

論文・報告

橋梁点検用ドローンの操縦支援システムの性能向上

～現場の点検ニーズに対応する自動制御の実装～

New Flight Control System to meet the requirements from real bridge inspection

岡本 勇也 *1
OKAMOTO Yuya檜本 祥 *1
KASHIMOTO Sho林 篤史 *2
HAYASHI Atsushi金平 徳之 *3
KANEHIRA Noriyuki

川田テクノロジーズ（株）技術研究所（以下、当研究所）では、ドローンを利用した橋梁点検システム「マルコ[®]」を開発し、現在、実運用に至っている。本システムは、ドローンに搭載したカメラで橋脚を網羅的に撮影、高精細画像の取得を行い、橋梁点検に寄与するものである。点検に必要な画像の取得には、カメラと橋脚が一定間隔を保ち、かつ正対していることが効率的な撮影条件である。しかし、複雑な風況変化が伴う橋脚近傍では、ドローンを安定して飛行させることは困難であり、また操縦者の技量に左右される場面もあるため、安定的な画像取得は困難である。そこで、当研究所では、操縦支援システムを産業技術総合研究所と共同開発した。本報では、操縦支援システムの性能向上、つまり耐風性能向上、正対制御、および壁面端部一定距離制御に関わる概要と評価について述べる。なお、橋梁点検システム「マルコ[®]」は、令和元年度に国土交通省の新技术を活用したフィールド試行業務における試行対象技術のひとつに選定され、大日本コンサルタント（株）では、本システムを活用し、新技术利用計画の立案、現場での点検画像の飛行撮影、および精度管理、3次元成果品の納品まで業務一式を実施している。

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

高度成長期以降に整備された社会インフラが老朽化しており、笹子トンネル天井板落下事故を契機に社会インフラの維持管理に対する機運が高まった¹⁾。一方で、維持管理に対する人材・技術不足の課題があり、効率的な構造物の劣化・損傷を点検・診断する技術が必要とされている²⁾。

国土交通省では「新技术利用のガイドライン（案）」³⁾を発行し、センサやロボット、非破壊検査技術等の新技术の点検利用について方針を示し、点検者が近接目視と同等であるとした場合に限り、ドローン等の新技术を利用した橋梁点検について認めている。

川田テクノロジーズ（株）技術研究所（以下、当研究所）では、社会インフラの維持管理という社会課題解決の一助を目的として、ドローンを用いた橋梁点検システム「マルコ[®]」を大日本コンサルタント（株）と共同で開発し、実証試験を経て実点検での運用に至っている。

本システムは、定期点検を実施する者が点検支援技術の利用を検討するにあたり、機器等の特性を比較・整理し参考にすることを目的とした国土交通省の「点検支援技術性能カタログ」⁴⁾に掲載された。

開発にあたっては、現場からのフィードバックを大日本コンサルタント（株）が担い、当研究所はそのニーズに沿った機体のシステムインテグレートを行った。なお、現段階では、橋梁点検における対象として、診断に資する画像データの取得が可能でドローンでの省力化が期待できる高橋脚に注力している。

一般的にドローンは、桁下のような全球測位衛星システム（GNSS：Global Navigation Satellite System）情報が取得できない飛行困難な環境や橋脚近傍で発生する複雑な風況変化を伴う環境で飛行させることは困難である。一方、本橋梁点検システムで用いるドローンは、このような環境下においても安定した飛行が可能である。

本システムが点検対象としているのは主に幅 0.1 mm 以上のひび割れである。その幅が判別可能な画像を安定的に取得するには、橋脚とカメラの間隔を一定にし、正対させる必要がある。しかし、前述のような環境である橋脚近傍では、安定した飛行が困難で、画像の品質がドローン操縦者の技量に依存してしまうことがある。

そこで、我々は点検に必要な画像を安定的に取得できるように、ドローンを制御する操縦支援システムを開発した。前報で報告した⁵⁾従来の機体では、超音波距離セ

*1 川田テクノロジーズ^株技術研究所*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 所長

ンサを利用していたが、より広範囲を測定でき、サンプリングレートが高いレーザ測域センサの利用により、耐風性能の向上、正対制御、および壁面端部一定距離制御の3種類の同時制御を実現することができた。本報では、この制御の評価と検証試験から得られた知見について述べる。

2. 橋梁点検システム「マルコ®」の概要

ドローンを用いた点検画像取得フローを図1に示す。

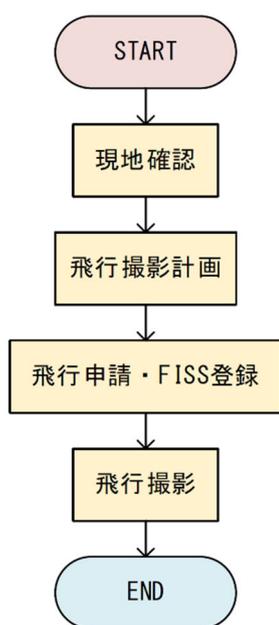


図1 点検のフロー

高橋脚の飛行撮影では、ドローンを壁面に正対させ、上下くし形飛行することで網羅的に撮影を行う。その画像をつなぎ合わせ、1枚の画像にする。図2に点検業務より得た画像を示す。

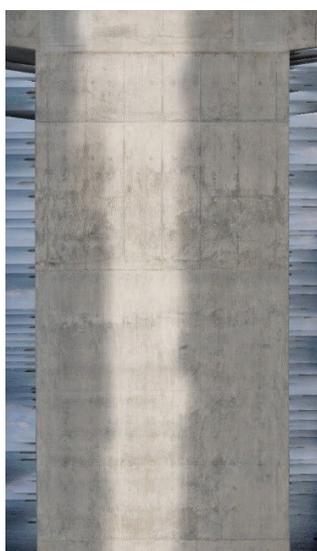


図2 点検業務における結合画像

本システムが対象とする最小ひび割れ幅から、取得する画像の画素分解能が0.4 mmである。この画素分解能を実現するには、機体を橋脚に接近させ、近距離で撮影を行う方法か、遠方から望遠レンズで撮影を行う方法がある。機体が橋脚に接近しすぎると撮影の効率が落ち、突風に煽られた際、橋脚に衝突してしまう可能性がある。他方、撮影対象が遠いと望遠レンズが必要になり、機体揺動によるブレの影響を受ける可能性があり、または周辺環境により十分な間隔が取れない場合がある。したがって、本システムでは、上記の影響を受けにくい橋脚からの間隔を2000 mmとし、1回の撮影で「幅2400 mm × 高さ1300 mm」の画像を連続的に取得している。

表1に使用するカメラとレンズの基本仕様を示す。

表1 カメラとレンズの仕様

項目	仕様
撮像素子サイズ	APS-Cサイズ (23.5mm×15.6mm)
有効画素数	約2430万画素
AF方式	位相差AF方式
連続撮影性能	通常2枚/秒
カメラ重量	約344g (バッテリーとメモリカードを含む)
カメラ外形寸法	約120.0mm (幅) × 66.9mm (高さ) × 45.1mm (奥行き) mm
焦点距離	16mm-50mm
開放絞り (F値)	3.5-5.6
手ブレ補正	あり (レンズ内手ブレ補正方式)
レンズ重量	約116g
レンズ外形寸法	φ64.7mm×29.9mm

機体外観を図3に示す。機体上部には、3軸ジンバルを介してカメラを搭載している。ジンバルは、姿勢センサを用いたフィードバック制御により、自動でカメラを水平に保持する装置である。ジンバルにより、飛行時に機体が傾いた場合でも、カメラを常に水平に保持することができる。

また、ひび割れ幅0.1 mmを検出するには、2000 lx以上の明るさが必要である。高橋脚上部では桁の影になり、適切な照度を確保することが困難な場合がある。さらに、桁の影だけでなく、曇天や夕暮れ時の点検画像取得は困難である。このような条件下でも適切な点検画像を取得するため、高輝度照明装置を装備している。



図3 新しく開発した機体

3. 操縦支援システム

操縦支援システムは、橋脚と一定距離を保持する間隔一定制御、橋脚に対して正対する正対制御、および橋脚端部からの一定距離を保持する壁面端部一定距離制御からなる。

図4に操縦支援システムの概要図を示す。フライトコントローラは、操縦支援システム制御中でも操縦者の操作を優先するようにしている。つまり、操縦者が操作していないときのみ操縦支援システムは機能する。

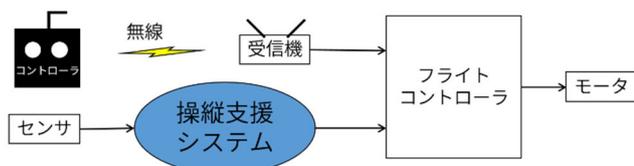


図4 機体システム概要図

(1) 操縦支援システム用センサ

表2にレーザ測域センサと超音波距離センサの比較を示す。

表2 レーザ測域センサと超音波距離センサの比較

項目	超音波距離センサ	レーザ測域センサ
原理	超音波(42kHz)	半導体レーザ(905nm)
測定点データ数1点		1080点
最大検出距離	7650mm	10000mm
応答性	悪い	良い
サンプリングレート	10Hz	40Hz

超音波距離センサは、センサから超音波を発信し、対象物から反射し、その戻る時間から、対象物との距離を測定するものである。センサ発信部から同心円状に超音波が発せられるため、対象物を面的に捉えることができ、対象物が均一な面でなくても安定した測距ができ頑健性に優れている。つまり、橋脚に設置されている配管や梯子等の付設物が測定領域にある場合でも、安定して距離を測定できる。一方で、測距できるのは一箇所、応答性がレーザ測域センサよりも低く、サンプリングレートも低い。

レーザ測域センサは、光をスキャニングしながら検出物までの距離を測定する二次元走査型の光距離センサである。レーザ測域センサ以外にも、レーザスキャナ、LRF(Laser Range Finder)、LiDAR(Light Detection and Ranging)などと呼ばれている。測域センサは所定エリア内を平面上にトレースしたデータを出力するため、測定エリア内の位置、移動方向を判別できる。

(2) 制御方法

① 間隔一定制御

間隔一定制御とは、壁面もしくは床版下面等の天井面から一定の距離を保つ制御である。図5に制御の概要図を示す。壁面に機体が接近し、距離が3000mmに達すると自動的に壁面から2000mmの間隔を保持するように制御する。当初は、超音波距離センサを用いたが、測定の頑健性より応答性を優先させるために、レーザ測域センサを用いた制御に変更した。

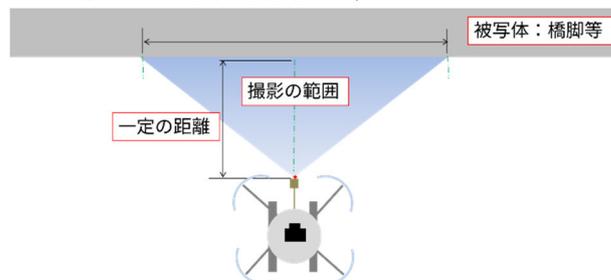


図5 間隔一定制御の概要図

② 正対制御

正対制御とは、壁面に対して常に機体を正対させる制御である。制御概要を図6に示す。機体が壁面に接近し、壁面から3000mmに達した時、レーザ測域センサの位置と距離情報から正面の壁面を推定し、その壁面に対して機体を正対するように制御する。本制御と前項の間隔一定制御により、画像の撮像範囲が一定に保たれる。

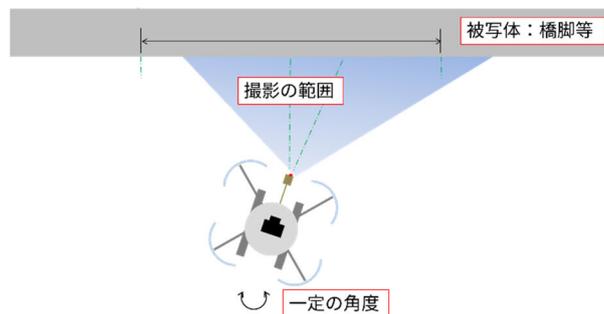
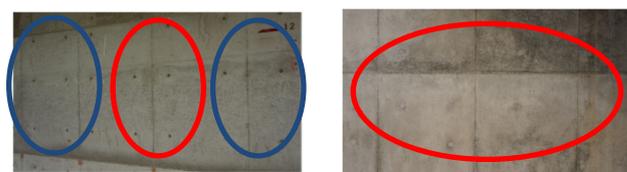


図6 正対制御の概要図

正対制御の有効性を図7に示す。正対制御がない場合には、壁面に対して正対せずに図7(a)のような画像を取得することがある。このような「あおった」画像は、画素分解能の不均一を生じるだけでなく、画像の中心しか合焦しないため左右はピンぼけを生じる。赤丸は合焦、青丸は合焦していない箇所を示す。



(a) 正対していない画像 (b) 正対した画像

図7 正対制御の有無による画像の違い⁶⁾

③ 壁面端部一定距離制御

壁面端部一定距離制御とは、壁面横の端部から常に機体を一定距離に位置させる制御である。制御概要を図 8 に示す。レーザ測域センサから推定した壁面端部からの水平距離が一定になるように制御する。本制御により、機体昇降時に横ずれすることなく、同列の連続した画像を取得することが可能である。

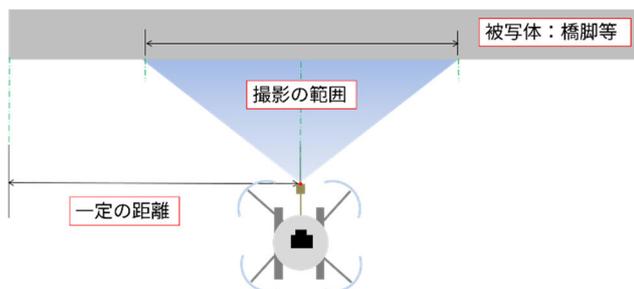


図 8 壁面端部一定距離制御の概要図

また、図 9 に示すように、オートフォーカス撮影で、端部からずれた場合は、カメラの合焦点が壁面から外れ、撮影漏れを生じてしまう。本制御を用いることで、端部撮影時における横ずれによる撮影漏れやピンぼけを防止することが可能である。



(a) 端部からずれた画像 (b) 端部での適切な画像

図 9 壁面端部一定距離制御の有無による画像の違い

4. 操縦支援システムの評価

(1) 検証試験概要

検証試験では、橋脚壁面を模擬した環境で、「壁面進入試験」、「壁面可動試験」の 2 つの試験を実施した。

「壁面進入試験」は、通常運用を想定した試験であり、操縦支援システムを作動させた状態で、橋脚壁面を模擬した建屋の壁面に向かって飛行させ。その時の、間隔一定制御、正対制御、および壁面端部一定距離制御のセンサの出力値と操縦状態を確認した。図 10 に壁面進入試験を示す。

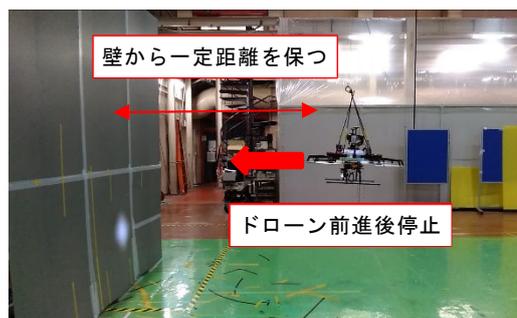


図 10 壁面進入試験

「壁面可動試験」は、突風を想定した試験であり、操縦支援システムを作動させた状態で、橋脚壁面を模擬した仕切り板を「300 mm/s」と「600 mm/s」で可動させ、その時の、間隔一定制御のセンサの出力値と操縦状態を確認した。また、本試験ではレーザ測域センサを用いた場合と超音波距離センサを用いた場合で比較し、センサの違いによる追従の違いに着目した。図 11 に壁面可動試験を示す。

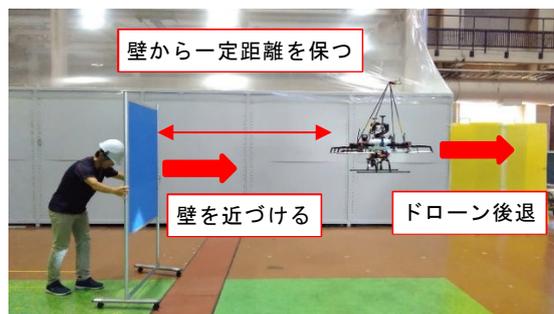


図 11 壁面可動試験

(2) 壁面進入試験結果

「壁面進入試験」における各制御の結果を図 12 から図 14 に示す。横軸は、時間[sec]を示す。

上図の縦軸は間隔一定制御と壁面端部一定距離制御は距離[mm]、正対制御は角度[deg]を示す。赤の一点鎖線は、制御の目標値を示しており、また赤の点線は制御の許容範囲を示す。許容範囲は、間隔一定制御と壁面端部一定距離制御では ± 250 mm に、正対制御では $\pm 2.5^\circ$ としている。

下図の縦軸は、操縦支援システムから機体への制御値[%]を示している。

① 間隔一定制御結果

図 12 の間隔一定制御の結果より、2 000 mm の目標値に対して、2 000 mm \pm 250 mm 以内で制御されていることがわかる。

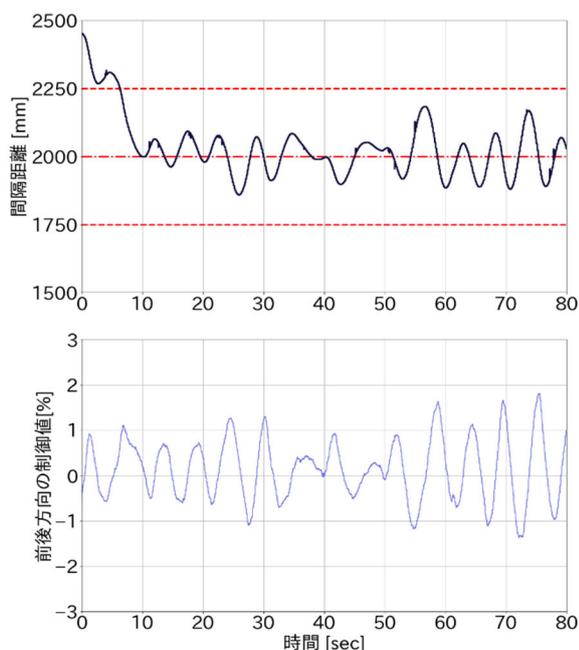


図 12 間隔一定制御の結果

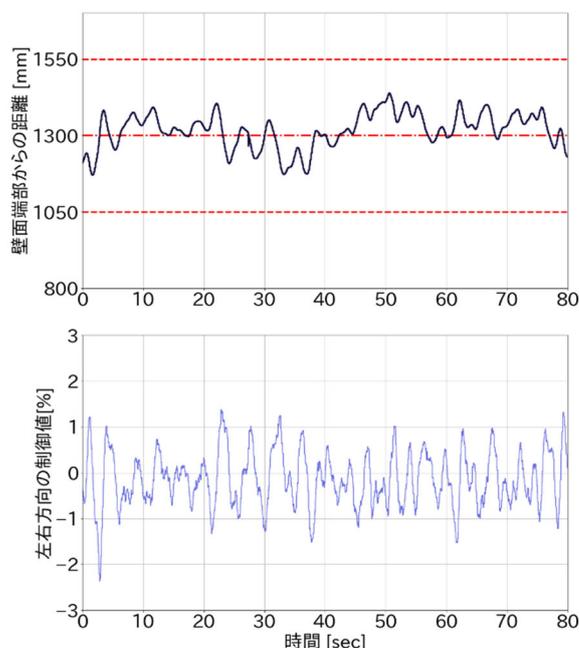


図 14 壁面端部一定距離制御の結果

② 正対制御結果

図 13 の正対制御の結果より、壁面と正対、つまり 0° の目標値に対して、 $0^\circ \pm 2.5^\circ$ 以内で制御されていることがわかる。

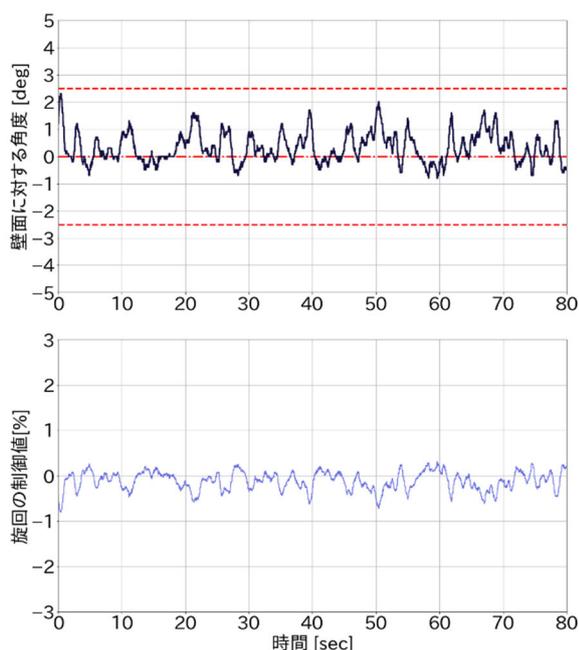


図 13 正対制御の結果

③ 壁面端部一定距離制御結果

壁面端部一定距離制御の目標値は、操縦者が左右方向の操作を行わなくなった時点として 1 300mm に設定した。今回は目標値に対して $\pm 250\text{mm}$ 以内に制御されていることがわかる。

(3) 壁面可動試験結果

超音波距離センサを用いた制御の結果を図 15 に、レーザ測域センサを用いた制御の結果を図 16 に示す。図 15 より、超音波距離センサを用いた制御の「300 mm/s」では、機体は壁面に追従しているものの、「600 mm/s」では追従できずに、制御許容範囲を大きく逸脱していることがわかる。一方、レーザ測域センサを用いた制御では、「300 mm/s」、「600 mm/s」ともに追従できていることがわかる。

超音波距離センサを用いた制御とレーザ測域センサを用いた制御の違いは応答性である。「300 mm/s」のように緩やかな距離変化の場合、超音波距離センサを用いた制御は、約 20 % の制御値を繰り返し与えている。一方、レーザの測域センサを用いた制御は、約 10 % と超音波距離センサを用いた制御と比較して小さな制御値を短周期で繰り返し、制御できている。

また、「600 mm/s」のような短時間での大きな距離変化の場合、超音波距離センサを用いた制御は、制御が追いつかず制御範囲から外れてしまった。レーザ測域センサを用いた制御は、目標値との距離を瞬時に検出できるため、約 50 % と大きな制御値で、壁面に追従している。したがって、レーザ測域センサを用いた制御の耐風性能が高いものと考えられる。

また、現場のニーズから新たなソリューション立案にも取り組む。今後も社会インフラの維持管理という社会課題解決に向けて取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会 道路分科会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，2014.
- 2) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構ロボット・AI 部：「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」基本計画，2017.
- 3) 国土交通省：新技術利用のガイドライン（案），2019.
- 4) 国土交通省：点検支援技術 性能カタログ（案），pp.2-113 - 2-120.2020.
- 5) 檜本 祥，林 篤史，金平 徳之：一定間隔で飛んでいます！，川田技報 Vol.39，2019.
- 6) 小林 大，山中 大樹，喜多 亮輔，林 篤史，高梨 智樹：光学デジタルカメラにより撮影した画像を用いた橋梁点検での留意点と展望，土木学会講演，2020

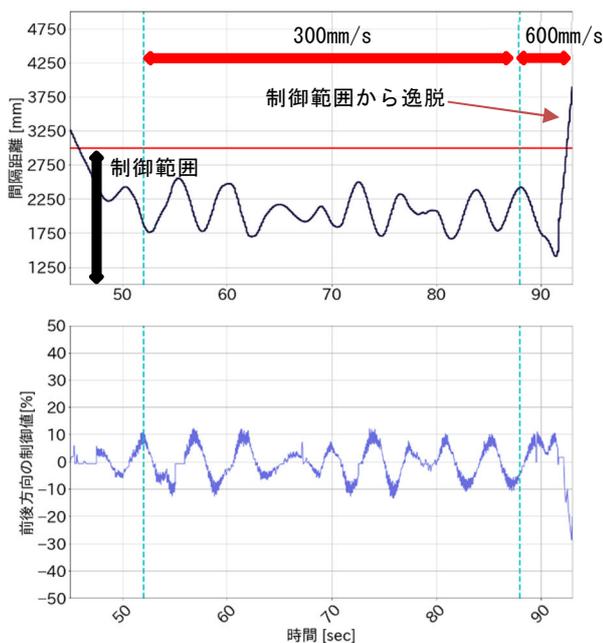


図 15 超音波センサを用いた制御の結果

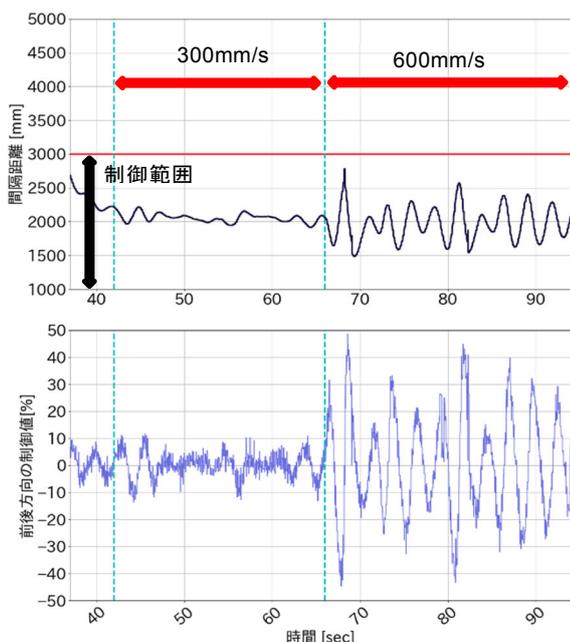


図 16 レーザ測域センサを用いた制御の結果

5. 結論

本報では、橋梁点検用ドローンの操縦支援システムの性能向上，特に耐風性能向上，正対制御，および壁面端部一定距離制御実装の概要・評価について述べた。従来の操縦支援システムと比較して，耐風性能向上が図られ，また上述の制御によって，より安定的に点検に必要な画像を取得することができるものとする。今後，レーザ測域センサを用いた操縦支援システムの現場適用を行い，現場からのフィードバックを受け，性能の維持に努める。