

特徴点のない水路トンネルにおける三次元点群計測技術の開発

東京電力ホールディングス（株） 正会員 ○後藤 敬彦，森 文章，森岡 宏之
 （株）東設土木コンサルタント 恩知 憲正，作中 隆之，山内 優
 （株）構造計画研究所 梅田 雅之，松山 祐樹，茂木 正敏

1. はじめに

東京電力ホールディングス（株）は、通水中水路の効率的な内部点検手法として、ビデオカメラを搭載した浮体を水路に流下させ、トンネルの内部状況を無人で観察するための点検装置の開発を行ってきた¹⁾。本稿では、新たに開発した水路トンネルでの三次元点群計測技術の概要と、浮体型点検装置への適用性を確認するために実施した模擬実験の結果について報告する。

2. 水路トンネルにおける三次元点群計測技術の開発

三次元点群計測においては、計測機器自体の自己位置を精緻に把握することが重要となるが、トンネル内部は非 GPS 環境下であり、自己位置情報を容易に取得できないという問題がある。これに対し、距離センサーによる自己位置推定手法（以下、LiDAR SLAM^{*1} と呼ぶ）を用いることで、非 GPS 環境下においても高精度な自己位置情報の取得を行う方法がある。しかし、水路トンネル内部は形状の凹凸変化（特徴点）が少ないために、時々刻々得られる三次元点群情報同士の重ね合わせが難しいことに加え、浮体型点検装置自体が流水を受けて航行するが故の機体の不安定性から、通常の LiDAR SLAM を用いた三次元点群計測は困難とされてきた。



写真1 水路トンネル内部の例

著者らは、水路トンネルの壁面では水垢や目地等で模様の変化が大きい（写真1）ことに着目し、視覚情報を用いた自己位置推定手法（以下、Visual SLAM と呼ぶ）を活用して、事前に時刻同期させた LiDAR SLAM と併用することで水路トンネル内での連続した三次元点群情報を取得するシステムを開発した（特許出願中：特願 2021-158944）。^{*1} SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）：自己位置推定と環境地図作成を同時に行うこと。

3. 浮体型点検装置への適用性を見据えた模擬実験

上記システムの水路トンネル内部計測への適用性を確認するため、まず、抜水したトンネル内において計測機材を人力で運搬することにより測定を行うこととした。実験は、将来、浮体型点検装置への搭載を想定し、図1に示すように、機材を仮想水面高さまで持ち上げ、歩行による適度な上下動を与える状況で実施した。計測機器は写真2の通り、形状情報を得るための距離センサー（Kinect for Azure DK）2台、連続視覚情報を得るための360度カメラ（RICO THETA）1台、複数の照明を搭載し、距離センサーについては設置角度を持たせ、広い視野角を確保した。

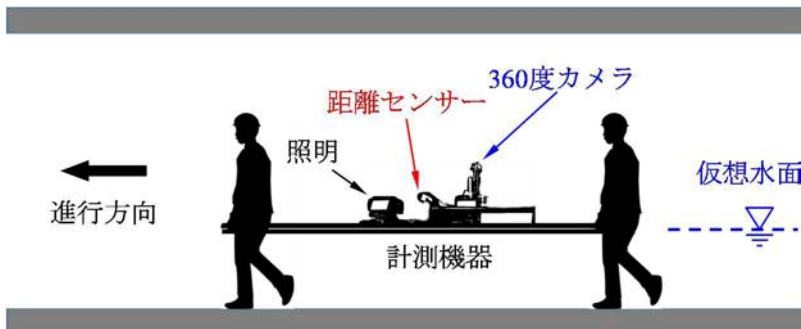


図1 水路内部の点群情報取得実験のイメージ



写真2 計測機器一式

キーワード 水路内部点検，浮体型点検装置，三次元点群計測，Visual SLAM，LiDAR SLAM
 連絡先 〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3 東京電力ホールディングス（株） TEL 03-6373-1111

現場実験は、東京電力管内にある水力発電所の水路トンネルの一部区間 (L=約 53m) にて実施した (図 2)。当該トンネルの断面は、高さ 1.85m の馬蹄形であり (図 3)、覆工区間と無巻区間が混在する。今回開発したシステムによって取得した点群情報と設計図面におけるトンネルの横断形状、ならびに、距離計で計測した縦断距離をそれぞれ比較し、誤差の程度を確認した。また、形状の変化が少ない覆工区間においても、精度の高い三次元形状が再現できるかに着目し検証を行った。



- ※1 無巻区間 … 形状の凹凸変化が多い
 覆工区間 … 形状の凹凸変化が少ない
 ※2 区間長は距離計による

図 2 平面図 (見上げ図, 投影写真入り)

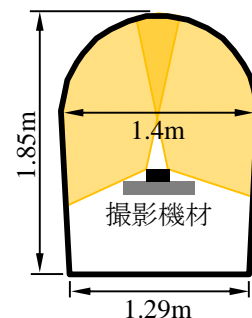


図 3 形状取得範囲

4. 実験結果

実験の結果、Visual SLAM の取得状況 (360 度カメラ画像) を写真 3 に示す。検出された画像特徴点は記号 □ で表示され、多くの特徴点を捉えていることがわかる。さらに、Visual SLAM を使って自己位置情報を補正した距離センサー (LiDAR) の三次元点群計測結果を図 4、図 5 および表 1 に示す。横断方向の誤差は機械誤差等で 0.7% となり、縦断方向の誤差は車輪による距離計測 (実測) に対して -0.6% であった。以上より、Visual SLAM を活用してより正確な自己位置推定を行うことで、距離センサー (LiDAR) により得られる点群の正確な位置情報が取得できるようになり、高精度な三次元点群情報の計測が可能であることがわかった。

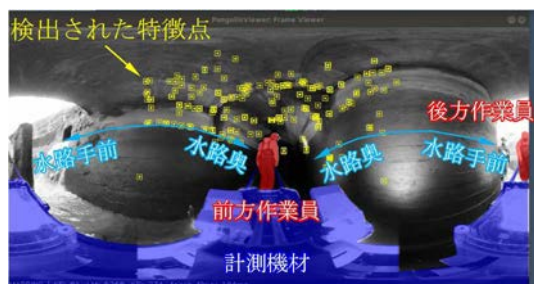


写真 3 Visual SLAM の取得状況 (360 度カメラ展開写真)

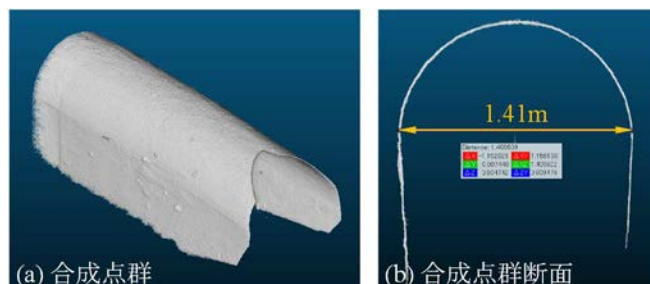


図 4 三次元形状取得結果 (横断面)

表 1 計測結果 (トンネル縦断方向)

区間名	距離計(m)	計測結果(m)	誤差
覆工区間1	12.4	12.2	-1.6%
無巻区間	22.7	23.3	2.6%
覆工区間2	17.6	16.9	-4.0%
合計	52.7	52.4	-0.6%

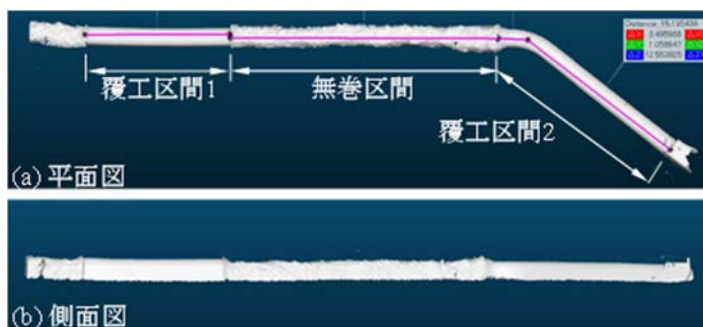


図 5 三次元形状取得結果 (平面図ほか)

5. まとめ

形状の変化 (特徴点) が少ない水路トンネル内部においても、視覚情報の特徴点が多いことに着目し、Visual SLAM を使用することで高い精度で自己位置を取得できた。また、Visual SLAM により取得した情報を活用することで、距離センサー (LiDAR) により得られる点群の正確な位置情報が取得できるようになり、精度の高い三次元形状を取得できた。今後は、実際の浮体型点検装置に搭載し、通水中水路での適用をめざす。

参考文献

- 1) 森ら: 浮体による通水中の水路壁面点検装置の開発 (その 4), 土木学会第 76 回年講概要集, VI-839, 2021.9