橋梁の近接目視点検を支援する 飛行ロボットシステムの開発*

Unmanned Aerial Vehicle for Supporting Close Visual Inspection of Bridges

大野和則** 岡田佳都*** 原島正豪† 横江政和††

Kazunori OHNO, Yoshito OKADA, Seigo HARASHIMA and Masakazu YOKOE

Key words ドローン、橋梁点検、近接目視、Visual SLAM

1. はじめに

内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理人: NEDO)の支援を受けて、開発を進めている橋梁点検用の飛行ロボットシステムについて説明する。本成果は、東北大学、株式会社リコー、千代田コンサルタント株式会社、(一財)航空宇宙技術振興財団、東急建設株式会社の共同研究の産物である。

私たちは、橋梁の近接目視点検を支援・代替する飛行ロボットシステムを開発している(図1)。理由は、2014年に全国にある2mを超える約70万橋の橋梁について5年に1度の点検が義務化され、点検を支援する新たな点検機器の開発が期待されているからである。現在の橋梁点検

は、人による近接目視と、点検用ハンマーを用いた打音により行われている。私たちは、この近接目視や打音による点検を支援する飛行ロボットシステムを開発している。

本稿では、図1に示す橋梁の近接目視点検を支援する飛行ロボットシステムの開発について説明する。開発中の橋梁点検システムは、橋梁を近接撮影する飛行ロボット、近接画像から橋梁の展開画像を自動生成するソフト、展開画像を利用して点検調書作成を支援するソフトから構成される。開発中の点検システムの特徴は、球殻ヘリを用いることで桁間や床版にぶつかっても墜落せずに、近接画像を撮影できること、展開画像を利用して近接画像で見つけた損傷の位置を特定することである。本稿では、橋梁を近接撮影する飛行ロボットの概要と特徴と、現場適用を中心に、現在の開発状況を説明する。

2. 飛行ロボットを利用した橋梁点検と特徴

図2に飛行ロボットを利用した橋梁点検の流れを示す。受動回転球殻ヘリ(以下、球殻ヘリと省略)を利用して、橋梁の近接画像を撮影する。操縦者は、河岸などから球殻ヘリを目視で確認しながら、プロポで操縦する(有視界内飛行)。並行して、映像に取りこぼしがないことを、操縦者とは別の人が機体カメラの映像を見ながら確認する。機体のカメラ映像は電波で伝送され、手元のタブレットPCの画面で確認することができる。

撮影終了後、飛行ロボットで撮影した橋梁の近接画像を回収し、現場から持ち帰ってオフラインで近接画像をつなぎ合わせて展開画像を生成する。点検員は、展開画像と近接画像を利用して、損傷の位置と種類を特定し調書を作成する。損傷位置の特定を支援するため、近接画像上で人手により損傷に印を付けると、展開画像上の損傷の位置にも印が自動で付く。また、展開画像と橋梁のCAD図面を位置合わせすることで、CAD図面上の損傷位置にも自動で印が付けられる。

私たちが提案する飛行ロボットを利用した点検の特徴は、①従来の橋梁点検で行われていた交通規制に比べて簡単な規制で点検を実施できること、②桁下の高い橋梁につ

図1 飛行ロボットを利用した橋梁の近接撮影

*原稿受付 平成29年10月2日

**東北大学未来科学技術共同研究センター(仙台市青葉区荒巻字青葉468-1 田所研究室)

***東北大学大学院情報科学研究科(仙台市青葉区荒巻字青葉468-1 田所研究室)

†(株)リコー中央研究所(横浜市都筑区新栄町16-1)

††(株)千代田コンサルタント(東京都北区西ヶ原3-57-5)

図2 飛行ロボットを利用した橋梁点検の流れ

図3 橋梁点検車を利用した従来の橋梁点検

いても足場などを組まずに点検を実施できること、③橋梁の損傷部と健全部のすべての部位の記録が残ることである。

(1) 従来の橋梁点検で行われていた交通規制に比べて簡単な規制で点検を実施できることについて説明する。図3に従来の橋梁点検車を利用した橋梁点検の様子を示す。桁下の高い橋梁の点検は、アームを有する点検車を利用で行う。橋梁点検車を利用する場合、車線規制等の安全策を行いながら、橋梁点検車を橋梁の車道等に停車し、アームの先のバケットに点検員が乗り込んで、アームを伸ばして点検箇所近づいて、目視や打音による点検を行う。橋

梁の幅や桁高によって、利用する点検車両の大きさが変わるものの、一般的には、このような安全規制を行って点検する。飛行ロボットを用いることで、車両を停車するための車線規制が不要になり、交通規制を最小限に抑えて点検を行うことができると考えている。また、安全確保のための点検員の数や、交通規制が周囲に与える影響を軽減することも期待できる。

(2) 桁下の高い橋梁についても足場などを組まずに点検を実施できることについて説明する。橋梁の下の河岸などから、飛行ロボットを目視で確認しながら飛行させて、点検に必要な近接画像の撮影を行うことで、足場などを組まずに、点検を行うことができるようになる。これまでの実証実験で、桁下が20mの橋梁の近接撮影にも成功している。

(3) 橋梁の損傷部と健全部のすべての部位の記録が残ることについて説明する。従来は、点検員が損傷を目視や打音で確認し、確認した損傷の種類や位置をカメラで撮影したり、野帳と呼ばれるノートに書き込んだりして、記録に残した。また、事務所に帰ってから、これらの情報に基づいて点検調査書を作成した。しかし、このような点検方法では、健全と判断した箇所の情報がほとんど残っていないという課題があった。点検の際に、以前の点検調査書では報告されていなかった損傷が見つかった場合は、以前の点検データと比較しながら新しく見つかった損傷の原因等を検討することが極めて困難であった。飛行ロボットで全面的記録を残すことで、記録を基に議論したり、第三者が点検を検証したりすることができるようになる。

3. 橋梁の近接目視に適した飛行ロボットの開発

私たちが開発した球殻ヘリを図1に示す。受動回転する球殻をもつことで、橋梁にぶつかっても落ちない飛行ロボットを開発した¹⁾²⁾。図4に球殻ヘリの構成要素を示す。球殻ヘリは、市販のドローンとガードの役目を果たすフラーレン構造の球殻を、3軸のジンバル機構でつなげた構造になっている。床版等を撮影するために桁間に進入する際に、周囲の桁、床版、添架物にぶつかっても、球殻がプロペラや機体を保護する。また、衝突した際に球殻が受動的に回転することで、ヘリに直接外力が加わるのを防ぐ。

球殻の大きさが直径0.96m、飛行ロボット全体の重さが2.6kgである。球殻の直径の大きさは、全国の橋梁図面を参考に決めた。512橋の橋梁図面（コンクリート橋325橋、鋼橋187橋）を調査し、コンクリート橋、鋼橋ともに桁の間に入ることができる1.1m未満の大きさの球殻を作製した。図5に、鋼橋の桁間の調査結果を示す。鋼橋の場合、1.3m未満であれば桁の間に進入できることを示している。

また、撮影用のカメラは、対角で120°以上の広視野角のカメラを上向きと横向きの2台搭載した。対象に0.5m程度まで近づいて近接撮影を行うことができるため、小型軽量で高解像度のカメラを点検に利用する。空撮等で利用

図4 受動回転球殻ヘリの構成

図6 球殻ヘリの構造の検討：(左) 現在の球殻（フラーレン構造）、(右) 以前の球殻（ジオデシック構造）

図5 橋梁の点検に適した球殻のサイズの調査（鋼橋の例）

される機械式のシャッターや大型のCMOSセンサを搭載したハイエンドなカメラを利用せずに、点検に必要な画像を撮影する。また、小型カメラにすることで機体重量を2.6 kgと軽量化にすることが可能になった。

最後に、球殻の形状も複数検討した。ジオデシックドーム構造から、フレーム数の少ないフラーレン構造の球殻に変更することで、球殻の重さを76%に軽量化するとともに、風から受ける抵抗の軽減と、映像に写るフレームの数の削減を行った。

このような工夫を行うことで、最大9.9 m/sの風の中で飛行し、橋梁の桁間に進入し近接画像を撮影することができる球殻ヘリを開発した。

4. 実橋梁を利用した実証実験

球殻ヘリを利用した橋梁点検の実証実験を、各自治体の橋梁をお借りして行っている。結果の一部を報告する。

4.1 高所にある橋梁床版撮影の実証実験

2016年11月末に、岐阜SIP（六郷先生）の提供する岐阜県岐阜市の千鳥橋（図7）をお借りして飛行ロボットを

図7 高所にある橋梁床版撮影の実証実験（岐阜県岐阜市千鳥橋）

利用した橋梁点検の実証実験を行った。桁下の高い橋梁の歩道側の床版を球殻ヘリで近接撮影した。歩道の幅は3.6 mで、直径1 mの球殻ヘリで桁間に進入することができた。一方で、図7に示すように桁内には添架物が存在し、添架物と床版の間を球殻ヘリで通り抜けることができなかった。

実証実験では、橋梁のCAD図面を基に飛行ロボットの飛行経路を策定し、桁内の添架物の左右から床版を撮影する飛行経路を飛行した（図7中の矢印）。広視野角のカメラを搭載した球殻ヘリで、左右から撮影することで、床版全体の撮影を行うことができた³⁾。

図8(a)に撮影した近接画像の一例を示す。橋梁のコンクリート損傷が撮影できていることが確認できる。図8(b)に大量の近接画像をつなぎ合わせて作成した展開画像を示す。図8(a)の近接画像と図8(b)の展開画像を利用して、点検員が作成した調書を図8(c)に示す。点

図 8 近接画像と展開画像を利用した橋梁点検の結果

図 9 昼間でも薄暗い橋梁点検の実証実験（宮城県仙台市龍沢橋）

検調書は国交省の指定するフォーマットで作成しているが、表示スペースの都合で、損傷が書き込まれた CAD 図面の部分だけを切り出した結果になる。

この実証実験を通して、球殻ヘリを利用することで、桁下の高い橋梁で点検用の足場を組むことなく、また、橋の上部で大規模な交通規制を行うことなく、橋梁の近接画像を撮影し、展開画像を生成し、点検を行えることを実証した。

4.2 昼間でも薄暗い橋梁点検の実証実験

2017 年 5 月中旬に宮城県仙台市の龍沢橋を、仙台市の近未来技術実証特区の枠組みを利用してお借りし、球殻ヘリの実証実験を行った。龍沢橋の特徴は、桁下が低いため昼間でも薄暗いこと、桁高が 2 m 以上あり点検車両を利用しても床版の近接目視が難しいことである（図 9）。薄暗い床版を撮影するために、LED 照明付きのカメラシステムを開発し、実証実験を行った。

図 9 (c) に、球殻ヘリで飛行し、LED 照明で周囲を照

図 10 LED 照明付きカメラで撮影された近接画像（上）と展開画像（下）

らしながら床版の近接画像を撮影している様子を示す。操縦者が球殻ヘリを目視で確認しながらプロポで操縦し、薄暗い桁の中の床版を撮影した。

図 10 に、撮影した近接画像と、展開画像を示す。近接画像の床版には傷と、以前の点検で付けられたチョーキングが写っている。本原稿の画像の解像度からは確認が難しいが、元画像において損傷が写っていることを確認した。また、暗闇で撮影した近接画像から、損傷の位置特定に利用する展開画像が生成できることを確認した。

この実証実験を通して、薄暗い橋梁の点検にも球殻ヘリが利用できることを確認した。

5. ま と め

本稿では、橋梁の近接目視を支援・代替する飛行ロボットシステムについて、紹介した。飛行システムを利用した点検の流れ、特徴について説明した。また、受動回転球殻ヘリの概要について紹介した。最後に、飛行ロボットシステムを利用した橋梁点検の実証実験について 2 例、桁下が高い橋梁の空撮点検と、桁下が薄暗い橋梁の空撮点検について、実証結果を報告した。今後は、現場適応に向けて、実証実験から明らかになった球殻の強度などの改善に取り組む。また、同様の点検方法の新たな適応先についても模索する。

謝 辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：NEDO)によって実施されました。

参 考 文 献

- 1) C.J. Salaan, Y. Okada, K. Hozumi, K. Ohno and S. Tadokoro: Improvement of UAV's Flight Performance by Reducing the Drag Force of Spherical Shell, Proc. the 2016 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2016), (2016) 1708-1714.
- 2) 岡田佳都, 岡谷貴之: 橋梁点検を代替するための受動回転球殻を有するマルチコプターの開発と実橋梁における点検性能評価, 日本ロボット学会誌 **34**, 2 (2016) 119-122.
- 3) 岡田佳都, 大野和則, 原島正豪, 横江政和: 球殻 UAV からの橋梁接写画像のパノラマ展開による難アクセス床版の損傷マッピング, 第 17 回建設ロボットシンポジウム, P1-6, (2016).

大野和則

2004 年筑波大学大学院工学研究科知能機能工学専攻博士課程後期課程修了(工学)。同年神戸大学大学院自然科学研究科 COE 研究員, 2004 年に東北大学工学研究科助手, その後, 助教, 講師を経て, 2012 年に未来科学技術共同研究センターの准教授, 現在に至る。レスキューロボット, 3 次元計測, ロボットの自律知能に関する研究に従事。RSJ データ工学ロボティクス研究専門委員会委員長, IEEE, 日本ロボット学会の正会員。

岡田佳都

2012 年 3 月に東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻博士課程後期 3 年の課程修了。米カーネギーメロン大学での 1 年間の客員研究員を経て, 2013 年 4 月より東北大学大学院情報科学研究科田所研究室助教。これまで, 福島第一原発探査に活用されたクローラ型ロボット Quince, 惑星探査ロボット, インフラ点検用飛行ロボットの開発に従事。博士(工学)。ロボット学会正会員。

原島正豪

1994 年東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系修士課程修了。同年(株)リコー入社。日本バーチャルリアリティ学会会員。

横江政和

1992 年名古屋工業大学工学部社会開発工学科卒業。同年(株)青木建設入社。2000 年(株)千代田コンサルタント入社。2002 年技術士(建設部門)取得。(一社)建設コンサルタンツ協会道路構造物委員会委員。