

飛行船型の水路トンネル調査ロボットの開発

トンネルマンボウ

原 田 耕 司

小規模な水力発電の導水路や農業用排水の送水を目的とする小断面の水路トンネルが、震災等の災害を受けた場合、安全性等の理由から無人で水路トンネル内の被害状況を調査することが重要である。水路トンネルの調査では、狭いトンネルを長距離調査することが必要となるが、橋梁等の調査に用いられることが多いドローンでは、電源等の課題があり適用が難しい。そこで、飛行のための消費電力が少なく水路トンネル内での自律飛行が可能な、飛行船型の水路トンネル調査ロボット「トンネルマンボウ」（以下「本ロボット」という）を開発した。本稿では、本ロボットの概要を述べる。

キーワード：水路トンネル，維持管理，自律飛行，長距離，飛行船

1. はじめに

水路トンネルは、利水や治水を目的としたトンネルで、道路や鉄道のトンネルと同様に社会経済活動に必要な重要構造物である。水路トンネルには、導水路や放水路など発電目的のトンネルと農業用排水の送水を目的とするトンネル等があるが、我が国では発電目的の水路トンネルだけでも、その総延長は約 4,700 km に達しており、平均経過年数は約 50 年以上になり¹⁾、効率的に維持管理を行う技術が望まれている。

また、水路トンネルは社会経済活動に必要な重要構造物であるため、地震等の災害後、速やかに被害の状況を調査する必要があるが、災害後の水路トンネル内は崩落等の危険性があり、点検員が水路トンネル内に入って調査するには、安全上の課題があった。

水路トンネルの特徴は、道路トンネルや鉄道トンネルに比べ断面が小さく、また延長が長いことである。橋梁等の調査に用いられることが多いドローンでは、飛行時間に制限があることや回転翼で発生する風による機体の制御等に課題があり、適用するのが困難であった。

そこで、ドローンの課題を解決する技術として、飛行のための消費電力が少なく、また揚力を回転翼で得る必要のない飛行船型の水路トンネル調査ロボット（本ロボット）を開発した^{2)~4)}。

2. 本ロボットの概要

本ロボットは、写真—1に示すように安全性の高いヘリウムガスを封入したバルーンを浮体として、搭載したカメラで水路トンネル内の画像を取得しながら、自律飛行で水路トンネルを無人で調査できるロボットである。本ロボットの仕様等を以下に述べる。



写真—1 本ロボットの全景

(1) 本ロボットの仕様

本ロボットの飛行速度は、表—1に示すように標準で約 1.5 km/h で、調査可能な水路トンネルの延長は 2,500 m（理論上は 6,000 m）となっており、ドローンでは調査できない、延長の長い水路トンネルも調査できる。また、水路トンネルは山間部のアクセスが悪い地域に整備されていることが多いが、本ロボットの

表一 本ロボットの仕様

項目	仕様
外形寸法 (バルーン)	直径：1,200 mm 長さ：3,700 mm
質量	約 5,000 g
飛行速度	標準：約 1.5 km / h
電源	リチウムイオンバッテリー
撮影精度	10 mm を判別可能
調査可能延長	2,500 m (理論上：6,000 m)

質量は約 5,000 g と軽量であるため、山間部でも容易に運搬が可能となっている。

(2) 本ロボットの構成

本ロボットは、**図一**に示すようにバルーン、ガイドフレーム、機体、カメラモジュール、スラスト等で構成されており、いずれも、長距離自律飛行のための対策を講じている。

(a) バルーンおよびガイドフレーム

バルーンは、軽量化を図るため、厚さ 0.08 mm の塩化ビニル製としている。バルーンの設定寸法は、直径 1,200 mm × 長さ 3,700 mm であり、各種機器を搭載して数 km の自律飛行が可能なサイズとしている。バルーンにヘリウムガスを封入した際の浮力は、気温や気圧等の条件により異なるが 5,000 ~ 5,600 g となり、調査の際には、本ロボットのバランスを保つために、質量調整用の錘で浮力の調整を行う。

本ロボットには、スラスト制御による電力消費量を低減することと、水路トンネル側壁等への接触によるバルーンの損傷防止のため、**写真一**に示すガイドフレームを取り付けている。ガイドフレームは、カーボン製のアーム先端にジュラコン製のローラを備えて

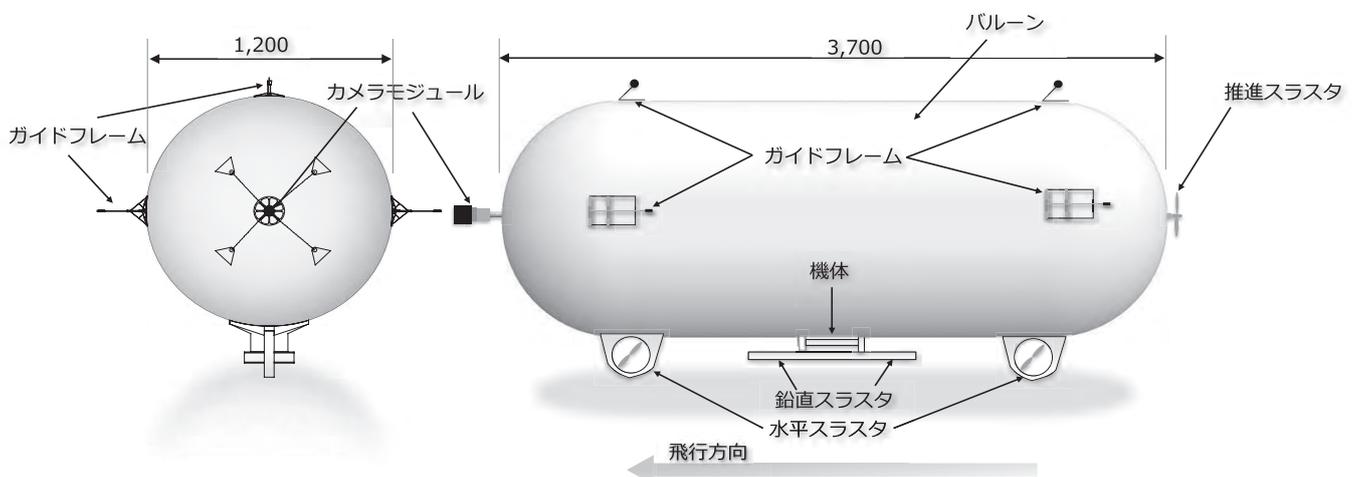


写真一 ガイドフレーム

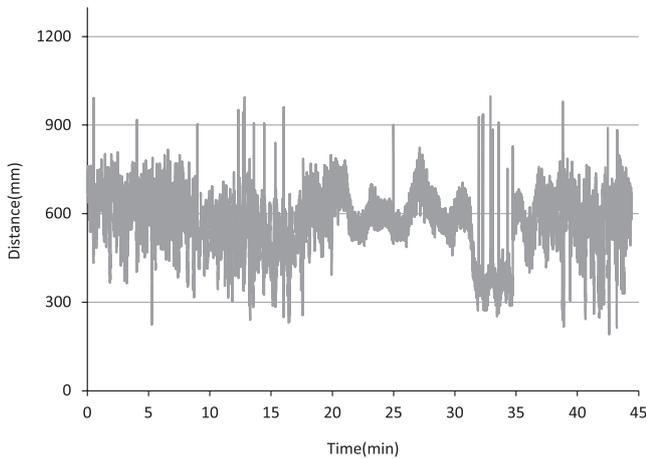
おり、水路トンネル側壁等との接触時に摩擦による飛行速度の低下を抑制する構造となっている。ガイドフレームの有無による、鉛直方向の本ロボットの挙動例を**図一**に示す。**図一**の縦軸は、本ロボットからトンネル底部までの距離を示している。ガイドフレームを取り付けることにより、鉛直方向の挙動が安定しており、電力消費量を低減できることがわかる。

(b) 機体および浮力調整装置

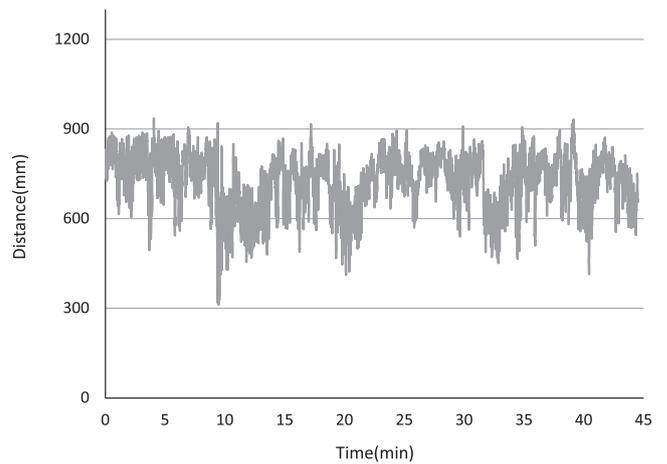
写真一に示す機体は、ポリスチレンフォーム製のメカデッキモジュールに、本ロボットの自律飛行を制御するための機器を搭載している。主な搭載機器は、制御用マイコン、リチウムイオンバッテリー、鉛直スラスト、浮力調整装置である。ヘリウムガスは分子が小さいため、塩化ビニル製のバルーンから徐々に抜けるため浮力が低下する。このため、バラスト水を入れたプラスチック製の容器に点滴装置を接続した浮力調整装置を機体に搭載している。



図一 本ロボットの構成

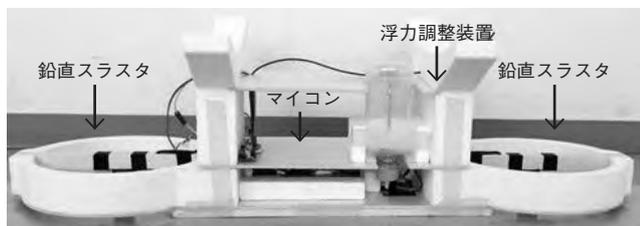


(a)ガイドフレーム無



(b) ガイドフレーム有

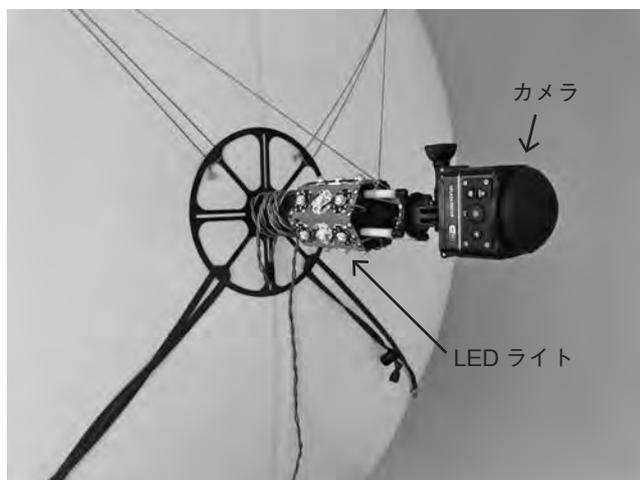
図一 本ロボットの鉛直方向の挙動例



写真一 3 機体



写真一 5 撮影画像例



写真一 4 カメラモジュール

(c) カメラモジュール

カメラモジュールは、写真一 4 に示すように 360 度カメラと 54 W の LED ライトをフレームに装着したものである。バルーンの前端に固定することで、水路トンネルの天端、側壁および底部までの連続画像 (2,880 × 2,880 ピクセル) を撮影できる。トンネル全周に照明が届くよう、電力消費量の少ない LED ライトをフレームに装置することにより照明が全くない真っ暗な水路トンネルでも、写真一 5 に示すように鮮明な画像を取得できる。なお、得られた画像データから、幅

10 mm 程度のひび割れ等を判別できることを確認している。

(3) 自律飛行のための制御

本ロボットは、鉛直方向と水平方向を独立して制御している。以下にそれぞれの概要を述べる。

(a) 鉛直方向の制御

本ロボットは、浮力調整装置によりヘリウムガスの抜けによる浮力低下を防いでいるが、鉛直方向の微細な調整は、鉛直スラストで行っている。鉛直方向 (Z 軸方向) の本ロボットの位置は、検出対象の材質や色の影響を受けず、トンネル底部に溜まった水に対しても正しい距離が測定可能な超音波センサを採用している。

鉛直制御は、図一 3 に示す超音波センサで得たバルーン中心とトンネル底部までの距離 δz を条件式に当てはめ、バルーンがトンネル鉛直方向の中心にくるように、鉛直スラストのモータの PWM 値を制御するシステムを採用している。

距離センサの値 δz とモータの PWM 値の関係を図一 4 に示す。 δz の原点 δc は本ロボットがトンネル

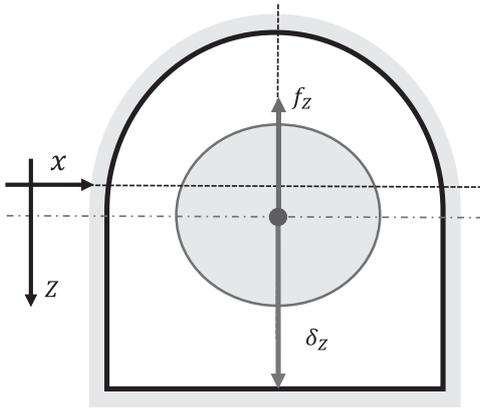


図-3 鉛直方向の制御イメージ

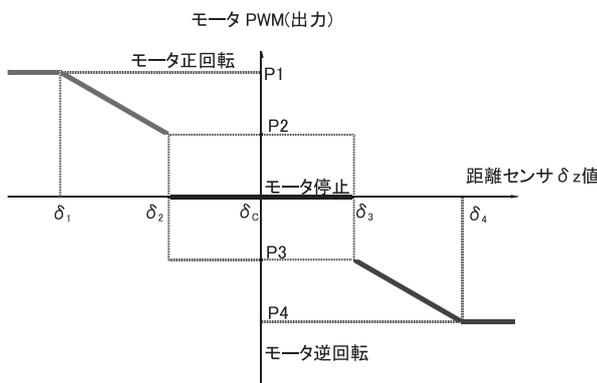


図-4 距離センサーの値とモータ出力の関係(鉛直方向)

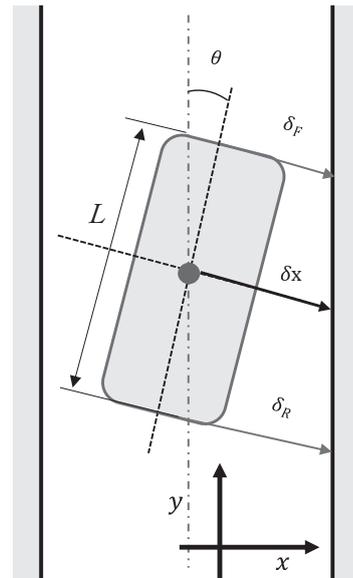


図-5 水平方向の制御イメージ

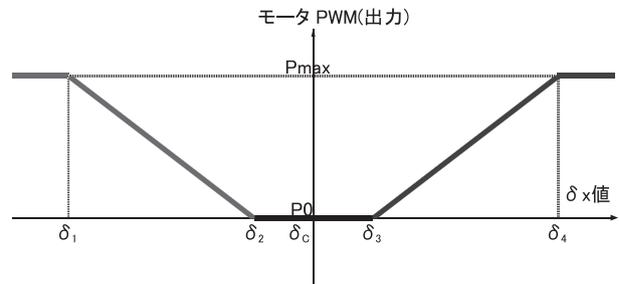


図-6 距離センサーの値とモータ出力の関係(水平方向)

の鉛直方向中心にあることを示しており、本ロボットの高度が下がる (δ_z が小さくなる) 場合、 $\delta_2 \sim \delta_1$ の時に δ_z に応じて PWM 値を P2 ~ P1 としモータを正回転させて本ロボットを上昇させる。また、本ロボットの高度が上がる (δ_z が大きくなる) 場合、 $\delta_3 \sim \delta_4$ の時に δ_z に応じて PWM 値を P3 ~ P4 としモータを逆回転させ、本ロボットを下降させる。

$\delta_2 \sim \delta_3$ のときにモータを停止させるのは、正逆回転の過度な変化によるモータの焼き切れを防ぐためである。また、PWM 値の上限および下限をそれぞれ P1 および P4 に設定することで、モータの過度な回転を防止することにより、電力の消費をできるだけ防ぐようにしている。

(b) 水平方向制御

本ロボットと水路トンネル側壁との距離測定は、測定精度が高く応答速度が速いレーザーセンサを採用している。機体の前後に2つのレーザーセンサを搭載して、それぞれ距離 δ_F および δ_R を取得、図-5に示すようにトンネルの進行方向に対する機体の傾き角度 θ および本ロボットの中心と水路トンネル側壁との距離 δ_x を演算している。

θ および δ_x に対して、許容傾き角度の範囲を超え

た場合は、前後の水平スラストを前後逆位相で作動させ機体を回転させる。また、許容傾き角度範囲内である場合は、壁面との距離 δ_x に応じて前後の水平スラストを同位相で作動させ、バルーン中心がトンネル中心にくるように水平位置を制御している。

距離センサからの演算値 δ_x とモータの PWM 値の関係を図-6に示す。 δ_x の原点 δ_c は、バルーン中心がトンネルの水平方向中心にあることを示している。なお、水平スラストのロータは可変ピッチを採用しているため、同じ PWM 値でもロータのピッチ(翼角)を変えることにより、逆向きの推力を発生させることができる。

本ロボットが右側の側壁に近づく (δ_x が小さくなる) 場合、 $\delta_2 \sim \delta_1$ の時に δ_x に応じて PWM 値を P0 ~ Pmax とし左向き推力を発生させる。また、本ロボットが左側の側壁に近づく (δ_x が大きくなる) 場合、 $\delta_3 \sim \delta_4$ の時に δ_x に応じて PWM 値を P0 ~ Pmax とし右向き推力を発生させる。鉛直制御と同様に、距離が $\delta_2 \sim \delta_3$ のときにモータを停止させ、また、PWM 値の上限を Pmax に設定することで、モータの過度な負荷を防止している。

3. 調査手順

本ロボットによる水路トンネルの調査フローを図7に示す。調査では、まずトンネル条件等の確認を行い、パーツ毎に分解された本ロボットを現地で組み立て調査を行う。ヘリウムを封入する前のバルーンは、写真6のようにコンパクトに畳むことができ、さらに、他のパーツも分解可能であるため、本ロボットは運搬性に優れている。調査終了後、カメラからSDカードを取り出し、記録画像から顕著なひび割れや壁面の崩壊、その他変状の有無などを確認する。なお、写真7に本ロボットの自律飛行による調査状況を示す。

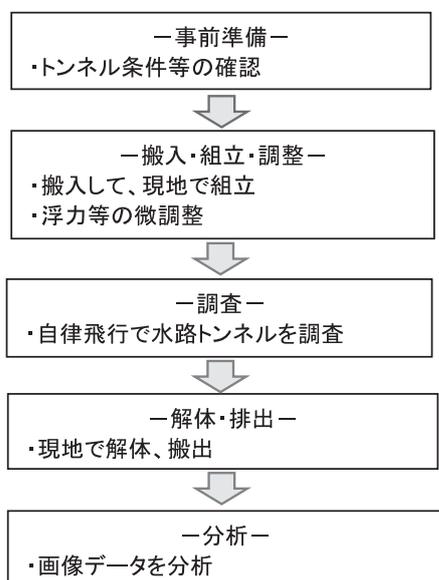


図7 調査フロー



写真6 運搬時のバルーン



写真7 自律飛行による調査状況

4. おわりに

本ロボットトンネルマンボウは、浮力や照明等の制限から、現時点で判別できる損傷等は10mm程度となっている。今後は、撮影精度の向上を図る検討を進める予定である。

JCMA

《参考文献》

- 1) 一般社団法人日本建設業連合会 電力工事委員会：水力発電土木施設のリニューアル技術【増補改訂版】，p.276，2015
- 2) 岡元隆之介：気球型マルチロータ水路検査ロボットの開発，第19回システムインテグレーション部門講演会（SI2018），pp.3056-3057，2018
- 3) 松浦誠司他：飛行船型水路トンネル調査ロボットの開発，令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会，VI-312，2020
- 4) 松浦誠司他：水路トンネル調査ロボットの開発，令和2年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集，pp.167-170，2020

【筆者紹介】

原田 耕司（はらだ こうじ）
西松建設㈱
技術研究所
主席研究員

