

1. 研究開始当初の背景

地震などの災害時は、橋梁構造物の通行再開に先立ち安全点検による橋梁構造物の運転あるいは通行再開の判断を行う必要がある。災害直後の橋梁緊急巡回点検では、目視により点検・確認を行っているのが現状であり、構造物の状況把握に多大な時間を要する。特に基幹路線の場合、長い通行止めは大きな経済的・社会的損失につながり、迅速な点検手段の開発が課題になっている。さらに、地震直後の橋梁点検には、点検橋梁の崩壊の可能性もあり点検員の安全確保も重要な課題である。

申請者の橋梁の常時ヘルスマonitoringを迅速に行うための有人移動車両点検の開発の経験から、無人飛行体であれば緊急時の異常点検に有効利用できると考え「橋梁緊急点検を支援する無人飛行体点検システムの開発」の着想(図1参照)に至っている。

無人飛行体利用そのものは新しい概念ではないが、飛行安定性および運用上の安全性を確保した無人飛行体にセンシングシステムを搭載し、橋梁の緊急点検用として利用しようとする研究である。

また、無人飛行体による点検時間の短縮が可能となり、的確かつ迅速な被害状況把握による災害時の基幹道路の円滑な運用を支援することができる。さらに、研究成果の常時橋梁点検および社会基盤施設全般の緊急点検への活用も期待できると考えた。

2. 研究の目的

以上の背景をもとに、本研究では遠隔操作が可能なカメラ搭載の球形飛行体を構築する。また、屋内外の実験による飛行安定性、操縦性とデータ転送能力を明らかにし、橋梁構造物の緊急点検を支援する無人飛行体点検システムの開発を目指す。そのために、以下のことを明らかにすることを研究の目的としている。

- (1) 無人飛行体として、もし飛行体が構造物に接しても飛行支障がないように、球体フレームの中にプロペラなどの飛行システムを搭載できる球体の無人飛行体を構築する。
- (2) センシング機能として画像センサなど無線センシングの導入を検討する。
- (3) 安全性を含む実環境での運用性を検討する。
- (4) 実用化のための技術的課題の把握と常時橋梁点検への拡張性を検討する。

3. 研究の方法

- (1) 球形飛行体の整備と小型無人飛行体点検システムの構築



図1 小型無人飛行体による移動点検の概念

構築した無線センシングシステムと小型無人飛行体の組み立てによる小型無人飛行体点検システムを構築する。小型無人飛行体として市販の無線ヘリコプターの使用も可能であるが、点検対象構造物との接触による飛行機能の停止や墜落による周辺への安全性に懸念があるため、防衛省技術研究本部開発の球形小型飛行体を制作する。

また、無人飛行体点検システムの運用において、飛行体の点検経路指定など飛行体操縦のための遠隔操縦およびデータ受信機能を備えた簡易管制システムの構築を行う。

- ① 球形飛行体の制作：球形飛行体の設計図は防衛省技術研究本部の許可のもとにすでに入手しており、使用の許可も得ている。関連飛行体の図面および特許広報(特開 2010-52713)を検討した結果、市販の部品による制作が可能であるため、外注し球形飛行体を制作する。
- ② 小型無人飛行体点検システムの構築：制作予定の球形飛行体は、球殻体の中にプロペラとカメラなどのセンシングシステムを納めるように設計されており、無線センシングの球形飛行体に導入し小型無人飛行体点検システムを構築する。特に、球殻体により点検対象物と接触しても飛行やモニタリング機能を損なうことはない。また、球殻体をクッション性が高い材料にすることで墜落に対する周辺への安全性を確保できる。

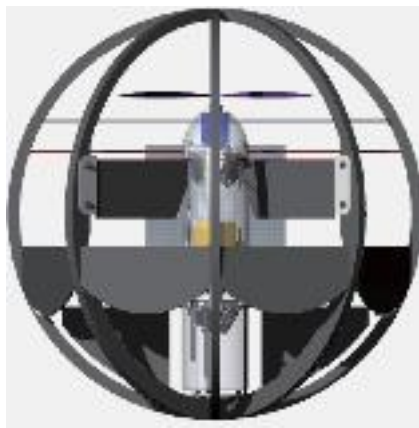
(2) 軽量の画像センシングシステムの整備

画像やセンサデータの無線収集システムの整備とともに、無線センシングとの組み合わせによる無線センシングシステムを整備する。

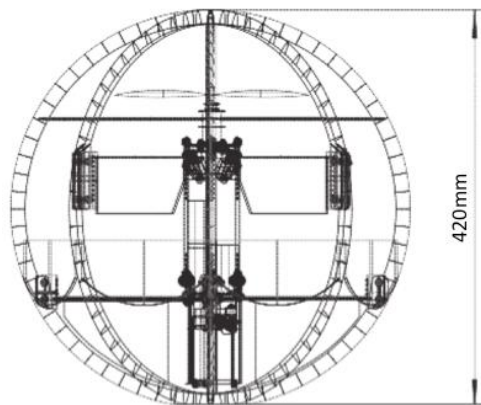
- ① 画像センシングシステム整備：無人飛行体に装着予定の超小型 PC カメラから撮影される画像の転送できる画像センシングシステムを整備する。そのために市販の CMOS カメラの性能調査を行い、適切な PC カメラの選定を行う。選定において一般のカメラとの性能比較を行う。



(a) 平面図



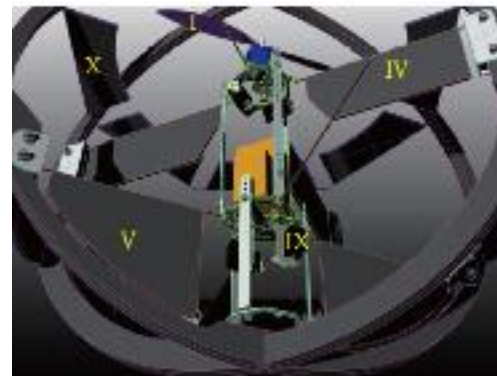
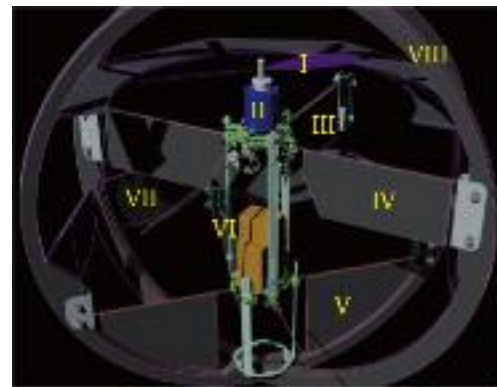
(b) 正面図



(c) 設計図

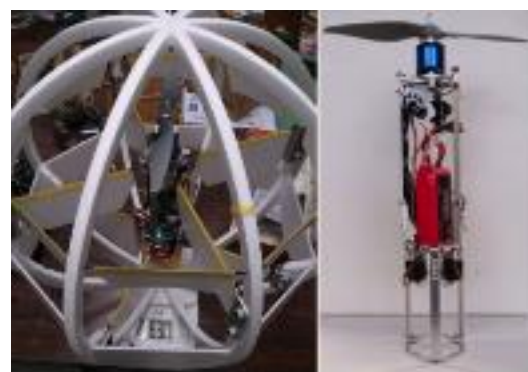
図 2 球形飛行体の概略図

- ② 画像処理システムの構築：無人飛行体により撮影された画像の処理について検討を行う。一般のカメラと PC カメラを用い、性能テストを行う。性能評価には、停止画および動画を検討する。実験室の移動体に各々のカメラを設置し、遠方 (0.17m~3m) のひび割れが入っているコンクリート試験体を撮影することで性能テストを行う。また一般カメラに比べ画像が劣ることが予想される PC カメラの画像によるひび割れの同定可能性を高めるために数値位計算による手法を検討する。



- I. プロペラ
- II. DC ブラシレスモーター
- III. エレベーター
- IV. ラダー
- V. エルロン
- VI. Li_Po バッテリー (11.1V, 1300mA)
- VII. 主翼
- VIII. メーンフレム上のカメラ設置位置
- IX. 超小型サーボ
- X. 補助翼

図 3 駆動装置の詳細



試作1号機

駆動システム

図 4 試作 1 号機の写真

4. 研究成果

- (1) 球形飛行体の構築
2 年にわたり、球形飛行体の試作を行った。
- ① 球形飛行体の設計：軽量化と試作のために直径 42cm の「スチレンボードフレ

ム」の飛行体の開発を行った。図2に開発球形飛行体の概略図を示す。

- ② 駆動装置の設計：飛行推進動力として以下の図3に示すように、DC ブラシレスモーター（151W）に推力 1.65kg のプロペラ（11×3.8SF）を導入している。駆動および制御装置として姿勢制御には3軸ジャイロ（Eagle A3-PRO SE）を設置している。3軸ジャイロの命令に従いラダーとエルロンをデジタルサーボ（DS318）を用いて姿勢制御を行う。また操縦受信制御のために11chのレシーバー（RG1131B）を設置している。また、全ての材料や部品は市販品を用いている。

- ③ 操縦送信制御：市販の11chのプロポ（XG11）を利用している。特に将来のセンサの増設などに備えてチャンネルに余裕がある11chのプロポを利用することにした。

試作機と駆動システムの写真を図4に示す。試作1号機の総重量は630gである。ただし墜落などを想定するとスチレンボードフレームは壊れやすいことから球形のメインフレームは図5のようにFRPで補強を施し（試作機2号機）飛行試験を行った。ただし重量は800gに増加している。

飛行テストの結果、飛行は可能であるものの全体的なバランスの制御に大きな問題ある結果となった。また球形フレームの補強だけでは強度が不足しており、球形フレームそのものをFRPで再製作することになった。FRPフレームの試作機3号を図6に示す。



図5 補強した試作2号機の飛行テスト



図6 FRP 試験機（3号機）の飛行テスト

表1. 画像(4MB)転送時間

無線規格	伝送速度	画像伝送時間
ZigBee	250kbps	128秒
Bluetooth	1Mbps	32秒
LAN(11b)	11Mbps	2.9秒
LAN(11g)	54Mbps	0.6秒
LAN(11n)	300~600Mbps	0.05~0.1秒

- (2) 軽量の画像センシングシステムの整備

画像センサの整備や画像データの処理・分析について検討を行い、球形飛行体へ搭載できる画像センサと画像データの分析によるひび割れの同定を可能にする手法について検討を行う。特に目視点検の代替として、0.1mmのひび割れが撮影できるかについて検討を行う。

- ① 画像センサの選定：飛行体に搭載するセンサの候補としてNCM13-Jを選定した（図7のカメラモジュール参照）。NCM13-Jは画素数1280×1024であり、24bitフルカラーで画像圧縮なしとすると、画像サイズは約4MBになる。各無線規格の最大伝送速度で通信した場合の伝送時間は表1のようになる。秒単位で遅延が生じると使用感に影響が出ると考えられるため、無線LANの11g、11nを使う必要があると考えられる。他方、高速な無線規格を使うほど無線通信モジュールの消費電力は大きくなる傾向にあり、電源確保との兼ね合いも考える必要がある。このように、データ蓄積・転送方法については、画像サイズとリアルタイム性、および無線通信モジュールの消費電力のバランスを取る必要がある。

- ② 画像処理システムの構築：無人飛行体により撮影された画像の処理について検討を行う。一般のカメラとPCカメラを用い、性能テストを行う。性能評価には、静止画および動画を検討する。実験室の移動体に各々のカメラを設置し、遠方（0.17m~3m）のひび割れが入っているコンクリート試験体を撮影することで性能テストを行った。また一般カメラに比べ画像が劣ることが予想されるPCカメラの画像によるひび割れの同定可能性を高めるために数値位計算による手法を検討する。照度が十分であれば期待性能通りの精度を得ることができた。しかし、下記のような課題が判明した。
- 暗い環境では十分な性能が得られなかった。
 - 飛行体の飛行速度が速くなると当然ながら画像の精度は低下するが、シャッタースピードを速くすることで対策が可能であることを証明した。

反面、シャッタースピードを上げると取り込める光量が下がるため、照度の低下と同等の影響が出ることも判明した。

十分な精度が得られなかった際の解決策として、超解像という技術を活用し、疑似的に解像度を増幅する方法の有効性を検証した。図8のように、パラメータをうまく調整すればクラックを鮮明に捉えられることが確認できた。高精度の結果を得るためにはソフトウェア処理時間が膨大になり、その対策が課題である。

2カ年の研究により、球形の無人飛行体の設計・製作には成功したものの、飛行安定性については今後の課題である。

センシングに関しては、画像センシングに必要な事前検討が行われ、無人飛行体のみならず移動ロボット点検などに十分活かせる知見が得られた。

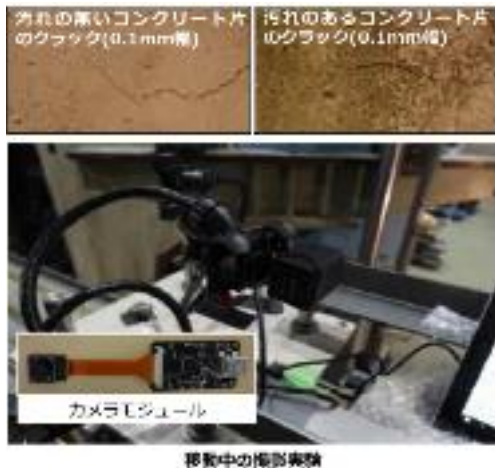


図7 カメラモジュール搭載の移動体によるひび割れ撮影とひび割れ同定可能性実験。

1mの距離から低解像度カメラで撮影したクラック



超解像処理



上の画像を超解像技術により疑似的に解像度を増幅

クラックの色が濃くなり、輪郭もかなり鮮明になっており、オリジナル画像ではクラック輪郭が不鮮明だった画像が、超解像の結果では鮮明に確認出来るレベルになっている。

図8 超解像度解析によるひび割れの検出

本研究の採択後、ドロンを用いた橋梁目視点検への利用の研究が活性化されたのは、特記すべき点であり、本研究の知見が今後の類似に研究に活かせることを期待する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

- ① C.W. Kim, K.C. Chang, Y. Sasaka, Y. Suzuki, "A Feasibility Study on Crack Identification Utilizing Images Taken from Camera Mounted on a Mobile Robot", 6th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, 7-9 December 2016, Tasmania, Australia.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページに関連図面および試験時の動画を掲載する予定である。

関連 URL :

<http://www.ce.t.kyoto-u.ac.jp/en/information/laboratory/infra>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金 哲佑 (KIM, Chul-Woo)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号： 80379487

(2) 研究分担者

八木 知己 (YAGI, Tomomi)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号： 30293905

杉浦 邦征 (SUGIURA, Kunitomo)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号： 70216307

(3) 連携研究者

該当なし。