

第69回(2025年度) 北海道開発技術研究発表会論文

樋門管損傷における 定量評価技術の高度化と生産性向上への取組 —名寄河川事務所管内の樋門管点検にて—

旭川開発建設部 名寄河川事務所 計画課

○橋本 宗希哉

齋藤 直之

スイコー・及川設計共同体

佐藤 勉

本研究は、樋門管の維持管理における点検作業の高度化・効率化を目的として、360度カメラを搭載した自走式ロボットによる動画撮影と、取得映像からオルソ画像を生成するアプリケーションの開発を行ったものである。さらに、生成されたオルソ画像を図面と連携させることで、維持管理における指示の正確性が向上し、作業の生産性向上に寄与する。その活用事例について紹介する。

キーワード：DX、ICT、生産性向上、働き方改革

1. はじめに

天塩川上流域は北海道北部に位置し、豊かな自然環境と多様な水系を有し、治水・利水の両面で重要な役割を担っている。しかし近年、気候変動や豪雨の頻発により、河川管理の高度化が求められている。

北海道開発局が直轄管理する樋門・樋管は1,441箇所（令和6年度 国土交通省地方整備局別の評価集計より）、名寄河川事務所管内では167箇所（令和7年度 天塩川上流河川管理施設監理検討外業務の点検実績）あり、そのうち要保全段階のC評価（R7年度 天塩川上流河川管理施設監理検討外業務の構造物（樋門・樋管）の総合的な評価結果による）に分類されるものは84箇所で、早急な補修工事が必要である。

本論文では、360度カメラ搭載ロボットによる動画撮影とオルソ画像生成を組み合わせた点検システムの構築と、その有効性を検証した結果を報告する。

2. 樋門・樋管点検の現状と課題

名寄河川事務所が管理する直轄河川の樋門・樋管は、高度経済成長期以降に集中的に整備された。これら施設は、現在一斉に老朽化の波に洗われている。現状の維持管理における最大の問題は、長年主軸とされてきた目視点検の限界にある。目視による点検は、変状の有無を迅速に判断できる利点があるものの、点検者の主観や経験値に依存する部分が大きく、客観的かつ定量的な評価が困難であるという課題を抱えている。特に寒冷地特有のコンクリート内部の劣化や、土中・水中にある不可視部の変状は、表面的な観察だけでは捉えきれず、予防保全の観点から深刻なリスクとなっている。

この技術的課題をさらに深刻化させているのが、避けることのできない社会構造の変化である。少子高齢化の

進展により、土木技術者全体の数が減少する中で、北海道のような広大な管理区域を維持するための専門的な労働力確保は年々厳しさを増している。これに伴い、熟練技術者が長年の現場経験で培ってきた「微細な異変を察知する知見」を次世代へ繋ぐ技術の伝承が断絶の危機に瀕している。経験の浅い若手技術者が、客観的な裏付けなしに適切な健全度判定を下すことは難しく、点検品質の均質化が大きな壁となっている。

加えて、厳しい財政面での制約も無視できない。限られた予算の中で膨大なインフラストックを適切に維持・更新していくためには、従来の「壊れてから直す」事後保全から脱却し、効率的かつ戦略的な投資判断が求められる。そのためには、点検データのデジタル化やAI技術等の活用により、これまで「勘」に頼っていた劣化状況を数値として可視化し、客観的な優先順位を策定することが不可欠である。

のことから、河川管理施設のICT技術を取り入れた定量的な点検を進める必要がある。



図-1 技術者による樋門函体内的目視点検

3. 樋門・樋管損傷把握の高度化への取組

上述の背景から、ICTを活用した効率的かつ定量的な点検手法の確立が急務となっている。具体的には、画像解析や3次元データを用いた損傷の客観的評価、経年変化の可視化、報告書作成の自動化等が挙げられる。本研究では、樋門・樋管点検におけるICT活用の可能性を検証し、省人化と精度向上を両立する次世代型維持管理手法の構築を目的とする。

本研究の独自性は、目視点検の単なる代替にとどまらず、360度カメラ搭載ロボットによる動画撮影とオルソ画像生成技術を統合し、損傷箇所を高精度にデジタル化する点にある。取得データをCAD化し蓄積することで、時系列での変状把握や精緻な維持管理の策定が可能となる。また、画像解析による定量的な損傷評価を導入し、従来の知見や経験に依存した評価から脱却することで、判断の客観性と再現性を担保する。

さらに、クラウド連携を通じたデータ共有や報告書の自動生成により、業務の圧倒的な効率化を推進する。本研究は河川管理DXを先導する取り組みであり、将来的にはAI診断や劣化予測、予防保全の最適化への展開を見据えている。これらを通じて維持管理の信頼性を向上させ、ライフサイクルコストの低減および社会資本の長寿命化への寄与を目指す。

(1) 点検の限界と定性的評価の課題

樋管の維持管理では従来、管内カメラ撮影が主軸であったが、解像度や照明の制約から微細な変状の把握が困難であった。判定が現場担当者の主觀に委ねられる定性的評価にとどまるため、客観性や再現性が不足し、精緻な維持管理を策定するためのデータ信頼性に欠けるという課題を抱えている。

また、物理的な制約として、樋管の中でも管径が900mm以下となる小口径管については、人が内部に進入して直接目視点検を行うことが物理的に不可能である。そのため、従来型の管内カメラは、点検品質を一定水準以上に維持することが極めて難しかった。



図-2 管内カメラの画像

(2) 提案システムの独自性と定量的評価の実現

こうした背景と現場の切実なニーズを踏まえ、本研究では、特に技術者の進入が物理的に困難な管径900mm以下の小口径樋管を主な対象とし、360度カメラを搭載した自走式ロボットによる高度なデータ収集技術の開発および実証検証を行った。本システムの最大の特徴は、取得した360度全方位の撮影データを、高精度な「オルソ画像（歪みを補正した平面展開図）」へと展開・合成できる点にある。

これにより、従来の断片的な映像では不可能であった損傷箇所の正確な位置特定に加え、ミリ単位での定量的な寸法計測が可能となり、評価の客観性と再現性を飛躍的に向上させることができる。さらに、取得した損傷情報をCADデータとして蓄積することで、変状の経年変化を数値的に管理できる体制を構築し、長期的な樋門・樋管の維持管理の高度化を実現する。

4. オルソデータ生成プログラムの開発

(1) 撮影動画の前処理

本研究で対象とする360度カメラによる撮影動画は、魚眼レンズ特有の強い歪みを含んでいる。特に画像周辺部では歪みが顕著であり、一般的な歪み補正アルゴリズムを適用しても完全な補正は困難である。この残存歪みは、画像マッチングの精度低下を招き、オルソデータ生成の品質に悪影響を及ぼす要因となる。

そこで本研究では、歪みの影響が比較的小さい画像中央部のみを利用する方針を採用した。具体的には、FFmpegを用いて動画の各フレームから中央の垂直方向領域を抽出し、その幅を32px（ピクセル：画素単位）に限定した。

これは、抽出領域を過度に拡大した場合、函体内部の特徴が乏しく、縫目や汚れなどの新たなテクスチャが出現しない場合には「同質なコンクリート壁面が広がるだけ」となる。32pxは歪みの影響を抑えつつ十分な特徴量を確保するため、実験的に導出した値である。この選定により、処理負荷を抑えながら高精度な位置合わせを実現できる点が本手法の特徴である。



図-3 360度カメラの画像

(2) フレーム間マッチングと画像合成

抽出された連続フレーム画像を用いてオルソデータを生成するため、本研究では「フレーム間の位置合わせ」

「シフト量の平滑化」「画像合成」の3段階からなる処理フローを設計した。まず、隣接するフレーム間で水平方向の位置ずれを推定し、配置関係を決定する。次に、推定されたシフト量にはノイズや誤検出による急変が含まれるためEMA(Exponential Moving Average: 指数移動平均)で平滑化し、安定した位置合わせを実現する。最後に、各フレームを順次配置し、重なり部分にフェザリング処理を適用して、継ぎ目の目立たない自然なオルソデータを生成する。

これらは、函体内部のようにテクスチャが乏しく特徴点が少ない環境でも有効で、特にEMAによる平滑化は、時系列データを平滑化するための手法で展開図の精度維持に寄与する。また、フェザリング処理により照度差やカメラ姿勢変化による境界の不自然さを低減し、CAD移行後も損傷位置のトレースが容易になる。この一連の処理は、従来の静止画ベースの点検手法に比べ、効率性と精度の両面で優位性を示す。

(3) ウィンドウベースマッチング

連続するフレーム間の位置合わせには、NCC(Normalized Cross-Correlation: 正規化相互相関)を用いたテンプレートマッチングを採用した。NCCは、2つの画像間の類似度を-1から1の範囲で評価する手法であり、照明条件の変動に対して一定の頑健性を有する。

具体的には、第*i*-1番目のフレーム画像の右端から幅*w_{win}*ピクセルの領域をテンプレートとして抽出し、第*i*番目のフレーム画像の左端から同じ幅の領域とマッチングを行う。NCCスコアが最大となる水平方向のシフト量*Δx_i*を求ることで、2つのフレーム間の相対的な位置関係を決定する。この手法は、特徴点ベースのマッチングに比べて計算量が少ないという利点を有する。

(4) シフト量の平滑化

フレーム間で算出されたシフト量*Δxi*には、撮影環境の変動や特徴点の誤検出、さらにはセンサー由来のノイズなど、様々な要因による変動が含まれる可能性がある。このような急激な変化は、画像の位置合わせ処理において不安定性を引き起こし、結果として全体の精度を低下させる要因となる。特に、長距離の連続撮影や低照度環境下では、誤差が累積しやすく、後続のオルソデータ生成に深刻な影響を及ぼすことが確認されている。

そこで、急激なシフト量や誤検出による不安定性を抑制し、より滑らかな追従性を確保するために、EMAを導入した。EMAは、過去の値に対して指数的に減衰する重みを付与することで、最新の観測値を重視しつつ、過去の情報も適度に反映する平滑化手法である。本研究

における平滑化後のシフト量は、次式で更新される。

$$\Delta x_{smooth} = \alpha \cdot \Delta x_{smooth} + \alpha \cdot \Delta xi \quad (1)$$

ここで、 α はEMAにおいて新しいデータと過去のデータのどちらをどの程度重視するかを決定する平滑化係数(重みづけのパラメータ)であり、 $0 < \alpha < 1$ の範囲で設定される。値が大きい場合は最新のシフト量を強く反映し、追従性が高まる一方で、急激な変化が残りやすくなる。逆に、値が小さい場合は過去の情報を重視することで変動を抑制できる。本研究では実験的に、 α の値を最新値に0.2、過去の蓄積に0.8の重みを分配した。

実際の画像配置位置*x*は、基準となるステップサイズ*s*から平滑化されたシフト量を差し引くことで決定される。この処理により、急激なシフト量の変化を効果的に抑制し、画像の位置合わせにおける安定性が向上した。特に、連続フレーム間での微小な誤差が累積することを防げる点が大きな利点である。加えて、EMAの導入は計算負荷を大幅に増加させないため、リアルタイム処理への適用が可能であることも確認された。

Algorithm1: パノラマ画像生成アルゴリズム

```
Input: 動画フレーム列 {f0, f1, …, fn-1} (n フレーム)
       ストリップ幅 w, ステップサイズ s,
       ウィンドウサイズ wtWtn)
Output: パノラマ画像 P
// 初期化
1: (h, w) ← size(f0);
2: P ← empty.canvas(h, n × s);
3: x ← 0, Δxsmooth ← 0;
4: P[0 : h, 0 : w] ← f0;
5: for i = 1 to n - 1 do
// ウィンドウ抽出とマッチング
6: Wprev ← fi-1[y : y + wtWtn, x : x + w];
7: Wcurr ← fi[y : y + wtWtn, 0 : w];
8: Δxi ← NCC(gray(Wprev), gray(Wcurr));
// 平滑化と配置
9: Δxsmooth ← 0.8 · Δxsmooth + 0.2 · Δxi;
10: x ← x + s - ⌊Δxsmooth⌋;
11: P[0 : h, x : x + w] ← blend(P, fi);
12: return P
```

図-4 パノラマ画像生成アルゴリズム

(5) フェザリング処理による画像合成

各フレームをオルソデータに配置する際には、フェザリング処理を適用する。フェザリングは、重なり合う画像の境界部分を滑らかにブレンドする手法であり、継ぎ目の目立たない自然な合成画像を生成することができる。重なり領域において、前のフレームと新しいフレームの画素値を距離に応じて重み付け平均することで、シームレスな接続を実現する。この処理は、函体壁面の均質なテクスチャにおいて特に有効であり、視覚的な違和感を低減する。

これらにより、360度カメラで取得した撮影データをオルソデータへ変換するプログラムが完成した。

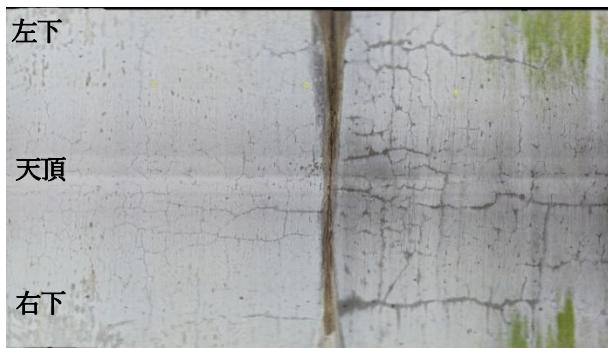


図-5 画像合成されたオルソデータ

5. 検証結果

(1) 点検ロボットの課題

本研究では、名寄河川事務所管内の土別橋樋管において実証実験を実施した。対象構造物は昭和 41 年に施工された軸体長 16.58m、管径 900mm の樋管であり、半世紀以上経過した老朽構造物である。本研究では、点検ロボットを用いて 360 度カメラによる動画撮影による点検手法を検証した。

当初の点検ロボットは、サンタイ製 Avatar AVT-3C をベースに、KANDAO 製 Qoocam360 度カメラを天頂に向かって設置し、上部照明として 800 ルーメンの LED 照明 2 台と側方照明には 400 ルーメンのペン型 LED 照明を 2 本設置して明度を確保した。

360 度カメラのデータは予定通り取得できたものの、画像解析に必要な明るさが不足し、画像合成に不備が生じた。また、点検ロボットが函体内部を走行する際、底版の凹凸により上下方向の揺れが発生し、この揺れが連続フレーム間の位置ずれを引き起こした。



図-6 点検ロボット（当初）

(2) 照度の改善と上下揺れ対策

照度対策として、横方向に 1500 ルーメンの LED 照明を 2 基、上部に 400 ルーメンのペン型 LED 照明を 2 基追加し、函体内部の照度を向上させた。また、上下方向の揺れ対策として、点検ロボットに映画撮影などで使用されているアクションカメラ用車載スタビライザーアームを取り付けて、物理的に揺れを吸収しカメラの姿勢を安定化させた。

360 度カメラは手振れ補正機能が向上した DJI Osmo 360 に変更し、進行方向に対して左右にレンズを配置し、樋管顶部を境にデータを分割する構成とした。加えて、画像処理による補正として、樋管の函体壁面に照射されたレーザー墨出し機のレーザー線（基準線）を検出し、これを基準として上下方向の位置補正を行う手法を検討した。レーザー線は函体内部の壁面に特徴点を形成できるため、各フレームの上下位置を揃えるための有効な基準となり、この補正により展開図の精度が向上した。

表-1 カメラ仕様

360 度カメラ	DJI Osmo360
センサー	1/1.1 インチ CMOS センサー
絞り	f/1.9
ISO 感度	100～51,200
電子シャッター速度	動画 1/8000 秒～1/X 秒
パノラマ動画	8K 7,680×3,840 6K 6,000×3,000 4K 3,840×1,920
最大動画ピットレート	170Mbps
ブレ補正	EIS (電子式映像ブレ補正)



図-7 レーザー墨出し機による試み



図-8 点検ロボット（改善後）

(3) オルソデータ生成に必要な時間軸の調整

改良を加えた点検ロボットによる再撮影の結果、照度不足や振動に起因する画像合成の不備は解消された。しかし、生成されたオルソデータはロボットの走行速度の変動（時間軸のズレ）の影響を受け、正確な位置情報を保持できていないことが判明した。この課題に対し、本研究では函体内部に 1m 間隔のマーカーを設置する手法を導入した。データ取得後、専用アプリケーションにおいて各マーカーの通過時刻を入力することで、区間ごとの平均走行速度を精密に算出するプロセスを構築し、サンプリング間隔を動的に補正することで、均質なオルソデータの生成が可能となった。

(4) オルソデータのCAD化

生成されたオルソデータは、微細なクラックや漏水跡を詳細に視認できる極めて高い解像度を保持しており、客観的な変状判定を行うために十分な品質を備えている。生成されたオルソデータは点検ロボット本体の死角を排除する過程で下部円周約 54cm 程度の範囲が欠損するものの、主要な変状が現れやすい側壁から天頂部にかけての全体の約 80%を鮮明に取得できている。

さらに、このデータを CAD へ移行して実寸スケールに適合させることで、デジタル図面上での損傷やクラックの精密なトレースが可能となった。これにより、効率的な維持管理への活用が期待される。

(5) 点検ロボットの有効性

本手法の最大の利点は、河川構造物の維持管理において客観的な定量的評価を実現した点にある。毎年継続して同様の撮影を実施することで、損傷の経年変化を数値として記録し、劣化の進行を客観的に把握することができる。これは、少子高齢化に伴う点検人員の減少や熟練技術者の不足といった社会的課題に対する極めて有効な解決策となり得る。

また、作業効率の面では、事前準備から土別橋樋管内での往復撮影完了までわずか約 20 分で全行程を終了した。これは、従来の目視点検や静止画撮影を主体とした点検業務と比較して大幅な工期短縮を実現しており、結果として劇的な費用削減を可能にするものである。

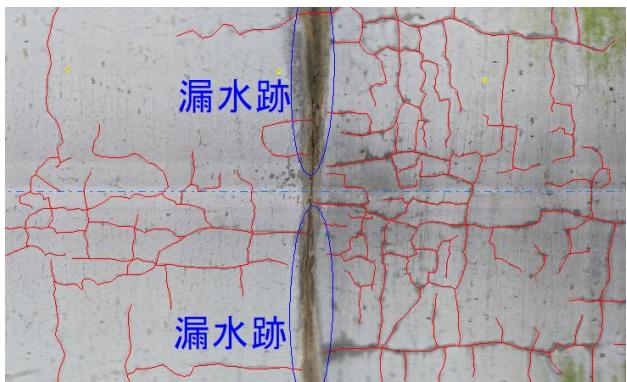


図-9 オルソデータから CAD 化したデータ

6. まとめと今後の課題

本研究で提案した 360 度カメラ搭載ロボットによる樋門・樋管点検手法は、従来の目視点検に比べ、省力化と費用削減に大きく寄与する可能性を示した。しかし、さらなる効率化と精度向上を図るためにには、追加技術の導入が不可欠である。今後の課題として、ロボットの自律走行機能を実装し、狭隘な樋管内部での安定した移動を確保することが挙げられる。また、360 度映像に加え、3 次元データを取得し、構造物の形状や損傷をより詳細に把握する技術の開発が求められる。

さらに、AI を活用したクラック診断の自動化により、損傷の定量評価を迅速かつ高精度に行うことが可能となる。加えて、AI による非破壊検査の必要箇所抽出や、点検ロボットによる内部構造の詳細把握を組み合わせることで、点検業務の高度化が期待される。最終的には、すべての樋門・樋管において、360 度カメラと AI による損傷判断を標準化し、維持管理のデジタル化を推進することが目標である。これらの技術を統合することで、インフラ維持管理の効率化と安全性向上に大きく貢献できると考えられる。

今後は、クラウド連携によるデータ共有や、過去の点検履歴を活用した予測保全の仕組みを構築することで、長期的なライフサイクルコストの低減も期待できる。さらに、河川点検士への操作支援や教育を目的とした AR 技術の導入により、専門知識の継承と作業品質の均一化が可能となる。これらの取り組みは、スマートメンテナンスの実現に向けた重要なステップであり、社会インフラの持続的な安全確保に寄与するものである。

将来的な維持管理においては、樋門・樋管の函体内部を面向に管理する次世代手法を視野に入れ、3 次元計測を行い、歪み、開き、欠損、鉄筋露出に至るまで、3 次元データを基に AI が自動解析できるよう、さらなる研究を進める所存である。

謝辞：本研究にあたり、土別橋樋管の現地調査にご協力いただいた関係機関の皆様に深く感謝申し上げます。また、データ解析やアプリケーション開発に関して有益なご指導を賜った北海道科学大学情報科学部教授の真田博文様に感謝いたします。さらに、点検ロボットの改良や試験運用において技術的な助言をいただいた開発チームの皆様ならびに撮影データの整理や CAD への移行作業に尽力いただいた協力スタッフにも厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省河川管理施設の点検・評価要領 令和 6 年度出水前点検（点検結果評価の概要）
- 2) 坂本潤嗣ほか (2024) 4K 超画像 360 度全方位カメラを利用したトンネル検査用変状展開図作成システムの開発
- 3) 令和 7 年度施行 天塩川上流 河川管理施設監理検討外業務