

MR デバイスを用いた水路トンネル調査／点検作業の効率化

Inspection Work Efficiency of Aqueduct Tunnel using MR Device

R&D センター 大津 慎一 SHUNICHI OTSU

R&D センター 山地 宏志 HIROSHI YAMACHI

本稿では、MR（複合現実）デバイスを用いた水路トンネル調査／点検ナビゲーションシステムおよび水路トンネルひび割れ展開図作成システムの開発と有効性の検証について解説する。

水路トンネルや開水路などの調査／点検作業では、コケや藻などの植生によってコンクリート壁面の既往のひび割れなどの位置がわかりづらい、水路トンネル内に照明施設がないなど作業環境に問題がある。また、施設の休止期間が限定的であり作業時間の制約もある。本システムでは、これら点検時の現地作業の課題を踏まえ、作業の効率化や省力化の実現を目指す。

キーワード：維持管理，調査／点検，MR デバイス，水路トンネル

This paper shows about development of aqueduct tunnel inspection navigation system and aqueduct tunnel crack map making system, and verification of the effectiveness.

In inspection work such as water tunnels and open channels, it is difficult to find the location of existing cracks on the concrete wall surface due to vegetation such as moss and algae, and there are problems in the work environment such as no lighting inside the aqueduct tunnel. And the facility is out of service for a limited period, and there are restrictions on working hours. This system aims to improve work efficiency and save labor in consideration of the problems of on-site work at the time of these inspections.

Key Words: Maintenance, Investigation and Inspection, MR Device, Aqueduct Tunnel

1. はじめに

筆者らは、以前から道路トンネルに関わる維持管理と ICT（情報通信技術）を組み合わせることで、維持管理における調査／点検や維持補修工事などの情報の流れを一元的に管理し、データ登録や帳票／記録の出力などといった作業の効率化や省力化についての研究を進めてきた。この中で原位置での情報の閲覧や登録を行う端末として、タブレット等の情報端末を使用してきたが、こういった一般的な情報端末では原位置での情報や位置などの検索を行うために手動もしくはマーカー等の補助的な手段が必要となり、情報の検索や位置の照合に手間がかかる場合があった。そこで、筆者らは現在注目を集めている MR（複合現実）デバイスの利便性に着目し、原位置での情報端末として活用する方法について検討を行った。

MR デバイスは、HMD（ヘッドマウントディスプレイ）と情報端末によって構成される AR（拡張現実）デバイス的一种である。拡張現実とは、デバイスのモニタ上で内蔵のカメラ画像と様々な情報を三次元画像として重ね合わ

せることで、直感的な位置と情報の関連付けを可能とする仕組みである。それに対して複合現実とは、拡張現実と同様に、位置情報に関連付けられた様々な情報の直感的な把握を可能とする仕組みであるが、点検者が装着する HMD 上で様々な情報を三次元画像として表示して利用者の実視界との重ね合わせを行うので、より現実感が高い位置と情報の関連付けが可能となる。また、装着者の移動に伴い自身の位置をリアルタイムに更新するといった機能も有している。近年、様々な分野で MR デバイスが注目されており、工場施設のメンテナンスや機器操作のナビゲーションなど製造業の分野で活用が進められている。また、建設業界でも、BIM（Building Information Modeling）や CIM（Construction Information Modeling）などと組み合わせることで生産性や品質の向上を図る試みが進められている。

本稿では、これら特長を踏まえ MR デバイスを活用したインフラ施設の維持管理手法の検討とシステム化、および水路トンネルにおける活用事例について示す。

2. 社会インフラの維持管理の状況

我が国の社会資本の多くは、戦後の復興から高度成長期を通して急速に整備が進められてきた。そのため今後数年で建設後 50 年以上となる設備の割合が加速度的に増加する見込みであり老朽化の問題に直面している。

国土交通省では、道路トンネルについて平成 14 年度に「道路トンネル定期点検要領（案）」を策定し、2～5 年の間隔で確実に定期点検を実施し維持補修工事を実施する対策を講じている。一方、地方自治体では、国土交通省のマニュアルに準ずるあるいは独自のマニュアルなどの作成を行い調査／点検を実施する自治体や、実施予算や人員等の不足により適切なトンネル点検の実施が難しい自治体など、トンネルの管理者によって維持管理の水準にばらつきがある状況であった。しかしながら平成 24 年の笹子トンネル天板崩落事故後、道路トンネルでは道路法の改正や点検要領の改訂により、すべての道路管理者に 5 年ごとの定期点検の実施や点検内容の記録と保存などの義務が明確化された。

道路トンネルと同様に農業や工業などに関わる水インフラについても、その多くが半世紀以上の長い期間供用がなされており、補修や補強を含む維持管理の見直しや効率化を必要とする時期を迎えている。このようななか水インフラの用水施設の使用用途に応じて経済産業省や農林水産省などの所管となる官公庁が異なるが、国土交通省と同様に、平成 25 年度の「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議」が策定した「インフラ長寿命化基本計画」を踏まえ、所管するインフラの維持管理・更新等を着実に推進する中期的な取組の方向性が示された。これら取組みのなかで定期点検についても官公庁ごとに要領やマニュアルなどを整備し、施設管理者による定期点検の実施や点検内容の記録と保管などの義務が明確化されている。しかしながら、開水路や水路トンネルなどといった用水施設では、延長が数 km を超えるものも多く、断面も小さいため車両等の進入が難しい。そのため道路構造物のように点検車両などの点検機器を導入することが困難であり、人手による目視観察や打音検査などが点検作業の主となる。特に農業や工業などに関わる水インフラでは、施設の休止期間に制限があり、調査／点検の現地作業にかけられる時間に限りがある。また、写真-1 に示すように通常は水で満たされているため表面の汚れや藻類の繁殖が著しく、損傷箇所とコンクリート表面の模様との判別が難しい。特に水路トンネルでは写真-2 のように照明施設がないため非常に暗く、ひび割れや漏水箇所などの位置の特定が困難を極め、点検作業に多くの時間を要する場合がある。



写真-1 開水路コンクリート壁面状況



写真-2 水路トンネル構内状況

これら開水路や水路トンネルなどの用水施設における維持管理の効率化を実現するためには、迅速な既存ひび割れ等損傷箇所の位置特定や新規損傷状況の把握などの現地作業時間の短縮が必要不可欠となる。

3. MR デバイスを用いた水路トンネルの維持管理

(1) MR デバイスによるナビゲーション

筆者らは、これらを鑑み図-1 に示すように MR デバイスを用いることで開水路や水路トンネルなどといった用水施設の調査／点検作業において既往のひび割れ等の損傷箇所への迅速なナビゲーションを可能とするシステム（以下、本ナビゲーションシステム）の構築を行った。

本ナビゲーションシステムは、MR デバイス内の既往の損傷箇所などの維持管理情報を含む三次元モデル（以下、維持管理モデル）を三次元画像として点検者の実視界と重ね合わせ、既往のひび割れ等損傷箇所の位置や形状を可視化することができる。これにより、コンクリート表面の汚れや構内照明の有無といった目視観察環境に左右されず、迅速に点検者を既往の損傷箇所や重点確認箇所などへのナビゲーションが可能となる。特に時間的な制約がある水路施設の点検作業では、点検箇所の探索時間を大幅に削減でき、効率的かつ高品質な点検作業を

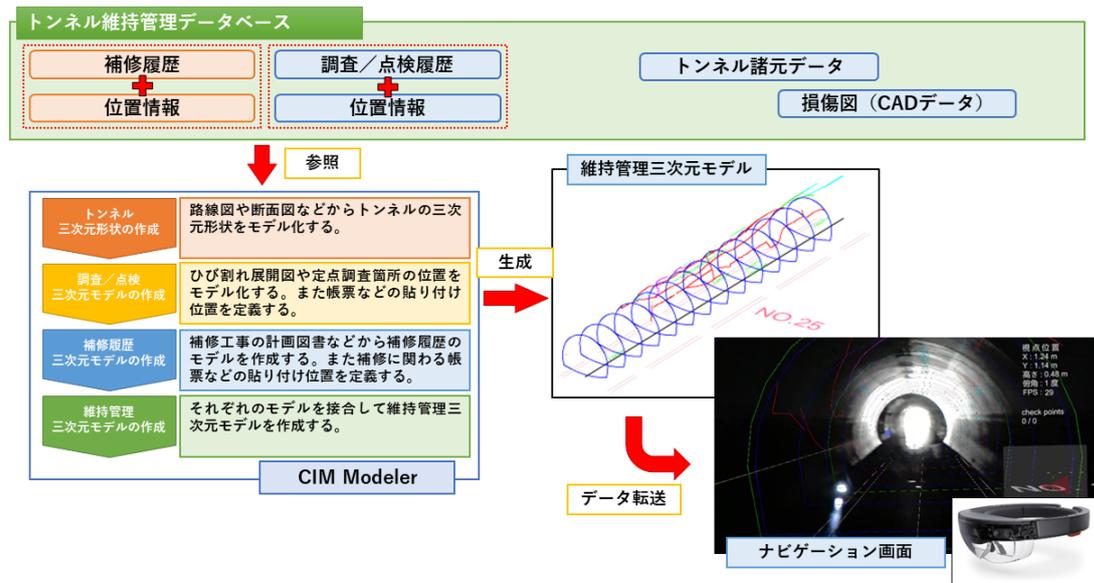


図-1 水路トンネル調査／点検ナビゲーションシステム

を行うことが可能となる。

(2) 調査／点検データの管理

既往の損傷箇所の観察記録や維持補修工事の履歴などの維持管理に関わるデータは、データベースで一元管理し、独自アプリケーションを介してデータの登録や閲覧、帳票等の作成などを行うことができる。また、MR デバイスにダウンロードする定期点検の区間や反映する情報の種別を設定することで、必要となる維持管理モデルの生成が可能である。

(3) 維持管理モデルの生成

図-2 に維持管理モデルを生成する際の流れを示す。維持管理モデルは、定期点検区間の形状、既往の損傷状況、維持補修工事の履歴に関する情報を視覚化し構築した三次元モデルを組み合わせることで生成される。従来の目視観察では、損傷箇所の状況を平面展開図に記録する。そのため、水路形状と組み合わせることで三次元モデルを構築するには、水路形状に合わせて平面展開図を座標変換し、水路形状を表す三次元モデルの表面に張り付けるといった工程が必要である。平面的な面で構成される構造物の場合には、平面展開図を面ごとに分割し三次元モデルに張り付けることでモデル化する手法が一般的である。しかし、曲面を含む構造物では、平面展開図を単純に面分割して張り付ける方法でモデル化することは難しい。そこで、本ナビゲーションシステムでは、UV マッピングなどの手法を用いて平面展開図をメッシュ分割し、曲面等に近似するなどの手法を用いた。水路トンネルにおける損傷状況のモデル化の手法を図-3 に示す。

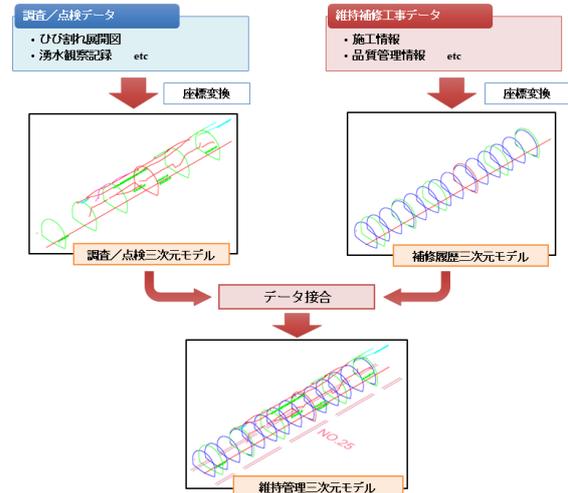


図-2 維持管理モデル生成の流れ

4. 適用事例

(1) 電力用水路トンネルへの適用

電力用水路トンネルの定期点検作業における本ナビゲーションシステムの適用事例を以下に示す。本事例は、民間企業が所有する水力発電用の導水路トンネルにおいて当社が実施している定期点検への適用を行ったものである。

本導水路は、大正時代に築造された用水路であり供用から100年近く経過する水力発電用水路であり、水路延長は開水路と水路トンネルを合わせて約5kmである。今回は本ナビゲーションシステムを、このうち過去に維持補修工事を実施した導水路トンネルの目視点検に適用

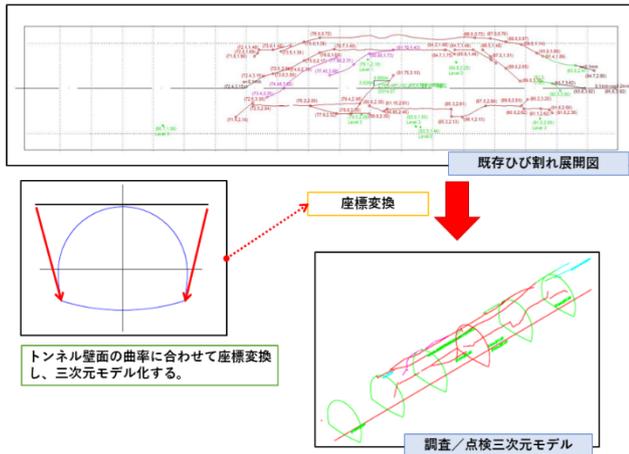


図-3 水路トンネルにおける座標変換

した。本水路トンネルは、一般道と交差する箇所があり、車両の通行などによって補修箇所新たな変状が発生していないか経過観察を行っている。新たな変状が確認された場合には、補修前の変状位置およびその状況と照合を行い対策方法について検討を行うが、維持補修工事によって以前のトンネル壁面が隠れてしまい、既往の損傷箇所およびその状態を目視確認することができない。そこで、今回の適用では既往の損傷箇所や定期点検箇所などへのナビゲーションと合わせて、維持補修工事によって目視確認ができない損傷箇所についてもトンネル壁面の補修状況に左右されないナビゲーションを実現させた。

適用状況を図-4に示す。また本ナビゲーションシステムにおける実視野と三次元画像の重ね合わせの精度は、図-5に示すように本適用全体において約50mmとなった。

5. MR デバイスによるひび割れ等損傷状況の把握

(1) MR デバイスを用いた損傷箇所位置の推定手法

本ナビゲーションシステムは、ひび割れ等の損傷箇所や点検箇所への迅速なナビゲーションを実現するシステムであるが、既往の調査/点検記録などを現地作業へフィードバックするといった限定的な利用にとどまっている。しかしながら、開水路や水路トンネルといった用水施設における維持管理の効率化・省力化を実現する上では、新たな損傷状況の把握や点検記録の登録などの現地作業の効率化・省力化といった双方向なシステム化が必要不可欠である。そこで、筆者らはMRデバイスの録画機能を活用し後処理でひび割れ等の損傷箇所の位置や形状を抽出可能なシステムの開発を行い、調査/点検作業における双方向な情報の利活用を可能とした。

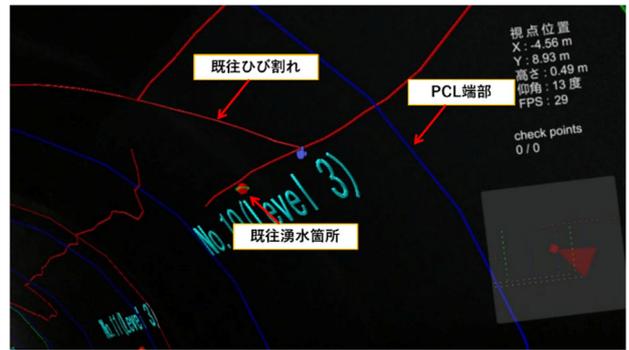


図-4 システム適用状況

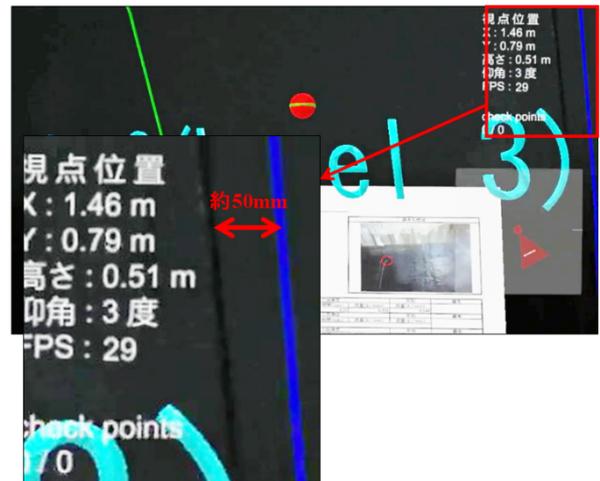


図-5 ナビゲーション精度

(2) 水路トンネルひび割れ展開図作成システム

水路トンネルひび割れ展開図作成システム（以下、ひび割れ展開図作成システム）は、MR デバイスを用いて位置や寸法などを推定できる三次元のメッシュ画像を重ね合わせることでひび割れや点検箇所などの位置や形状を記録することが可能となるシステムである。MR デバイスの録画機能を用いて点検者の目視状況を録画し、事務所などで専用のアプリケーションを用いて後処理することで、目視観察したひび割れなどの位置や形状を図化することができる。これにより計測ミスによるひび割れ等の損傷箇所の位置ズレや見落としなどのヒューマンエラーを軽減でき、動画データとして記録を残すことができるのでエビデンスとなりえる。図-6にひび割れ展開図作成システムの構成および処理の流れを示す。

(3) 三次元メッシュを用いた位置推定

ひび割れ展開図作成システムでは、アプリケーション上でトレースしたひび割れ等の位置や形状を推定し、ひび割れ展開図などに利活用可能な CAD データを出力する。位置の推定は、図-7に示すようにメッシュの格子点の画像座標と実座標を関連付け、写真測量等で広く利用されている射影変換を行うことで見かけ上の歪みを補正

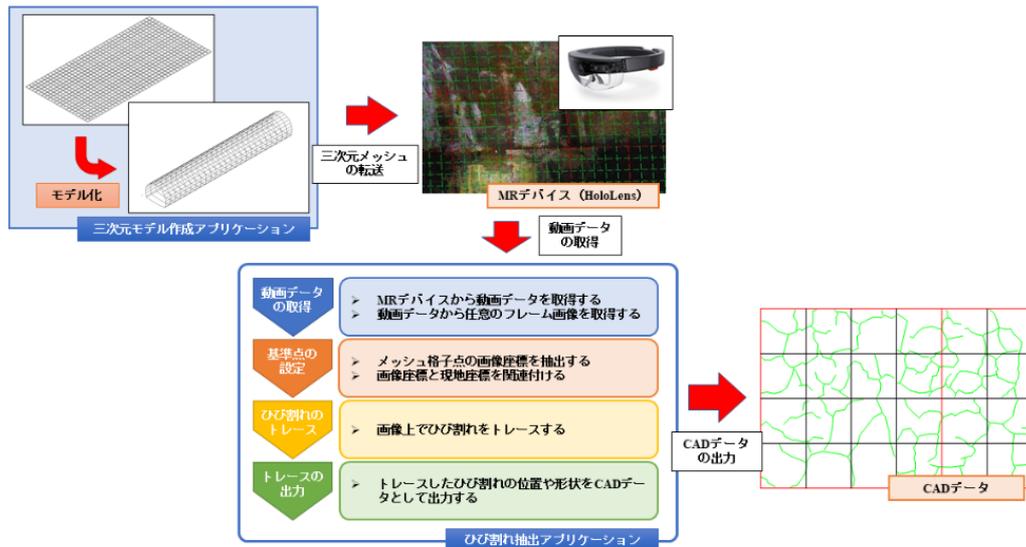


図-6 水路トンネルひび割れ展開図作成システム

し、格子に含まれるトレースラインの変化点などの位置を現地の三次元座標に変換する。

(4) 三次元メッシュモデルの作成

従来の目視観察では、損傷箇所状況を平面展開図に記録する。ひび割れ展開図作成システムにおいてもトレースした結果を従来のひび割れ展開図へ反映可能なように、この平面展開図の座標系に合わせてメッシュを作成している。しかしながら、平面展開図の座標系は、平面座標系となるため実際の開水路や水路トンネルなどの形状と異なる。そのため、実際の調査／点検対象となる水路形状に合わせてメッシュを座標変換し、水路形状を表す三次元モデルの表面に張り付けるといった工程が必要となる。平面的な面で構成される構造物の場合には、メッシュを面ごとに分割して三次元モデルに張り付けることでモデル化することが可能である。しかし、水路トンネルなどの曲面を含む構造物では、メッシュを単純に面分割して張り付ける方法でモデル化することは難しい。そこで、本ナビゲーションシステムのモデル化手法と同様に、UV マッピングなどの手法を用いてひび割れ展開図と関連付けたメッシュデータを曲面等に近似しモデル化を行っている。

(5) ナビゲーションシステムとの組み合わせ

ひび割れ展開図作成システムはMR デバイスを用いたシステムであるので、前述のナビゲーションシステムと併用することも可能である。ナビゲーションシステムとの併用は、それぞれのシステムが生成する三次元モデルを合成し、MR デバイスに導入することで可能となる。これにより既存のひび割れなどの進展状況などを確認し

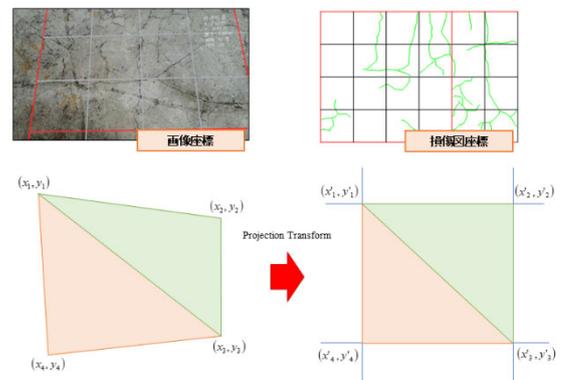


図-7 射影変換によるメッシュ補正

ながらコンクリート壁面の観察を行うことが可能である。

(6) 実証実験事例

ひび割れ展開図作成システムの有効性を検証する目的で、当社の R&D センターに試験フィールドを設定し実証実験を行った。実験内容としては、試験フィールド内にあるひび割れを抽出し、その抽出結果と実際のひび割れの位置等の誤差を求めた。なお、実験フィールドは、5m×20mのコンクリート床板とし、重ね合わせたメッシュ格子サイズは250mm×250mmとした。

本実験で抽出したひび割れ等の位置や形状をひび割れ展開図とし、ナビゲーションシステムにより再度コンクリート床板と重ね合わせた結果、実験フィールド全体での誤差は50mm以内となった。また、ひび割れの形状などの特徴を十分捉えることができることを確認した。

写真-3 および写真-4 に、MR デバイスによるメッシュ画像との重ね合わせ状況およびトレース結果との重ね合わせ状況を示す。

6. おわりに

本稿では、MR デバイスの特長を活用し、既往のひび割れ等損傷箇所や点検箇所への迅速なナビゲーションおよび新たな損傷箇所の位置と形状の推定を行う手法の確立とシステム化について報告した。これにより、水路トンネルや開水路など水インフラに関わる調査／点検作業の効率化・省力化を実現した。

国内では、関係省庁が連携を図り社会インフラの更新を含めた将来にわたって必要なインフラの機能を発揮し続けるための維持管理への取組が進められており、今後インフラ維持管理の効率化・省力化に関わる技術への要求が高まってくるものと考えられる。こういった社会的な背景を踏まえ、今後も水路トンネルや開水路など水インフラだけでなく、橋梁や道路トンネルなど社会インフラ全般の調査／点検や補修工事など維持管理サイクルに関わる技術開発を進め、更なる作業の効率化・省力化を目指す。

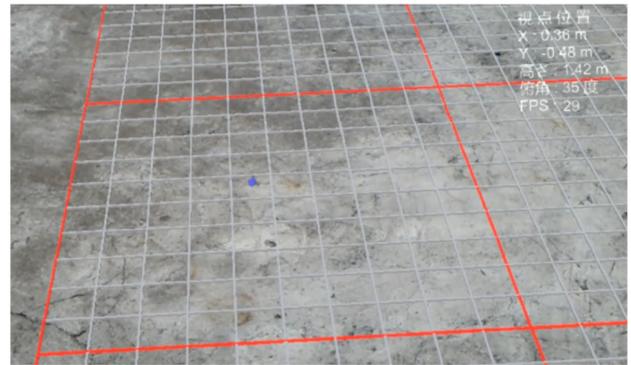


写真-3 メッシュ画像重ね合わせ状況

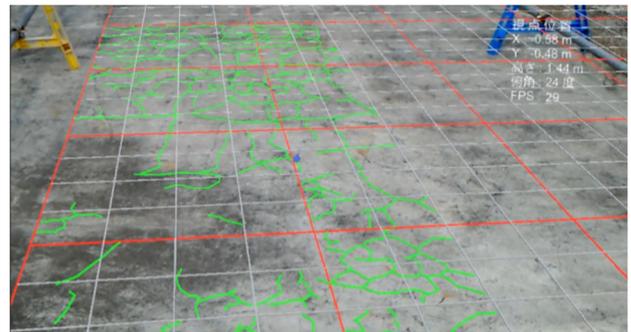


写真-4 トレース結果重ね合わせ状況