

ローターによる姿勢制御を利用した橋梁検査用レールカメラの開発

岩本達也¹, 葉山清輝², 入江博樹³, 松家武樹⁴

¹有明工業高等専門学校、^{2, 3, 4}熊本高等専門学校

概要：橋梁下面の点検には、橋梁点検車、ドローンによる撮影や、L型のアーム型カメラを使った撮影などが行われているが、車線規制が必要だったり、二名以上の人員が必要だったりするため、点検装置の改善が必要であると考えられる。本研究では、アーム型カメラを改良し、低コストで簡便に橋梁下面の撮影検査を行うことができるレールカメラを考案・試作し、動作確認を行ったので報告する。

1. はじめに

国土交通省では道路構造物の点検要領として、道路橋定期点検要領（平成31年2月策定）や道路トンネル定期点検要領（平成31年3月策定）を策定し、長期的な維持管理を目的としたメンテナンスサイクルの構築が進められている。平成31年3月策定の橋梁定期点検要領では、ひびわれなど一部の目視点検において、写真撮影（画像解析による調査）が代替方法として採用された。

橋梁の維持管理に着目すると、全国約73万橋の橋梁のうち、7割以上となる約52万橋が市町村道にあり、建築後50年を経過した橋梁の割合は、10年後には50%と増加する。橋梁は国が定める統一的な基準で5年に一度、近接目視による全数監視を実施しなければならない。橋梁下面の点検には、図1に示す橋梁点検車（ブリッジカー）、クレーン車などの点検車両、図2に示すドローンによる撮影や、図3に示すL型のアーム型カメラを使った撮影などが行われている。点検車両は台数が限られ人件費も大きく、停車スペース確保のため車線規制が必要である。ドローンによる撮影は熟練した操縦者が必要であり、操縦者と別に点検者が必要である。簡便なアーム型カメラについては、任意箇所の撮影に困難があり、カメラの荷重を支えるのに労力を要するため、カメラの操作者と点検者の二名が必要となる。このようなことから、橋梁の目視点検においては、点検装置の改善の必要があると考えられる。

最新の国内における橋梁等の画像計測技術として、点検支援技術性能カタログ（案）（国土交通省 平成31年2月）には7技術が登録されており、内訳はドローン利用技術4件、アーム型カメラ1件、懸垂型カメラ1件である。アーム型カメラ（開発：ジビル調査設計株式会社、有限会社インテス、福井大学）は、橋面上の操作ベースマシンより桁下にアームを挿入し、アーム上を稼動する各種点検台車を遠隔操作で近

接目視・打診点検を支援するものである。水平アームは最大10mまで延長することが出来るが、必要操作人数は3名（ロボットオペレータ1名、補助員2名）で総重量は2.5tであるため、運用には大型トラックによる運搬や人員の確保等が必要である。

海外に目を向けると、カーネギーメロン大学がARIAプロジェクトとしてドローンを用いた点検技術の開発に取り組んでおり、主にカメラや赤外線カメラを用いている。企業開発においてもパイプラインやプラントを飛行型ドローンによりモニタリングするものが多い

本研究では、低コストで簡便に橋梁下面の撮影検査を行うことができるレールカメラを考案し試作し、動作確認を行ったので報告する。また、実用化に向け、長尺化について検討した。



図1 橋梁点検車の例¹⁾



図2 ドローンの例²⁾



図3 アーム型カメラ(DSカメラ)³⁾

2. レールカメラの概要

本研究で提案するレールカメラの概要を図4に示す。レールカメラは、アーム型カメラにドローンにおける姿勢制御技術を融合させたものであり、特徴として、レールの片方をプロペラ推力で支えることでレール部半分とロッドの重量を保持するだけで良い。このように重量を積極的にプロペラ推力で支持するような実施例は他にない。また、複数のプロペラの回転数に差をつけることで回転軸まわりのモーメントが得られるため旋回方向の姿勢制御も可能である。レールの支持条件は両持ちとなるため、剛性に対する要求が低く軽量の部材が使用可能である。さらに、ロッド上部にGPSを設置し、各種センサを搭載することで撮影場所の正確な位置情報を記録できる。レールカメラは、ベース機から有線で給電できるためドローンと比較してバッテリーの容量による使用時間の制約がなく、有線であるため航空法の規制も受けない。

使用方法は、橋梁側面からこのレールカメラの垂直ロッドを持って下に垂らし(図5(a))、ローターを回転させることで推力を得てレール部分を持ち上げてレールを水平に保つ(図5(b))。その状態で上方を向けて設置されたカメラで橋梁下面の撮影を行う。使用時のレールの重量の半分はローターの推力により支えられるため、全荷重の半分の力でロッドを垂直下方に保持すればよい。図5(c)に示すようにレールは必ずしも水平でなくともよく、ローターの推力を調整して任意の角度で撮影することもできる。

3. レールカメラの試作

考案したレールカメラの動作確認を行うため、小型の試作機を製作した。試作したレールカメラを図6に示す。また、図7に制御システムを示す。試作機は、長さ1mのカーボンパイプにドローン用のフライトコントローラ⁴⁾(FC)とR/C

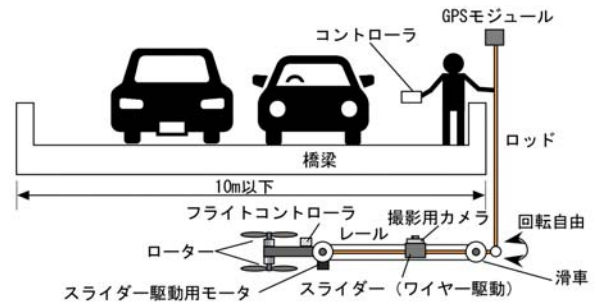


図4 レールカメラの概略図

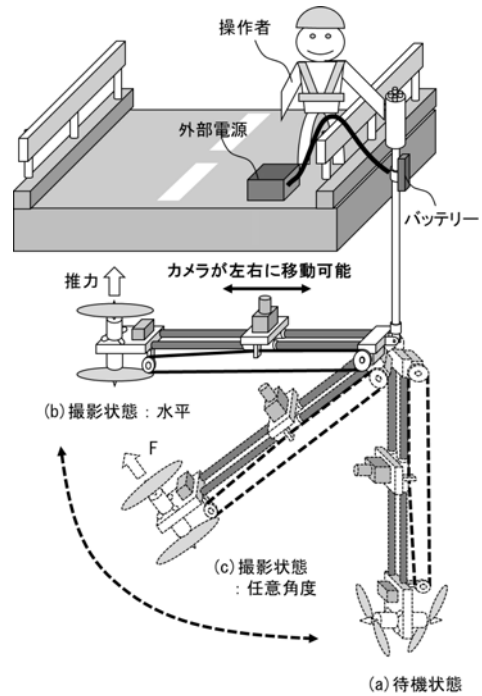


図5 待機状態と撮影状態

受信機を搭載し、ラジオコントロール(R/C)により操作できるようにした。姿勢制御においては、上下のローターの推力をFCにより自動で調整し、レールを任意の角度で安定化させることができる。

校内棟間の渡り廊下で動作試験を行った結果を図8に示す。レールがほぼ垂直にぶら下がっている初期状態からR/C送信機のスロットルをあげると、レールが水平になるまでローターの出力が上がり、その後はエレベータ操作でレールの角度を加減できた。カメラをレール上で左右に移動すると、カメラがローターに近づくほど負荷がかかり、逆にローターから遠ざかると負荷が小さくなるが、FCによりレールの水平は維持された。水平維持された状態で撮影した画像を図9に示す。図9より橋梁下面の様子を撮影できたことが確認できる。しかしながら、レ

ールが水平になるまでのスロットル操作においては、調整が難しく、操作量が小さいと目標角度に到達せず、また、操作量が大きすぎるとオーバーシュートやハンチングが確認されたため、初期状態から水平姿勢までの移行動作について、改善が必要である。

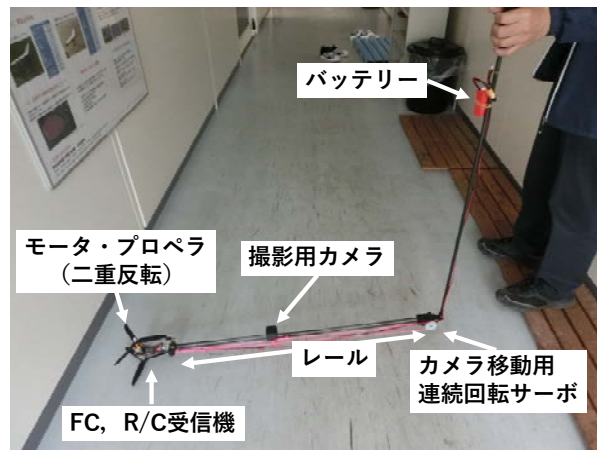


図 6 レールカメラの試作機

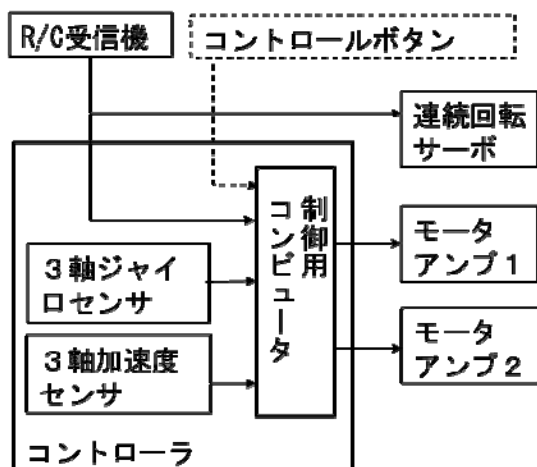


図 7 FC を利用した制御システム

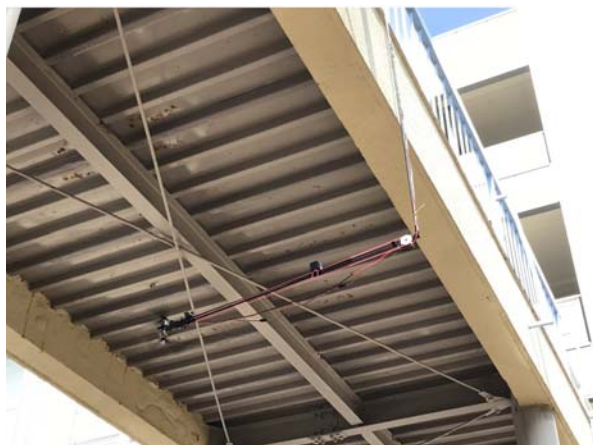


図 8 動作確認の様子



図 9 カメラによる撮影画像（渡り廊下下面）

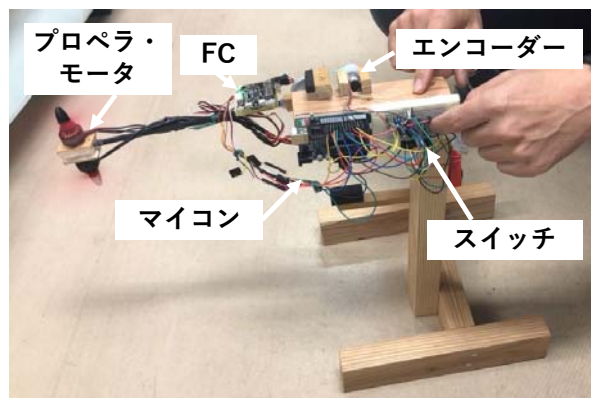


図 10 動作確認の様子

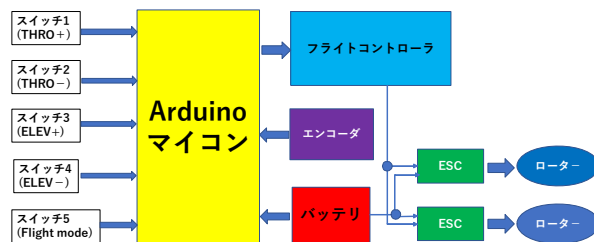


図 11 改良した制御システム

4. フライトコントローラとエンコーダを利用した姿勢制御方法の検討

初期状態から水平姿勢までの移行を安定して動作させるため、ロッドとレールの接続部に設置したエンコーダを利用した姿勢制御方法を検討した。図 10 に動作確認用のシミュレータを示す。また、図 11 に改良した制御システムを示す。制御方法は、エンコーダより出力されるレール角度を利用したシーケンス制御で、次の手順で動作する。

シーケンス 1 (seq. 1) :

始動ボタンが押されたら、ある角度に達するまでスロットルを上げていく。

シーケンス 2 (seq. 2) :

ある角度に到達したら目標角度に対してエレ

ベータ操作による ON-OFF 制御でピッチを追従させる。FC の飛行モードは rate 制御モード（目標角度を維持）とし、目標角度は一定時間ごとに 5 度ずつ更新させた。

シーケンス 3 (seq. 3) :

角度が 90 度を超えたら、FC の飛行モードを安定化モードに切り替えて、水平を維持させる。もし、赤外線測距センサで障害物を検知したらエレベータ操作で避ける。

シーケンス 4 (seq. 4) :

停止ボタンが押されたら、シーケンス 2 と同じ様に rate 制御モードにより目標角度を徐々に下げる。ある角度以下になったら次のシーケンス 5 へすすむ。

シーケンス 5 (seq. 5) :

スロットルを徐々に下げる。ある一定値以下で、ローターの回転を強制的に停止させる。

シーケンス制御のコントローラは、マイコン (arduino) を用いた。動作確認結果を図 12 に示す。図 12 より、初期状態から水平姿勢の維持、そして停止に至るまでボタン操作のみで安定的に動作することが確認できた。

次に、シーケンス 2 (seq. 2) における目標角度の更新間隔の影響について検討した。実験条件として、目標角度の更新間隔は、0.15 秒、0.3 秒、0.5 秒に設定し、エレベータスティック操作量（以下、操作量）は 50 とした。実験結果を図 13 に示す。図 13 より、目標角度の更新間隔が変わっても、seq. 2 以降のレール角度の変化に違いは見られなかった。これは、操作量が足りなかったためと考えられる。そこで、エレベータスティック操作量が姿勢制御に与える影響について調べた。実験条件として、目標角度更新 0.3 秒、操作量は 50, 80, 100 とした。実験結果を図 14 に示す。図 14 より、操作量 50 の場合は、水平姿勢に移行するまでの制御ループ回数が多いため、目標角度に追いついていないことが確認された。操作量 80, 100 の場合は、目標角度に追いついているが、操作量 100 は操作過多のために、レールの挙動がふらつく動作が確認された。

最後に、障害物検知による危険回避の動作確認を行った。実験結果を図 15 に示す。障害物として、アーム上方に手を近づけたときに、レール角度が下がっていることから、正常に動作していることが確認された。

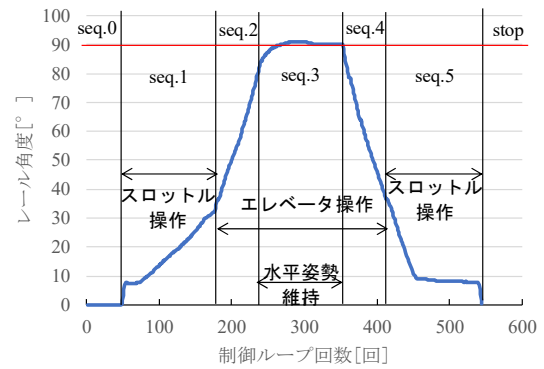


図 12 動作確認結果

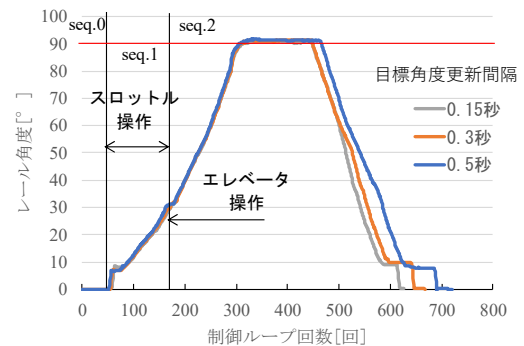


図 13 水平姿勢までの移行動作における目標角度更新間隔の影響

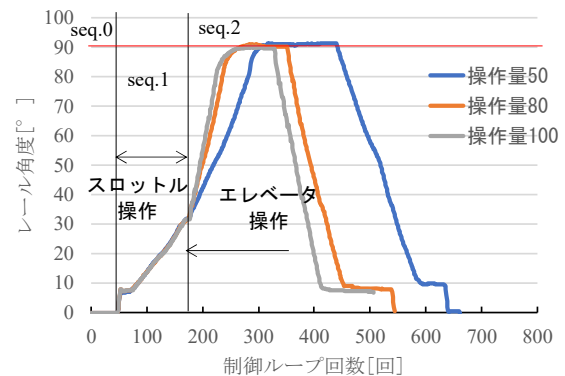


図 14 水平姿勢までの移行動作におけるエレベータスティック操作量の比較

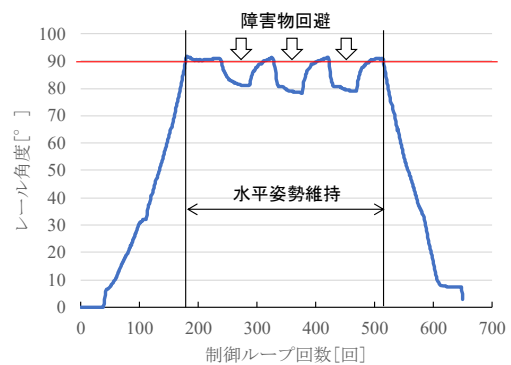


図 15 障害物回避機能の動作確認

5. レールカメラの長尺化の検討

目標とする橋梁の幅は 10m 以下であるため、5m までの長尺化を検討した。

レールカメラは片手で操作可能とするために、手持ち重量 1kg 以下（総重量 2kg 以下）を目標としている。そのため、レールおよびロッドには比強度の大きいマグネシウム（AZ31）の角パイプ（140g/m、5m で 700g）を採用した。また、ヒンジ部やスライダ等の各部品は樹脂材料などを用いて軽量の構造とした。図 16 に設計したヒンジ部を示す。設計したヒンジ部を、ABS 樹脂を用いて 3D プリンタで試作した。また、長尺化により重量が増加するため、プロペラを 13 インチに大径化した。ヒンジ部およびプロペラを組み立てた様子を図 17 に示す。動作確認したところ、図 18 に示すようにヒンジ部が破損した（黒い樹脂で補修した部分）。これは、レールの長尺化によりヒンジ部に作用するモーメントが大きくなり、負荷に耐えられなかったためと考えられる。このため、材料を軽量の金属材料（ジュラルミン）に変更した。製作したヒンジ部を図 19 に示す。

次に、長尺化した際の姿勢制御の有効性を検証するために、アーム長さ 1.2m のシミュレータを製作し、動作確認を行った。実験の結果、図 12 と同様な動作が確認され、提案する姿勢制御方法の有効性が確認できた。

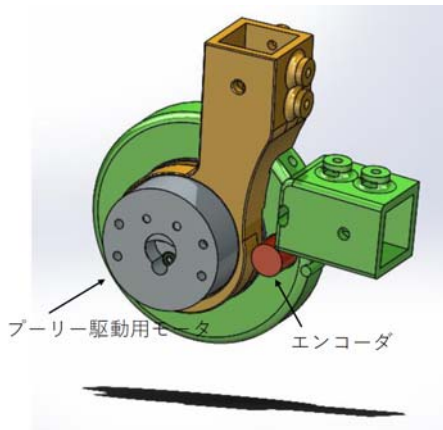


図 16 設計したヒンジ部



図 17 プロペラの大径化

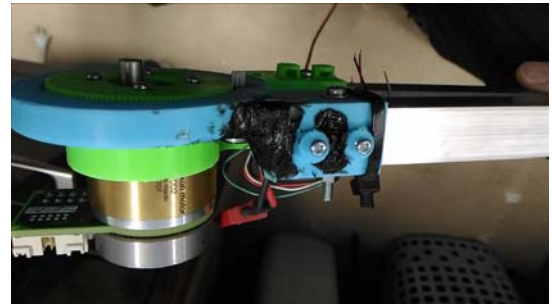


図 18 破損したヒンジ部



図 19 材料の変更



図 20 シミュレータのアームの延長

6. 今後の課題

6.1 構造部品の軽量化

今回製作した部品を用いてレール長さ 5 m、ロッド長さ 4 m のレールカメラを製作した場合の重量の見積もりを表 1 に示す。表 1 より総重量は約 2.9kg となった。また、持ち手で支える重量（手持ち重量）は、番号 1, 2 の重量と番号 3, 4, 5, 7 の半分なので、約 2kg となった。目標重量は手持ち重量 1kg 以下（総重量 2kg 以下）なので、約 1kg 超過している。重量の内訳をみると、ロッドとレール、ヒンジ部

の重量

番号	部品名	重量[g]
1	ロッド 4m	560
2	ヒンジ部	850
3	レール 5m	700
4	スライダ	50
5	ケーブル類	200
6	ローター	380
7	カメラ	100
総重量		2,940
手持ち重量		1,935

表 1 重量の見積もり

割合が大きいため、今後はこれらの軽量化を中心に検討する。

6.2 制御方法の最適化

本研究において、アーム姿勢制御を分散させないために、モーターON後のレール持ち上げの角度追従については、エレベータのON-OFF制御を用いたが、滑らか持ち上げるためには比例制御に替えた方が良いと考えられる。また、今後は、さらにアームを伸ばし制御方法の有効性について検証する。

6.3 GPS モジュールを用いた計測位置記録システムの開発

点検記録の効率的な収集のために、GPS モジュールを用いた測位システムを開発する。GPS モジュールには、高精度測位が可能なマルチバンド RTK を用いた高精度 GPS/GNSS モジュール (U-blox 社製 ZED-F9P 搭載、RTK 利用時の水平位置精度 0.010m) を採用し、動作確認した。今後は、スライダを駆動するプーリに取り付けたエンコーダからの出力を組み合わせ、カメラ位置を検出し、GPS 信号と組み合わせ、点検箇所を測位・記録するシステムを構築する。

7. 謝辞

本研究は、(一社)九州建設技術管理協会より助成を受けたものである。ここに謝意を表す。

8. 発表予定論文

1) Tatsuya IWAMOTO, Kiyoteru HAYAMA, Hiroki IRIE, Takeju MATSUKA, Development of Rail Camera for Bridge inspection with Attitude Control using Thrust of Rotors, Proceedings of WCNDT 2020

9. 参考文献

- 1) 株式会社タダノ
<https://www.tadano.co.jp/>
- 2) 渡辺 豊, 小型無人ヘリ SPIDER とポール搭載カメラ Giraffe による構造物点検システムの紹介と現場検証報告, 日本ロボット学会誌, 2016 年 34 巻 9 号 p. 577-578
- 3) 西日本高速道路エンジニアリング中国株式会社
<http://www.w-e-chugoku.co.jp/>
- 4) LibrePilot
<https://www.librepilot.org/>