

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：57102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820198

研究課題名(和文) 小型壁面検査ロボット群で構成されるトンネルなどの自動点検システムの開発

研究課題名(英文) Development of automatic inspection system for tunnel composed of small wall inspection robot group

研究代表者

岩本 達也 (IWAMOTO, Tatsuya)

有明工業高等専門学校・創造工学科・准教授

研究者番号：20390528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ビルや橋梁およびトンネルなどのコンクリート構造物の供用年数が長くなり、コンクリート片落下が頻発するようになった。このような問題の解決方法として、第一に構造物の再構築が考えられるが、再構築の必要のない構造物に対しては、CO<sub>2</sub>削減の観点からも、問題箇所を検出し、その部分のみを補修する方が好ましい。また、広大な検査領域を持つ構造物に対しては、効率的な検査方法が望まれる。

本研究では、トンネルなどの自動診断システムの開発を目的として、プロペラ推力を利用した検査ロボットを開発し動作確認を行った。

研究成果の概要(英文)：Many concrete structures are deteriorating to dangerous levels throughout Japan. A reconstruction of the structure is one solution to this problem. However, rebuilding an entire structure is difficult given recent economic conditions. In addition, with regard to CO<sub>2</sub> reduction, repairing only the deteriorated parts is good for the environment. Because reconstruction of the entire structure generates a great deal more CO<sub>2</sub> than the repair of the deteriorated parts, the former approach has a negative influence on the environment. Therefore, a method to correctly detect deterioration in the affected parts is required. Furthermore, many structures need to be inspected, and the inspection area is wide, therefore, inspection methods that are highly efficient are required.

In this study, we developed a testing machine using a multirotor UAV for tunnel inspection as an efficient inspection method.

研究分野：工学

キーワード：維持・管理 非破壊検査 打音検査 ロボット コスト縮減

1. 研究開始当初の背景

日本の高度経済成長期にビルや橋梁などのコンクリート構造物が大量に建築され、橋梁やトンネルなどの道路構造物においては、全橋梁数の約40%、全トンネル数の約25%を占めている。その多くが建設後40年以上経過しており、耐用年数に近づきつつある(図1は2002年現在)。このため、近年コンクリート片の落下が頻発しており、平成21年1月には長崎自動車道(上り線)久山川橋からコンクリート片が落下し、走行中の車両を損傷させる事故が発生している。この事故では幸いなことに負傷者はいなかったが、コンクリート片の落下は第三者被害を引き起こす可能性が高いため、早急に解決されなければならない問題である。

このような問題の解決方法として、第一に構造物の再構築が考えられる。しかし、近年の経済状況は構造物全体の再建築をゆるさない。また、CO<sub>2</sub>削減の観点からも、問題個所を検出し、その部分のみを補修する方が好ましい。構造物全体の再建築は、問題個所のみを補修に比べて大量のCO<sub>2</sub>を発生するからである。したがって、問題個所を正確に検出する方法が求められている。

壁面の検査方法としては、作業者による打音検査と赤外線による検査が一般的である。

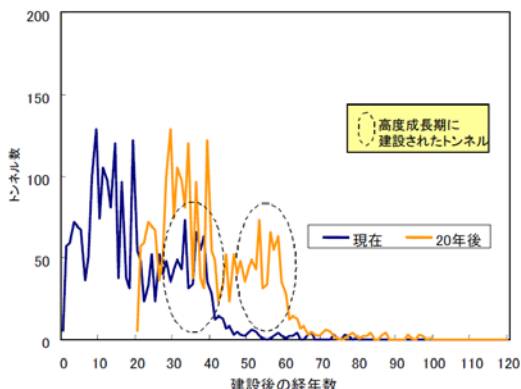


図1 トンネルにおける建設後の経年数の推移(2002年現在)

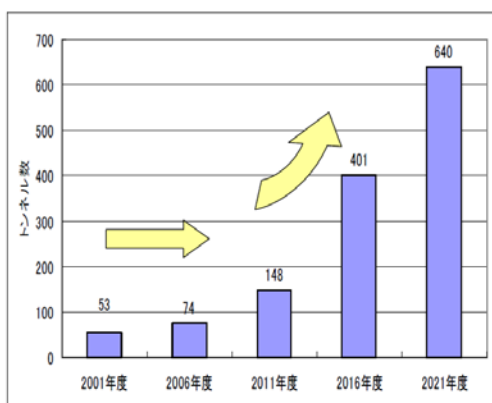


図2 トンネルの経年別分布状況(2002年現在)

打音検査は、信頼性は高いが作業性に劣る。赤外線検査は、逆に作業効率は高いが信頼性が低い。そこで、両方法を組み合わせて検査を行うことが一般的である。しかし、検査が急がれている個所は膨大で、一件当たりの検査面積も広大であるため、作業性の高い検査方法が要求される。上述の打音法と赤外線法を組み合わせた方法は、作業性の面で問題がある。また、いずれの方法も高所の検査面では実施が難しい。

2. 研究の目的

本研究では、トンネルなどの構造物の自動診断を行う点検システムを開発することを目的とする。自動点検システムは、小型ロボット群およびカメラを用いた画像処理による位置測位システムにより構成され、無線操縦により垂直面および天井面を走行し、壁面を鋼球などで打撃しながら問題個所を検出する。効率的で、しかも足場を必要としないため、コストダウンが実現できる。

3. 研究の方法

図3に、プロペラ推力式検査ロボットの概略図を示す。ロボットは、天井に押し付けるための推力を発生させる推力部、壁面を移動するための駆動部、マイコンやフライトコントローラー、無線機器などの制御部、打撃装置やマイクロフォンなどの計測部およびバッテリーから構成される。ロボットの本体にはDJI社のF330をベース機として使用した。ロボットの寸法はプロペラを含み500mm×500mm、高さは250mmである。また、バッテリーを含む全ての重量は1.25kgであった。図4に外観を示す。各部の構成は以下のとおりである。

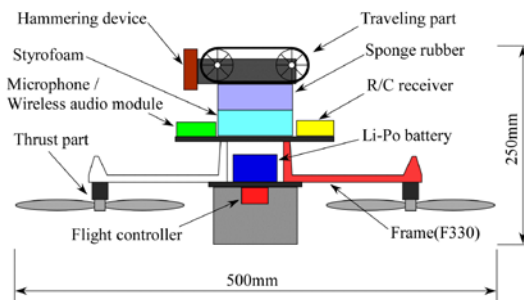


図3 検査ロボットの概略図



図4 検査ロボットの外観

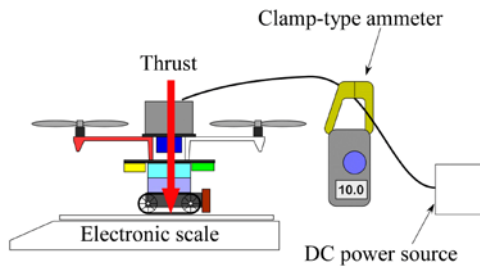


図5 推力測定実験

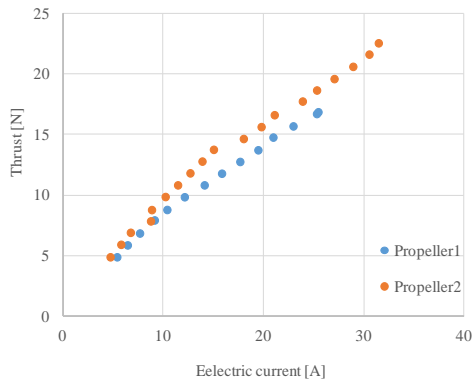


図6 推力と電流の関係

(1) 推力部

推力部は、4組のプロペラとブラシレスモーターにより構成される。ブラシレスモーターはスピードコントローラーによって駆動される。予備実験として推力の測定を行った。実験の概略図を図5に示す。測定には、電子スケールに点検ロボットを上下反転させて固定し、スロットルを変化させたときの電流をクランプ式電流計により測定した。電源には、直流電源(12V、1kW)を用いた。実験結果を図6に示す。最大推力は、プロペラ1(直径8インチ、ピッチ4.5インチ)の場合、16.9N、プロペラ2(直径9インチ、ピッチ4.5インチ)の場合、22.5Nであった。以上の結果より、プロペラ2を選定した。

(2) 走行部

走行部は、ゴムクローラーと駆動用モーターで構成され、プロペラ推力によって壁面に押しつけられた状態でクローラーを駆動することで天井面の移動を可能とする。また、ベース機(F330)と走行部との間には厚さ10mmのゴムスポンジを挟み、天井面の傾斜に対応できるように工夫した。

(3) 制御部

制御部は、主にブラシレスモーター、壁面移動用モーターを制御する。飛行するための姿勢は、フライトコントローラーが制御する。

(4) 計測部

計測部は、ソレノイド(CB0730 タカハ機工)を用いた打撃装置および、マイクロフォン

(ADMP441、ANALOG DEVICES)および無線音声

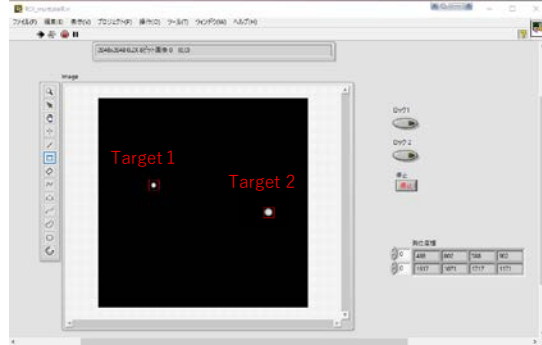


図7 位置測位システムの表示画面

送信装置(CPI-WAM800、CPIテクノロジーズ)で構成される。ロボットの操作はラジオコントロール用コントローラを使用し操縦者が目視で操縦した。

(5) 位置測位システム

位置測位システムは、赤外線カメラとPCにより構成される。まず、マーカー(赤外線LED)を搭載した点検ロボットを赤外線カメラで撮影する。撮影された映像はPCにより画像処理され、位置を特定する。図7に、測位システムの表示画面を示す。位置測位システムは、二つ以上の対象を追跡することが可能であり、複数台のロボットにも対応できる。

4. 研究成果

(1) 壁面移動性能の検証

壁面移動性能を検証するために、傾斜させた合板に対して移動性能試験を行った。合板には、コンクリート型枠用合板(厚さ12mm)を用いた。図8に実験方法を示す。性能試験は、水平方向移動(x方向)、傾斜方向移動(y方向)、旋回の3項目について評価した。評価基準は、ロボットの移動がコントローラの操作に十分追従できる場合が○、追従できないときがある場合が△、追従できない場合が×とし、目視によって判定した。傾斜角度は、水平状態の0°から操作不能になるまで5°ごとに変化させて試験を行った。試験結果を表1に示す。

試験結果より、傾斜角度が0°から15°までは移動性能は良好であった。20°から40°の範囲では、傾斜方向移動と旋回性能において、コントローラの操作を追従できない場合があった。これは、図9に示すように、傾斜角度が大きくなると、スポンジによる角度調整機能の範囲を超え、クローラーが部分的にのみ接触する状態になり、移動に必要な接触面積が十分でなくなったためと考えられる。45°以上では、傾斜方向移動と旋回は追従できなくなり、55°以上ではプロペラが合板に接触し、操縦不可能となった。

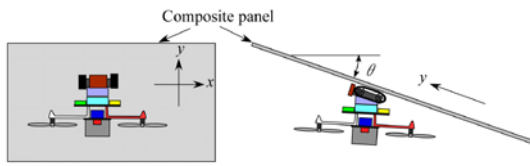


図8 壁面移動性能試験

表1 壁面移動性能の検証結果

Angle of inclination $\theta$ [°]	x-direction movement	y-direction movement	Turning movement
0	○	○	○
15	○	○	○
20	○	△	△
40	○	△	△
45	○	×	×
50	○	×	×
55	×	×	×

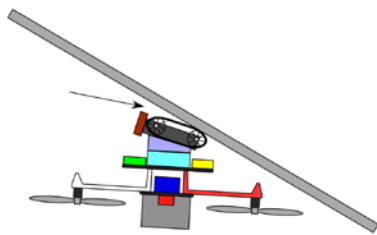


図9 壁面とクローラーの状態

(2) 欠陥検出性能の検証

飛行中の欠陥検出性能を確認するために、図10に示す試験片を用いて検証を行った。試験片は、600mm × 600mm × 200mmのコンクリート片の裏側に直径216mmの空洞がある。表面から空洞までの厚みは20mmである。計測は、空洞中央のC点（欠陥部）と空洞の外側のA点（健全部）で行った。測定は、コンクリート試験片の下側に検査ロボットを設置し、飛行中にコンクリート表面を打撃したときの音をマイクロフォンで測定した。測定音は、無線音声送受信装置、サウンドカードを介してPCに保存した。サンプリング周波数は44.1kHzとした。

測定された打撃音を図11に示す。図中の矢印が打撃音である。一定間隔で打撃を行っていることが確認できる。次に、打撃音の測定結果（500点）を用いて周波数解析（FFT）を行った。その結果を図12、図13に示す。図12はC点、図13はA点の実験結果である。図13において、約1.5kHzに円板の曲げ振動と思われるピークが確認でき、欠陥部の検出が可能であることが分

かった。

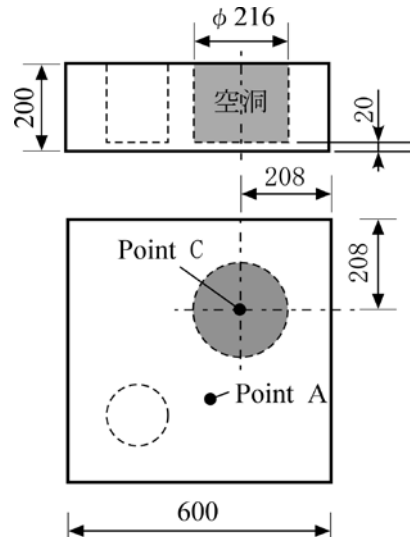


図10 コンクリート試験片

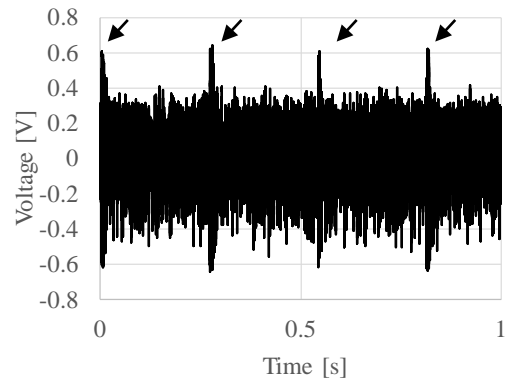


図11 打撃音

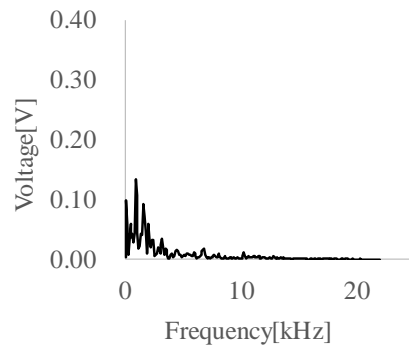


図12 打撃音の周波数分布（A点）

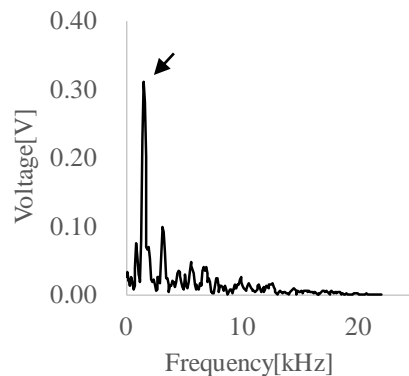


図13 打撃音の周波数分布 (C点)

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1件)

Development of testing machine for tunnel inspection using multi-rotor UAV、Tatsuya Iwamoto、Tomoya Enaka and Keijirou Tada  
Journal of Physics: Conference Series、  
vol. 842、2017年  
doi :10.1088/1742-6596/842/1/012068

[学会発表] (計1件)

コンクリート構造物のためのプロペラ推力を利用した検査ロボットの開発、岩本達也、江中幹弥、多田慶次郎、日本機械学会九州支部講演論文集 178(1) 329-330、2017年

6. 研究組織

(1)研究代表者

岩本 達也 (TATSUYA IWAMOTO)

有明工業高等専門学校・創造工学科・准教授  
研究者番号：20390528