

《様式B》

研究テーマ 「自動運転カートと 3 次元点群情報を用いた地下排水路検査の省力化技術の開発」

研究責任者 静岡大学 創造科学技術大学院
教授
石原進 ishihara.susumu@shizuoka.ac.jp

共同研究者 静岡大学 学術院工学領域
助教
PHAM Van Thanh
株式会社フジヤマ
石川 正浩
株式会社フジヤマ
山田 浩之
株式会社フジヤマ
川崎 浩巳
株式会社フジヤマ
市川 富崇

（令和 5 年度募集）第 36 回 助成研究 完了報告書

1. 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要（1,000 字程度）

本研究では、雨水地下排水路の検査作業を省力化・自動化することを目的として、3次元 LiDAR・360 度カメラ等を搭載した自動走行カートによる検査システムの開発に取り組んだ。地下排水路内では衛星測位や無線 LAN 測位が利用できないうえ、均一なコンクリート面が連続する単調な空間では視覚的特徴量が極めて乏しく、既存の SLAM 技術による正確な位置推定・地図生成が困難という課題がある。本研究では画像処理技術の工夫により、排水路管内の構造を正確に理解し、撮影映像に基づく自動展開図作成、自動走行を可能とした。本研究の成果の利用により、地下排水路の検査に要する作業コストを大幅に低減できることが期待できる。本技術に関しては、共同研究企業による検査業務での実利用を計画しているほか、社外への展開を検討している。

主要な成果 1) 低コストな単眼カメラを用いた壁面展開図の自動生成手法を開発した。ボックスカルバート構造に固有の継ぎ目・ハンチ等の幾何学的規則性に着目し、消失点検出・方向適応型フィルタリング・面領域構成・後処理という 4 段階の処理パイプラインを構築した。実際の地下排水路映像 100 フレームによる評価では、精度の評価指標 IoU(Intersection over Union)が平均 IoU 0.786 を達成した。構造線の再現率 83.2%は ORB

や LSD を含む既存 5 手法を大幅に上回った。本成果は ACM BuildSys 国際会議にて発表済みである。

主要な成果 2) 地下排水路自動走行カートの走行制御および流入水検知技法を開発した。マンホール（直径 60cm）への搬入を考慮した IP65 準拠のクローラ型ロボットを基盤に、Raspberry Pi 4 による上位制御と Raspberry Pi Pico によるモータ制御の二層構成で自動走行カートを設計した。消失点検出と輝度重心検出を組み合わせた画像処理に基づく自律走行制御により、管路中央を維持した走行を実現した。また、フレーム間差分とオプティカルフロー分析を組み合わせた流入水自動検知手法を開発し、走行時の適合率 97%を達成した。ただし、再現率は 10%以下にとどまっており（遠方の検出しづらい場合も含む）、オプティカルフロー検出で使用する特徴量の改善が今後の課題である。このほか、地下排水路内における無線 LAN 通信距離の調査、および複数ロボットの協調動作システムの設計・実装も実施した。

2. 実施内容および成果の説明（A 4 で、5 ページ以内）

研究の位置付け

本研究は、雨水の地下排水路の検査の省力化・自動化を実現するための技術開発を行うものとして開始された。具体的には、人力（2-3 名程度）で行われる高さ 1m、幅 2m 程度のサイズの地下排水路の検査を、3 次元 LiDAR、360 度カメラおよびその他のセンサを搭載したカートによって自動的に行うための技術を開発することを目指した。本システムの究極の姿は、このカートが完全自動運転によって地下排水路内に進入し、自動的に地下排水路内の形状計測、映像記録を行い、これを基に障害（ひび割れ、腐食、変形、異物、土砂の堆積等）を自動検出し、可能ならば打音検査等の詳細検査を施すものである。また、カートの行動は、無線によって地下排水路外にいる作業員にリアルタイムで監視可能であり、カート本体の計算処理で賄いきれない作業は、作業員手元のコンピュータやクラウド上のサーバの能力を使って実施できるようにする。

地下排水路内では、衛星測位や地上の無線 LAN アクセスポイントからの信号を利用した測位が利用できないので、別の方法によってカートの位置を得る必要がある。こうした場面では、LiDAR、カメラ映像、並びに IMU 等のセンサデータを融合した SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）技術によって、装置の自己位置推定と地図生成を同時に行うアプローチが利用されるが、単純な形状が多い地下排水路では、視覚的、形

状的な特徴量が少ないため、正確な位置推定と地図生成を行うことは容易ではない。本研究では、まず、計測用のカートを試作し、地下排水路での実験を通して、既存 SLAM 技術による地下排水路内での位置推定、地図生成の性能を把握し、次に、様々な工夫によって測定精度の向上、並びにグローバル座標系との紐付けを正確に行う技術を開発することを目指した。また、カートの自動走行システムを構築した。

成果(1) カート正面の単眼カメラを用いた地下排水路の壁面画像展開図の自動作成

本研究の開始当初は 3 次元点群画像と 360 度映像を主たるデータ入力源とすることとして検討を進め、試作システムを作成した[1]。しかしながら、LiDAR ベースのハンディ 3 次元スキャナ製品が価格は高いものの広く知られるようになりつつあり、同様のアプローチでは新規性の訴求が難しいと考えた。低コストで実現可能な正面の単眼カメラを用い、排水路の内部の映像展開図を自動的に生成することに焦点を切り替えて研究を進めた。

地下排水路の内部は、均一なコンクリート面が長距離にわたって連続しており、自然光も存在しない。そのため、コンピュータが映像から位置や形状の手がかりを読み取ることが非常に困難な環境である。既存の多くの自動計測技術は、映像中の「特徴点」と呼ばれる目印を手がかりに位置を推定するが、地下排水路のような単調な空間ではこうした手がかりが極めて少なく、位置推定の誤差が蓄積するという問題があった。

本研究では、この課題を克服するため、広く普及している箱形のコンクリートブロック（ボックスカルバート）を接続して構成される地下排水路に固有の「構造上の継ぎ目」に着目した。コンクリートカルバートは、壁面・天井・床面・斜め部分（ハンチ）から構成されており、それぞれの接合部には規則的な直線状の継ぎ目が存在する。この幾何学的な規則性を積極的に利用することで、映像から安定して構造線を検出する独自の手法を開発した。

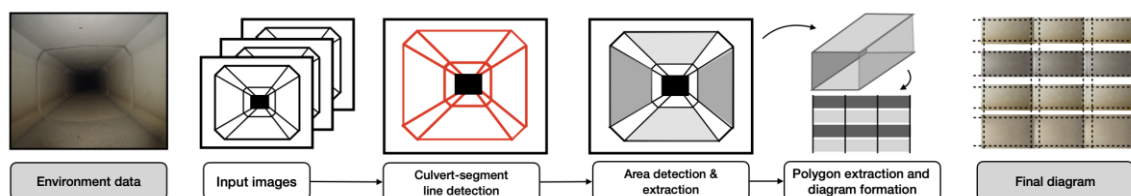


図 1. 正面カメラからの管内画像の自動展開図生成処理

システムの処理は大きく 4 段階で構成される。第 1 段階では、映像フレームから「消失点」（奥へ延びる直線が収束する点）を検出し、画像を意味のある領域に分割する。第 2 段階では、分割した各領域に対して、あらゆる方向の傾きに対応した独自のフィルタを適

用し、最も強く反応した方向を選択的に強調することで、斜め・水平・垂直それぞれの構造線を検出する。第 3 段階では、検出した線分を組み合わせ、壁面・天井・床面・ハンチの各面を囲む多角形領域を構成し、遠近感による歪みを補正した平面図を抽出する。第 4 段階では、照明の乱れなどによる検出誤差を補正する後処理を施し、最終的な 2 次元図面データとして出力する。なお、システムは床面が浸水している場合にも、周囲の壁面情報から床の位置を推定する補完機能を備えている。

開発したシステムの性能を検証するため、実際の地下排水路内で取得した $3,840 \times 2,160$ ピクセルの高解像度映像から抽出した 100 フレームを用いた評価実験を実施した。各フレームに対して、壁面・天井・床面・ハンチのそれぞれの正解領域を人手でアノテーション（注釈付け）し、システムの出力と照合することで精度を測定した。

精度の指標として、システムが検出した領域と正解領域の重なり度合いを示す「IoU (Intersection over Union)」を用いた。IoU は 0 から 1 の値をとり、1 に近いほど正確であることを意味する。評価の結果、壁面で 0.82、天井で 0.80、床面で 0.78、ハンチで 0.74、全体の平均で 0.786 という IoU を達成した。また、検出漏れよりも検出過剰の方向に設計されており、点検図面として安全側の出力が得られるよう配慮されている。

さらに、汎用的な画像特徴検出手法との比較評価も実施した。比較対象は、点ベースの特徴検出手法（ORB・SIFT・BRISK・AKAZE）および線分ベースの手法（LSD）の計 5 種である。比較には「再現率」という指標を用い、各手法が正解の構造線を正しく復元できるかどうかを測定した。結果として、本システムは平均 83.2% の再現率を達成し、次点の ORB（47.3%）や LSD（32.2%）を大幅に上回った。特

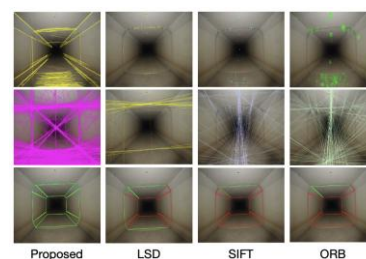


図 2. 提案主手法と従来技法でのジョイント部分検出性能の比較

に、ハンチ部分においては 89.2% という高い再現率を示しており、他手法では検出が困難であった箇所においても安定した性能を発揮することが確認された。SIFT や BRISK・AKAZE といった手法については、地下環境の特徴の乏しさが影響し、12% 以下という低い再現率にとどまった。本成果は、ACM Sys 国際会議で発表済みである [2]。その後、ディープラーニングベースの線検出手法を用いた方法との性能比較を実施し、提案手法の優位性を確認している [3]。

成果(2) 自動走行カートの開発

地下排水路内を自動走行するカートを設計し、その自動走行制御技術、接続管路からの流入水を回避するための流入水検知技術を開発した[4]。

走行プラットフォームには、防水・防塵の保護等級 IP65 を有するクローラ型移動ロボット Cugo V4

(CuboRex 社製)を使用した。機体の外形は排水路

へのアクセス口であるマンホール（直径 60cm）を通過できるよう 60cm 以下に収めており、現場での搬入・搬出が容易に行える設計となっている。

制御・演算系は、役割の異なる二種類の小型コンピュータで構成されている。上位の制御コンピュータとして Raspberry Pi 4 Model B を搭載し、カメラ映像のリアルタイム画像処理および走行制御コマンドの生成を担わせている。下位の制御マイコンとして Raspberry Pi Pico をインターフェース基板と組み合わせて使用し、上位コンピュータからシリアル通信で受け取ったコマンドをモータドライバに伝達することで、左右のクローラを個別に制御する。

センサ類については、自律走行および流入水検出の両用途に、深度センサ機能を持つ Intel RealSense d435i を 2D カメラとして使用した。流入水の検知に関しては奥行き情報は使用せず、通常のカラ－動画像のみを入力とした。排水路内は外光が遮断された暗所環境であるため、専用の照明機器を機体に搭載している。

ソフトウェア面では、上位コンピュータである Raspberry Pi 4 上でリアルタイム画像処理を実行する構成を採用した。画像処理の実装にはオープンソースのコンピュータビジョンライブラリである OpenCV を活用した。モータ制御コマンドは Raspberry Pi 4 から Raspberry Pi Pico へシリアル USB 通信を介してリアルタイムに送信される。カメラ映像の解像度は 360×202 画素、フレームレートは毎秒 20 フレームに設定しており、小型組み込みコンピュータ上での処理負荷とリアルタイム性を両立させた。



図 3. 自動走行カート



図 4. 撮影実験の様子

装置前面に搭載したカメラ映像をリアルタイムに解析し、人手を介さずにロボットが通路中央を維持しながら走行できる仕組みを構築した。制御は(i)輝度値に基づく暗点重心の検出と(ii)コンクリート壁面と床面の境界線が管路奥の一点（消失点）に向かっ

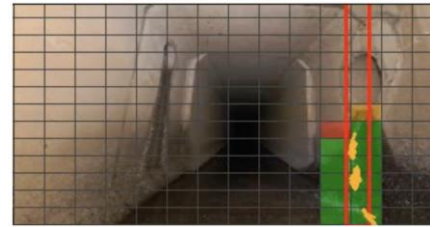


図 5. 流入水の検出例

て収束する幾何学的な性質を利用した消失点の検出に基づく。通常時は精度の高い(ii)を使用し、(ii)が困難な場面では(i)を補完的に使用することで、環境の変化に対して頑健な制御を実現した。排水路を模擬した屋内環境で動作試験を実施し、カメラ映像の取得から進路決定・モータ制御に至る一連の処理が設計通りに連動して機能することを確認した。

排水路の壁面上部には道路脇側溝と接続した取り付け管が設置されており、そこから水が流れ込む「流入水」が発生することがある。その検出・回避は安全な自動走行カート運用のために不可欠である。そこで、本研究では単眼カメラによる流入水の自動検知手法を開発した。提案手法はフレーム間差分とオプティカルフローの分析に基づいている。

実際の大型排水路内でロボットに搭載したカメラにより撮影した映像を用いて検証実験を行った。実験の結果、提案手法の適合率はロボット停止時に 90%、走行時に 97%という高い値を達成し、フレーム間差分のみを用いる手法に比べ、提案手法は誤検出を大幅に抑制できることが確認された。しかしながら、提案手法の再現率はいずれの条件でも 10%以下にとどまり、流入水の見落としが多く発生した。オプティカルフロー分析時に使用する特徴量に関する改善が今後の課題である。

この他、遠隔地からのカートの制御、撮影映像の確認を可能とするため、地下排水路内の無線 LAN 通信距離の調査を行った[5]ほか、管路内を走行する複数のロボットの無線通信による協調動作システムの設計実装を行った[6]。

主な発表文献

- [1] 1. L. Baldyga, T. V. Pham, H. Yamada, M. Ishikawa, 石原進: Rainwater Drainage Inspection Assistance System Basic Concept and Considerations, 情報処理学会研究報告, 高度交通システムスマートコミュニティ (ITS) 研究会, vol.2024-ITS-97, no.23, pp.1-8, 2024.
- [2] L. Baldyga, T.V. Pham, H. Yamada, M. Ishikawa, S. Ishihara: Automatic image diagram generation for large-sized underground concrete culverts, The 12th ACM International

Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation (BuildSys 2025), pp.238-242, 2025.

- [3] L. Baldyga, T. V. Pham, H. Yamada, M. Ishikawa, S. Ishihara, Improving the performance of CNN-based culvert structure lines detection using AI-generated training images, Proc. The 12th International Symposium toward the Future of Advanced Research at Shizuoka University (ISFAR-SU2026), p.56, 2026.
- [4] 重光洋輝, ウカシュ バウディガ, 山田浩之, 石川正浩, タン ファム, 石原進, 大型排水路検査の省力化のための自律走行検査ロボットの設計と実装, 情報処理学会第 88 回全国大会, 6R-03, 2026.
- [5] 河村洋希, L. Baldyga, P.V. Thanh, 山田浩之, 石川正浩, 石原進: 地下大型排水路における無線 LAN の通信可能距離測定, 2024 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-15-02, 2024.
- [6] H. Kawamura, A. Nishida, T.V. Pham, S. Ishihara: Implementation of a Multi-UV System for Sewer Inspection Using Bi-Directional Intermittent Multi-hop Video and Command Transmission, International Conference on Information Networking (ICOIN 2026), pp.285-290, 2026.