そこで点検モジュールは、飛行中は機体下面の中心に折りたたみ、磁着後はブームを旋回して展開する方式とした。旋回用モータは2つである。この機構はさらに、点検用カメラをマルチコプタ本体の全周に展開できるという利点を有している。

ブームの先端には点検用カメラを対象に近接させるための伸縮式のマストを取り付けた。伸縮式のマストはモータによりフレキシブルラックを移動させ、その力でテレスコピック式のカーボンパイプを順次延伸させる方針としている。さらに、マストの先端に、2軸のカメラ雲台を設け、そのカメラ雲台上に点検用カメラを搭載した。点検用カメラは点検に用いる画像を取得するための高解像度カメラと点検時に状況を逐次モニタリングするためのUSBカメラの2種類を搭載した。

飛行体に対する点検用カメラの位置と撮影方向は、ブームの旋回角度、マストの伸縮量及びカメラ雲台の傾き角度の情報を用いて、順運動学を解いて算出することとした。

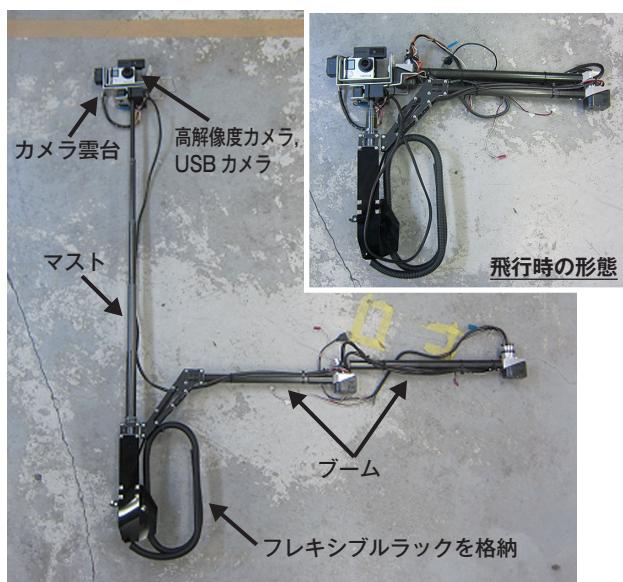


写真5 点検モジュールの外観

写真6に3つのモジュールを合わせたマルチコプタ本体の外観、表1にその諸元を示す。

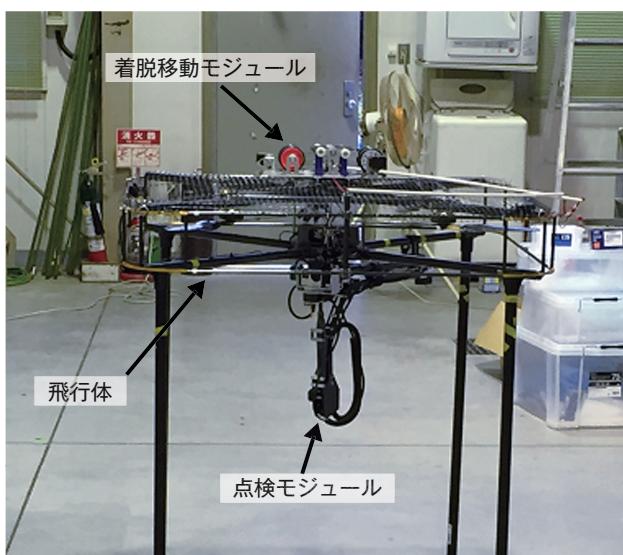


写真6 橋梁着脱型マルチコプタの外観

表1 橋梁着脱型マルチコプタの諸元

項目	仕様	
機体サイズ	1000mm×1000mm	
全備質量	7kg	
プロペラ直径	457mm	
プロペラ基数	4	
飛行時間	20分程度(有線給電による外部給電方式)	
搭載機器	橋梁着脱モジュール	磁力を用いて鋼構造に磁着、移動
		5軸アームにより構造にカメラを近接させる。
	点検モジュール	点検用カメラ(高解像度カメラ、USBカメラ)を点検モジュールの先端に搭載
取得画素数	最大1200万画素	
その他	機体の準備、撤収は機上より係留装置を用いて安全索で吊り下げて行う。	
開発担当	川田テクノロジーズ(株)	(株)エンルート

(3) Local Positioning System

橋上から目視外で飛行体を安定して操縦したり撮影画像の位置を後で知るために飛行体の位置情報の取得が不可欠である。しかしながら橋梁下面はGPS信号の受信が困難なためGPSによって位置を把握することはできない。非GPS環境下での位置取得に関しては、カメラやレーザを用いる方法が研究されているが、まだ実用に至っているとは言えない。そこで本研究では、一般に使われているモーションキャプチャ装置を適用し、外部から飛行体の位置を逐次計測するシステムを構築した。

写真7がこのシステムの外観である。モーションキャプチャ用のステレオカメラは橋梁の防護柵を利用して、橋から吊り下げ機体に向ける。ステレオカメラは飛行体を自動で追尾できるように2軸の電動雲台に搭載している。飛行体には赤外光を反射するためのマーカを複数台取り付ける。飛行体がどのような方向を向いても位置、姿勢が計測できるように、常に3個以上のマーカがカメラに映るように飛行体上にマーカを配置した。

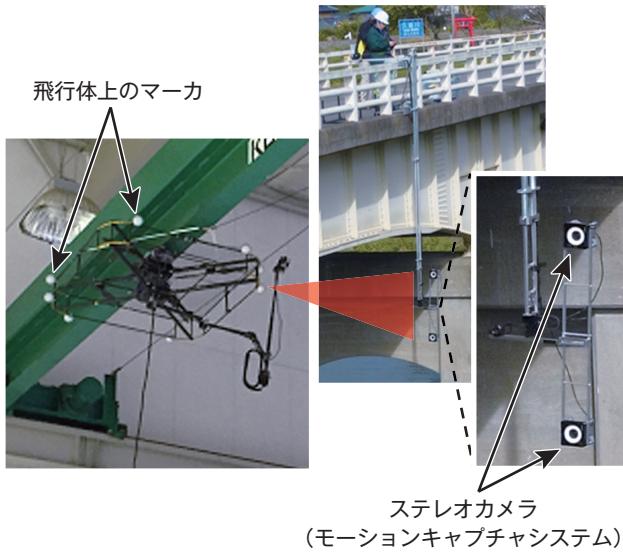


図7 Local Positioning Systemの外観

(4) 機体懸下装置

機体懸下装置は、マルチコプタ本体を橋上から吊り下げるための装置である。マルチコプタ本体はこの装置を用いて給電・信号ケーブルと安全索の2本のケーブルで橋上から係留される。装置は、係留装置（手動式の安全索巻き取り装置）、バッテリ、システムの操作装置から構成されている。写真8に機体懸下装置の外観を示す。



写真8 機体懸下装置の外観

4. 評価試験

(1) 国交省実証試験の概要

開発したシステムは実橋で合計4回にわたって実証試験を行った。これらの実証試験を通して装置の性能や運用性を検証し、都度改良を加えた。本稿ではこれらの実証試験のうち、2015年度に実施された国交省実証試験（次世代インフラ用ロボット現場検証プロジェクト）の内容と結果について述べる。

国交省実証試験は、インフラ点検や災害現場の調査・応急復旧を実施するロボット開発を促進する目的で、国土交通省と経済産業省が実施したプロジェクトである。このプロジェクトは2014年と2015年の両年に実施された。

2015年度には維持管理、災害対応の両分野に合わせて70技術が参加した。このうち橋梁分野では、橋梁の近接目視、点検者の移動を支援する技術が公募され、21技術が参加した。橋梁分野の実施場所は、蒲原高架橋（静岡県）と幸久橋（茨城県）の2つであった。橋梁の種類は、それぞれ、コンクリート床版橋、コンクリート橋と鋼橋の混合橋である。

参加したロボットは車両型、懸架型、飛行型、吸着型、ポール型、それ以外の6つに大別された。

実証試験は与えられた2時間の中でロボットの準備、運用、撤収を行い、得られたデータを持ち帰りそのデータを用いて点検調書を作成し、あらかじめ主催者が点検した内容がどの程度まで網羅されているか、また時間や費用の上で従来の方法に比べてどの程度効果があるのかについて評価がなされた。評価結果は本プロジェクトの専用ポータルサイトにて公表されている⁵⁾。

川田テクノロジーズ㈱を中心の研究開発コンソーシアムは、橋梁の下面を迅速かつ網羅的に飛行して画像を取得する網羅的画像取得用マルチコプタと橋梁着脱型マルチコプタの2種類の機体を用いて実証試験を行った。ここでは、橋梁着脱型マルチコプタの実証試験内容とその結果を説明する。

(2) 橋梁着脱型マルチコプタの実証試験内容

試験に先立ち、鋼橋の損傷が激しいと思われる部位をピックアップし、その部位を本装置で点検する計画を立てた。特に、添架物周辺やガセットプレート上面など、遠望からでは観察できない箇所に着目した。そしてこれらの部位に対して橋梁への磁着、移動、カメラアームの展開、画像取得、離脱の一連の機能を繰り返して適用した。実証試験では橋上からの機体の操縦に関する技術開発が間に合わなかったため、橋下から無線にて操縦した。図3に実証試験の方法の概要、写真9に実際に点検を行っている様子を示す。

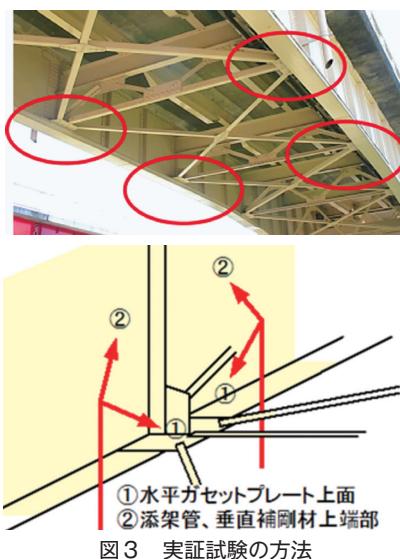


図3 実証試験の方法



(a) アプローチ中



(b) 磁着直前



(c) 磁着後移動中



(d) 点検中

写真9 実証試験の様子

(3) 橋梁着脱型マルチコプタの実証試験結果

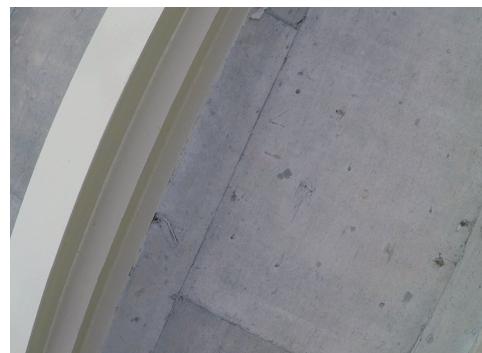
橋梁着脱型マルチコプタで取得した画像の例を写真10に示す。この実証試験では、試験当日 Local Positioning System のキャリブレーションにずれが生じたため、機体の正確な位置を計測することができなかった。従って、別途記録した撮影情報を用いて機体の位置



(a) ガセットプレート上面



(b) 添架物



(c) 床版下面



(d) 支承付近

写真10 取得した画像の例

を割り出した。点検に要した労力は、準備: 6人×30分、点検: 4人×60分(1径間中の予め選択した部分)、撤収: 6人×15分であった。データ整理と点検調書作成には1.1日間を要した。

本装置による点検は、前述のようにあらかじめ計画した部位に対してのみに限られた。従って、点検要領に沿った点検を行ったといえず、主催者側からは評価の対象とはならないと判断された。しかしながら、一連の点検作業を実橋を用いて試行することで、装置の性能や取得した画像の精度、運用上の課題を把握することができた。

4. 考察

2年間の開発や実証試験を通して得られた知見は以下の通りである。

- ① 橋梁に磁着して画像取得を行ったところ、点検員は余裕をもって点検対象を確認して画像を取得することができた。これは飛行体の揺れや飛行時間を心配する必要がなかったためである。
- ② 遠望からでは確認できないガセット取付け部等の画像を確実に取得し、状態を確認することができた。また、安定した状態で画像を取得しているため、画像にブレやピンボケがなかった。
- ③ 点検に必要な人数は、従来の人による点検と比べて、2倍から3倍多くかった。これは、装置のサイズが大きく、吊り下げ等の準備に人手が必要であること、運用中、安全索や給電ケーブルを手繕る作業が必要であり、それにも人手が必要であること、運用においては複数人による装置の監視が必要であったことなどが要因である。
- ④ 操縦や装置全体の運用に高度の技能を要した。まず、風の乱れの大きい橋梁下で鋼橋に機体をアプローチさせるには高度の操縦技術を要した。また、橋の上面から運用する場合、カメラ画像だけからでは、機体の位置や状況を把握することが難しく、運用中の装置操作の判断が難しい局面が多くあった。
- ⑤ ④の課題については、装置の小型軽量化、運動性の高い機体の開発、ロバスト性の高い測位技術の開発の計画を立て、実行中である。同時に、本装置の効果的な使い方を検討するため、用途開発を実施し、対象とする橋梁や場面の明確化を図っていく計画にしている。

5. まとめ

マルチコプタはその高い機動性に特長がある。この特長はアクセス性の悪い橋梁へのアプローチ手段として有

利である。但し、飛行して遠望から画像を取得するだけの用途では、装置の導入メリットが限られる。我々の意図は、遠望からの単純な撮影という従来の使い方の他に、撮影対象に磁着することで安定して近接画像を取得できるという新しい使い方を提案し、利用場面を増やすことがある。これによって装置の導入効果を上げ、普及を促進させる狙いである。

本稿では4年間のプロジェクトの2年目終了時点での成果を報告した。この2年間で、初期に掲げた夢のようなアイディアの実現に挑み、形としては実現できることを示した。後半の2年間は、実用化開発と位置付けており、研究メンバに入っているユーザの意見を取り入れながら、実用化を図っていく計画である。

参考文献

- 1) 道路メンテナンス年報、国土交通省、2015.11.
- 2) インフラ長寿命化計画、国土交通省、2015.5.
- 3) 磯他：床版下面をもっと簡単に点検したい！～簡易橋梁点検装置の開発～、川田技報、Vol.19,2000.1.
- 4) 勝俣他：橋梁点検ロボットの開発～維持管理業務の合理化に向けて～、川田技報、Vol.22,2003.1.
- 5) 次世代社会インフラ用ロボット技術・ロボットシステム～現場実証ポータルサイト～,
<http://www.c-robotech.info/>