

【平成30年度JKA機械振興補助事業】

「小規模橋梁の安全確認のための効率的点検技術 の調査研究」

総括報告書

一般財団法人
ニューメディア開発協会

平成31年3月



本研究は競輪の補助を受けて実施しました。
<http://hojo.keirin-autorace.or.jp>

小規模橋梁の安全確認のための効率的点検技術の
調査研究

総括報告書

東京都市大学

今井 龍一

平成 31 年 3 月

目次

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1. 我が国の橋梁維持管理の概況 | 1 |
| 1.1. 橋梁ストック | 1 |
| 1.2. 橋梁点検..... | 3 |
| 1.3. 課題の総括 | 3 |
| 2. 本研究の実施概要..... | 4 |
| 2.1. 目的 | 4 |
| 2.2. 実施内容..... | 4 |
| 2.3. 実施工程..... | 4 |
| 2.4. 照査内容..... | 4 |
| 3. 自走式ロボットの照査..... | 8 |
| 3.1. 自走ロボットの仕様の作成..... | 8 |
| 3.2. 有用性の検証 | 9 |
| 3.3. 自走式ロボットの要件定義..... | 30 |
| 3.4. 要件の満足度の照査（総括） | 33 |
| 4. 三次元空間の形成アルゴリズムの照査 | 34 |
| 4.1. 三次元空間の形成アルゴリズムの考案 | 34 |
| 4.2. 有用性の検証 | 35 |
| 4.3. 要件の満足度の照査（総括） | 47 |
| 5. 三次元損傷図作成支援システムの照査 | 48 |
| 5.1. 三次元損傷図作成支援システムの要件定義 | 48 |
| 5.2. 有用性の検証 | 49 |
| 5.3. 要件の満足度の照査（総括） | 53 |
| 6. 人工知能を用いた損傷判定の有用性の検証結果の照査 | 54 |
| 6.1. 損傷の選定 | 54 |
| 6.2. 有用性の検証 | 54 |
| 6.3. 要件の満足度の照査（総括） | 65 |
| 7. アウトリーチ活動の照査 | 66 |
| 8. 工程管理の照査 | 67 |
| 9. 総括 | 68 |

1. 我が国の橋梁維持管理の概況

1.1. 橋梁ストック

我が国は、120万km以上の道路を有しており、その事業費は図1に示すとおり、ここ数年はおよそ6兆円も投じられている。

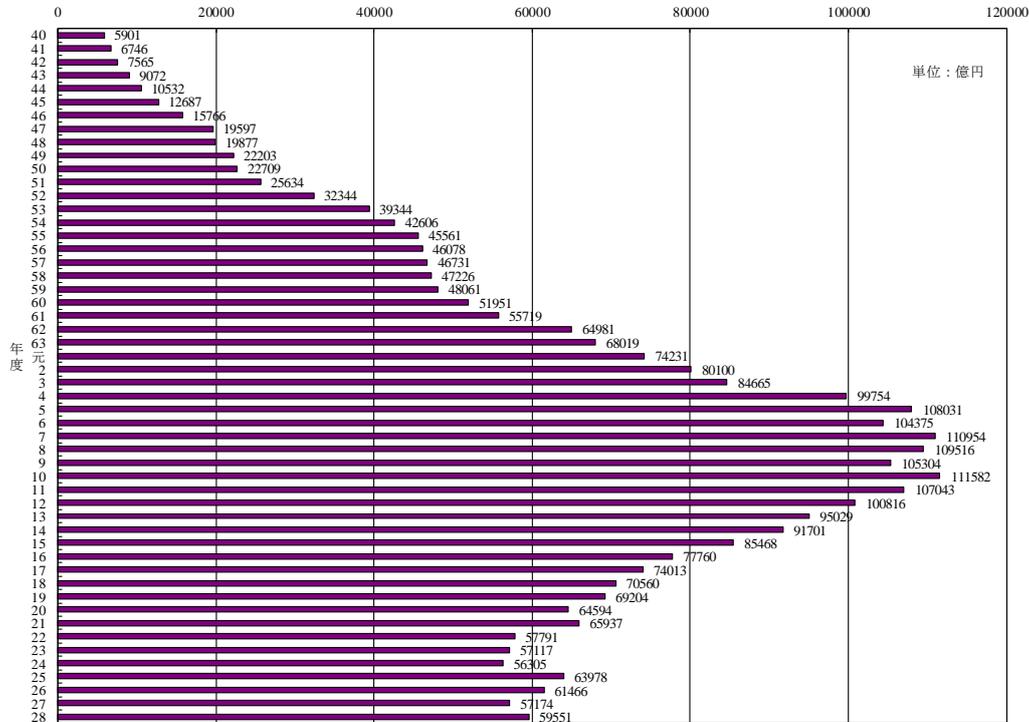


図1 道路事業費の推移 (出典：道路統計年報 2018)

橋梁構造物に着目すると、図2に示すとおり、我が国には約70万橋ものストックがあり、市町村道にある橋梁は約52万橋で、全体の7割以上を占めている状況にある。

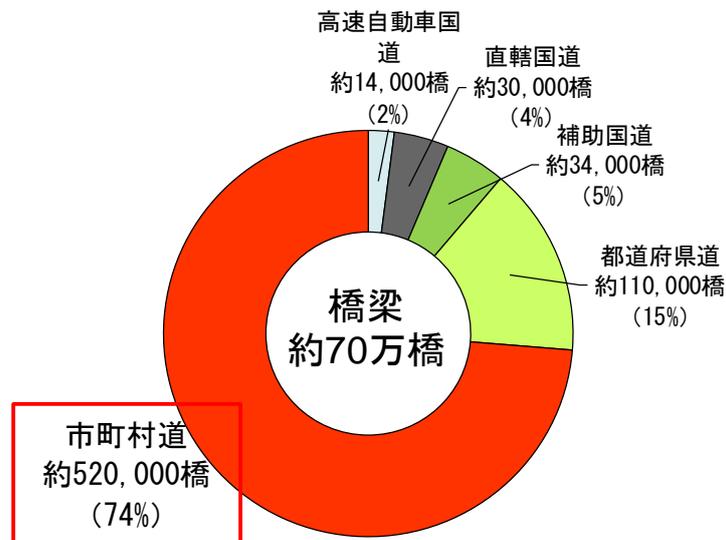


図2 道路種別別橋梁数 (出典：国土交通省)

これら膨大な橋梁の約3割は1950年～1975年にかけて建設されている（図3）。その規模としては、図4に示すとおり、市区町村が管理している橋梁の80%以上が橋長15m未満である。

建設後50年を経過した橋梁は、2025年には橋長15m以上で約3割、橋長15m未満で約5割を占めることになる。最も深刻な事実として、建設年度が不明の橋梁が全国で23万橋もあり、9割近くが市区町村管理の15m未満の橋梁となっている。

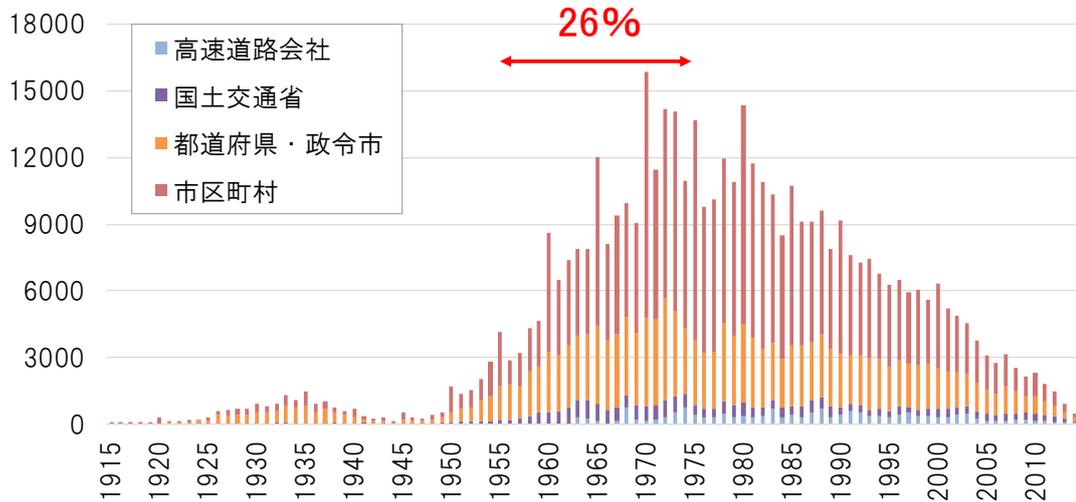


図3 建設年度別橋梁数（出典：国土交通省）

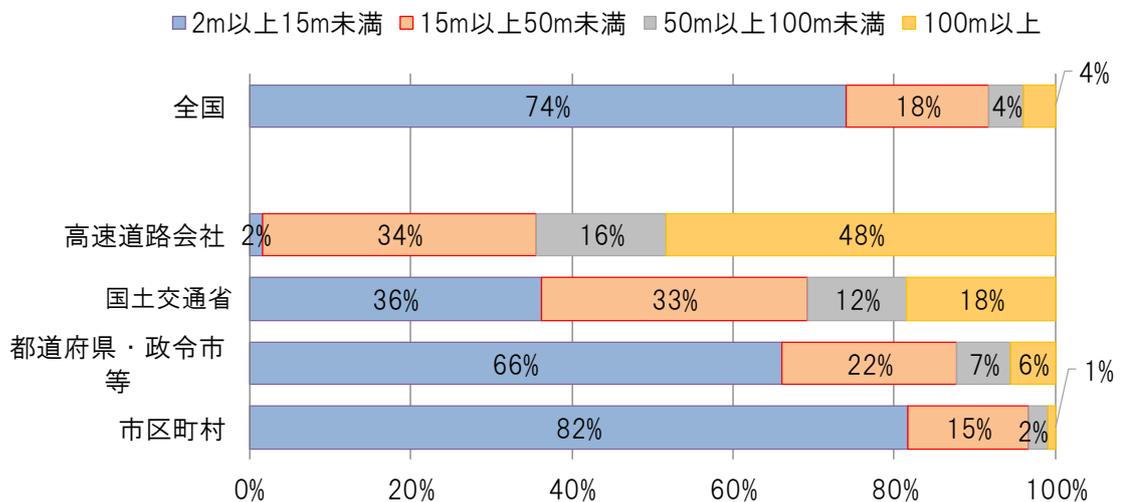


図4 道路管理者別橋長分布（出典：国土交通省）

1.2. 橋梁点検

我が国では、前節で示した橋梁ストックを賢く保全していく必要がある。道路管理者は橋梁点検要領（国土交通省道路局国道・防災課）に準じて所管の橋梁を5年に1回の頻度で定期点検している。点検方法としては、近接目視を軸にして、適宜、点検器械・機具を用いて、鋼材の腐食や亀裂やコンクリートひび割れなど26種類に損傷を分類している。点検した損傷状況に対して、対策区分を7段階（A：損傷なし B：状況に応じて要補修 C：速やかに補修、E1：緊急対応（構造上） E2：緊急対応（第三者等被害） M：維持工事対応 S：詳細調査）により判定している。これら点検結果は、点検調書・橋梁管理カルテとして収録されている。

1.3. 課題の総括

前節までの実態を踏まえると、膨大な橋梁ストックの老朽化対策は喫緊の要事であることは言うまでもない。国土交通省は平成26年度から道路メンテナンス年報を発行し、老朽化対策の実態を情報公開している状況からも重要性が高い。

しかしながら、膨大な橋梁ストックがゆえに、市区町村の橋梁点検には相当なる負荷がかかっており、少子高齢化や人口減少の将来予測を踏まえると、財政面で対応ができない可能性が高くなっていく。さらに、建設産業全体の深刻な課題として、熟練技術者・熟練技能者の高齢化があり、道路管理においても橋梁点検の熟練者が次々と減少していることがあげられる。

この現状や将来予測を踏まえると、橋梁点検の技術開発は極めて重要であると言える。

2. 本研究の実施概要

2.1. 目的

本研究の目的は、「小規模橋梁の安全確認のための効率的点検技術の調査研究補助事業」として、小規模橋梁を対象にして様々な課題・リスクに対して実証実験を行い、利用シーンに応じた適用範囲を整理し、機能要件定義を明確にして、実運用に向けた開発をするための一資料となる報告書の作成としている。

2.2. 実施内容

本研究では、次の 4 つのことに取り組んでいる。詳細な実施内容は図 5 に示すように体系化されている。

- * 小規模橋梁点検に適用できる自走式ロボットの機能要件の定義
- * 画像データを用いた三次元空間の形成アルゴリズムの開発
- * 三次元損傷図作成支援システムの実現可能性の検証
- * 人工知能を用いた点検技術の実現可能性の検証
- * 展示会への出展

2.3. 実施工程

- * 実施計画を立案して計画書を作成している。
- * 実施工程はの図 6 および図 7 とおり詳細化されている。
- * 実施計画書に準じて定例会（Web 会議も含む）の開催日予め設定し、概ね 2 週間毎に開催し、進捗を確認している。

2.4. 照査内容

本研究の照査は次の 2 点に基づいて実施している。

- * 定例会に同席し、研究進捗や技術的な妥当性を確認する。
- * 研究成果を確認し、当該分野の技術動向を踏まえた開発技術の妥当性を確認する。

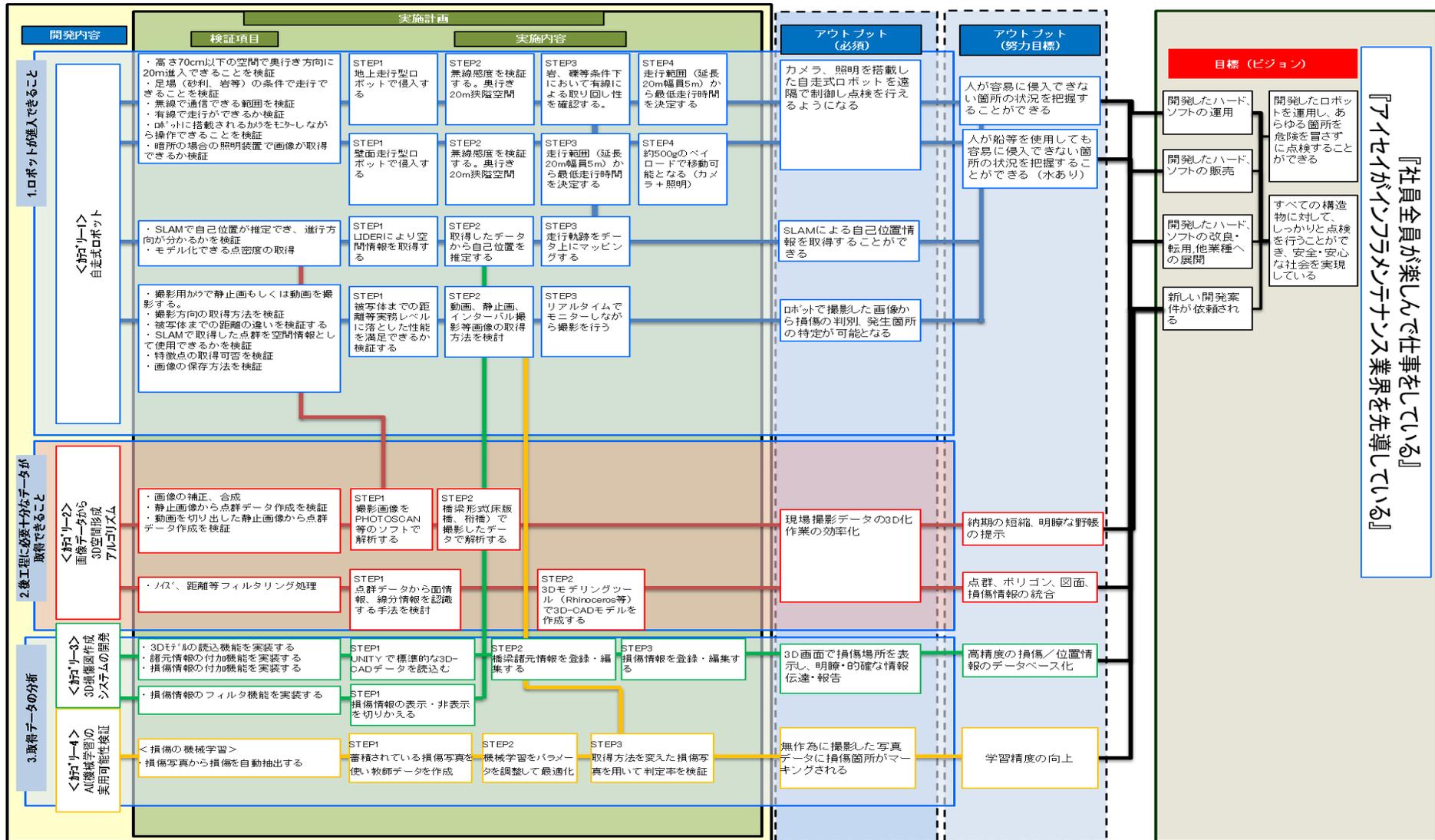


図 5 本研究の開発内容

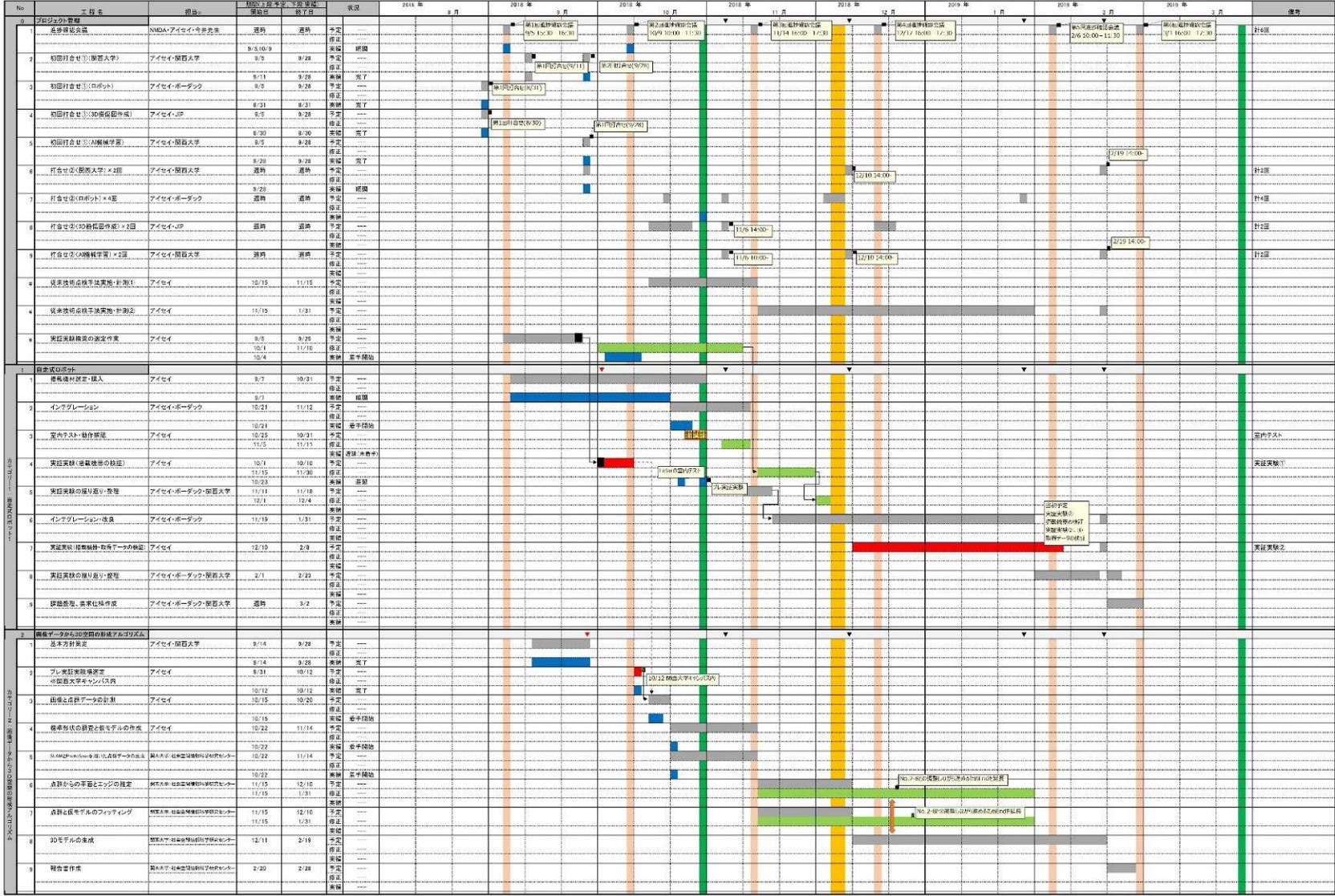
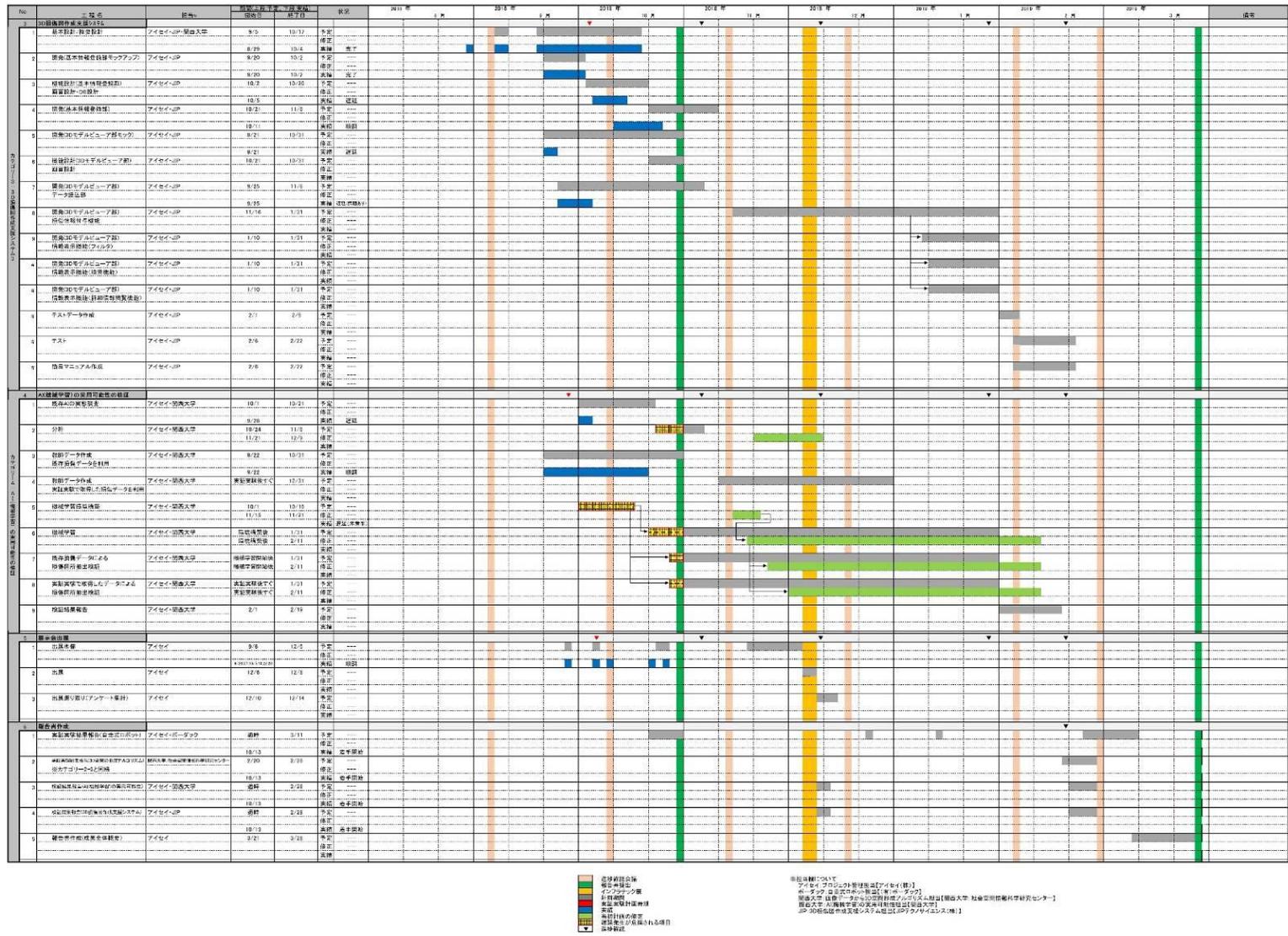


図 6 工程計画 (1/2)



3. 自走式ロボットの照査

3.1. 自走ロボットの仕様の作成

本研究では、自動ロボットは次の3点を満足させることが必須と定義している。

- * ロボットが進入できること
- * 後工程に必要な十分なデータが取得できること
- * 取得データの分析が可能なこと

検証対象構造物および搭載機材は次のとおり設定している。

対象橋梁：RC 単純床版橋及びボックスカルバート橋【桁下高 70 cm】

| 対象損傷 | 損傷位置 | 損傷寸法 | 被写体距離 | 静止画素数 | 動画画素数 | 備考 |
|---------|------|-------|-------|-------|-------|----|
| ひびわれ | ◎ | 0.1mm | | | | |
| 剥離・鉄筋露出 | ◎ | | | | | |
| 漏水・遊離石灰 | ○ | | | | | |
| うき | ○ | | | | | |

| 搭載機材 | 仕様 | 参考 | 備考 |
|--------------|---|-------------------|----|
| 撮影カメラ | <ul style="list-style-type: none"> ➢ 2,000万画素 ➢ 6K Photo (切り出し1,800万画素相当) | Panasonic : GH-5 | |
| 操作用カメラ | <ul style="list-style-type: none"> ➢ 進行方向を画像転送 | — | |
| SLAM (LiDAR) | <ul style="list-style-type: none"> ➢ 水平 : 360°全方位 ➢ 垂直 : 30°(+15°~ -15°) / 20°(+10°~ -10°) ➢ 自己位置推定 ➢ マッピング | Velodyne : VLP-16 | |
| 撮影照明 | <ul style="list-style-type: none"> ➢ LEDビデオライト | — | |

- * 撮影カメラは、SfM 系ソフトによる後処理に耐えうる分解能の画像取得が可能であることが求められる。
- * 操縦用カメラは、視野角が広い必要がある。
- * 自己位置推定方法は、Lidar を用いる。
- * 映像伝送方法は、無線映像伝送装置 2 台とする。

本研究は、次の2種類のロボットを開発対象としている。

- * 地上走行型ロボット：水のない桁下、かつ人が容易に進入できない桁下高さ 70cm 程度とする。
- * 壁面走行型ロボット（プロペラの風圧で壁面に押しつけられて走行する）：桁下環境が水路や河川といった橋梁、カルバート等を想定し、地上走行することが困難な箇所を対象とする。

不足している機能は開発元と連携してカスタマイズ開発する方針としている。実証実験は上限 4 回とし、それぞれの基本性能を小規模橋梁の後述する条件のものとして走行試験、通信状況等を順次確認することとしている。

3.2. 有用性の検証

3.2.1. 実証実験計画の立案

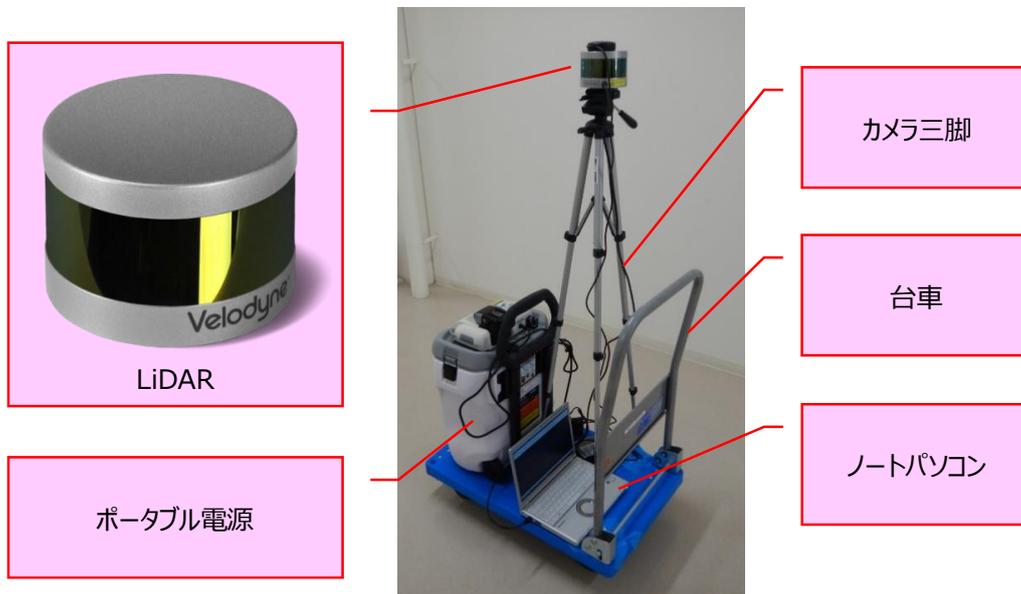
当該実証実験の目的は、開発したロボットの適用可能性を種々の実験項目の整理としている（カテゴリー1）。また、実証実験で取得した様々なデータ（静止画、動画、LiDARの点群データ等）を用いて、後工程（カテゴリー2、3、4）に有効なデータとなっているかどうかの検証もあわせて実施する方針としている（表 1 参照）。

表 1 実験計画概要

| No | 工程名 | 時期 | 内容 |
|----|--|----------------------------|---|
| 1 | 利用シーンの選定 | 2018年9月頃 | 様々な課題に対して、どこに着目した実証実験を想定するかを協議・共有した上で確定 |
| 2 | 室内テスト・動作確認 | ロボット納入後 すぐ | 操作方法の確認 動作確認 ・スピード ・乗り越え性能など |
| 3 | 実証実験 ・ ロボット走行性能の検証 ・ 搭載機器の検証 ・ 搭載機器・取得データの検証 ・ 全体工程の検証 | 2018年10月頃 ～ 2019年2月頃 | <実証実験前半で確認する内容> ・ ロボットの走行性能、通信品質、搭載機器（カメラ、照明装置等） ・ ロボット搭載カメラと撮影対象迄の距離、通信環境、視認性等の課題抽出 <実証実験後半で確認する内容> ・ 撮影画像の目視での損傷箇所確認、抽出に向けた課題分析 ・ AI導入に向けた課題分析 ・ 測定対象の形状の複雑さ（形式、材質、構造部材等）に関する課題抽出 ・ 3D画像作成に向けた課題分析 ・ ロボットの操作性、バッテリー等の課題抽出 |

3.2.2. 室内実験

次の実験機器を用いて基本事項を確認する実験を実施している。



※LiDAR: Velodyne LiDAR VLP-16

図 8 実験機器

(実施内容)

- * LiDAR 及び関連機器の仕様と使用方法の教育を受ける。
- * 台車に各機器 (LiDAR、PC、電源、三脚) を設置する。
- * テスト計測を行う場所 (通路等) へ移動する。
- * ノートパソコンを起動し、LiDAR をコントロールするソフトを立ち上げる。
- * LiDAR の電源を入れ、動作状況を確認する。
- * 計測を開始、台車を移動させる。
- * 所定の位置に到着後、計測を終了させる。
- * 計測データを開き、データ確認方法等の教育を受ける。

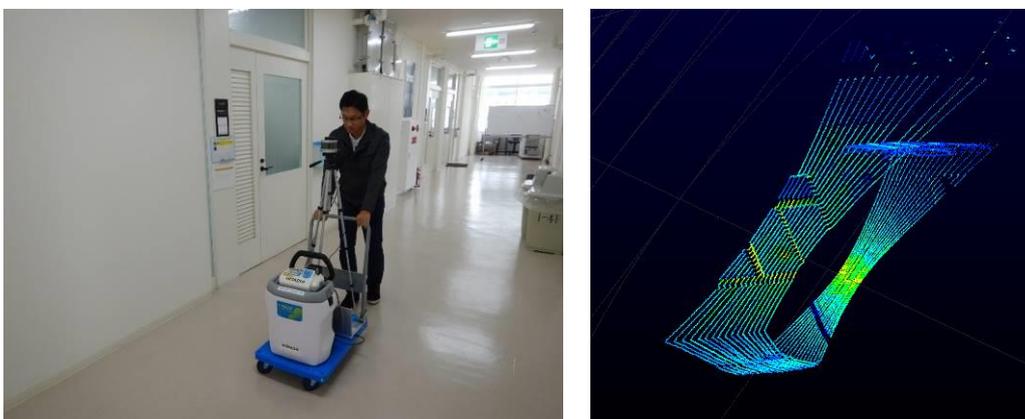


図 9 実験の様子および計測データ

3.2.3. 予備実験

現場の実証実験に備え、安定した環境（屋内）で現場を模擬した配置で次の実験機器を使ってテスト計測および課題抽出を行っている。

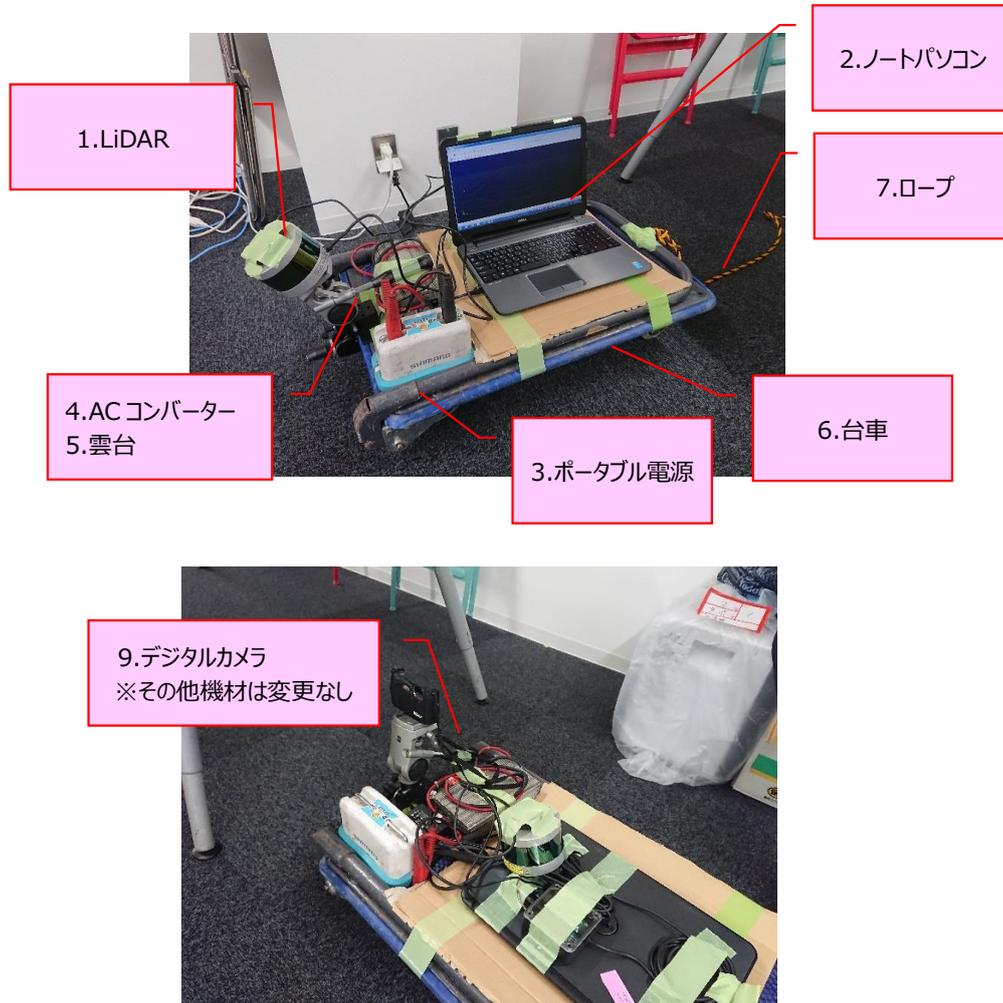


図 10 実験機器

(実施内容)

- * 小型バッテリーでの動作確認
- * 現場で使用する台車への設置
- * 現場を模擬してテーブル、パーテーションを配置
- * LiDAR (Velodyne LiDAR VLP-16) による計測
- * 台車は手押しではなく、ロープによる誘導
- * 同じ台車によるデジタルカメラ撮影および SfM 処理の実施
- * LiDAR、SfM の形状データの検証用として、地上型レーザースキャナー (FARO Forcus3D) による計測実施



図 11 実験の様子および計測データ

実験の結果、室内計測では GPS による位置座標は取得できなかったため、実証実験では、屋外での可否の確認が必要である知見を獲得している。

3.2.4. その他ロボット技術に関する実験

今回開発したロボットとは別の機構で動作する次図の壁面走行型ロボット（ボーダック社開発）に、カメラ、照明装置をつけて走行性能および取得画像の適用可能性の課題を確認している。



図 12 実験機器

実施場所は、壁面走行型ロボットが縦横 80cm 程度であり、壁面を登るときに一定のストロークが必要であり、プロペラの駆動音が大きいいため、次の条件に沿った橋長 9.00m、幅員 141.1m、桁下 3.00m のボックスカルバート橋を選定している（図 13 参照）。

- * 桁下高さ 2m以上のコンクリート壁面構造物
- * 交通量が少ない地域
- * 近くに住宅密集地などが無い地域
- * 橋梁点検を実施済みでること
- * 自社から自動車で移動できる地域

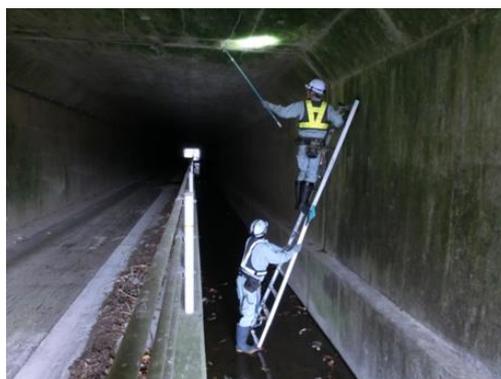


図 13 実験場所

(実験内容)

- * 壁面走行型ロボットにカメラを搭載
- * 走行状態でカメラ撮影



図 14 実験の様子



図 15 計測データ

実験の結果、次のような知見が得られた。

- * 桁下高さ 3m で実施して、ストロークは昇る時にタイヤ 1 個分約 15cm、そして昇った時の高さ 2m 程度が望ましい。昇る時に駆動力を高くするため壁面に昇った操縦制御が改良できれば機体寸法 + α 程度までは狭められると考えられる。
- * はじめから横向きで壁面を走行することも、ストロークがとれない環境下では必要になることに対応した機体の設計、制御方法とする。また、走行面がコンクリート打ちっばなしの比較的きれいな表面もしくはコケのような汚れがついた状態で、走行方向を変える時および壁面を昇る時にタイヤが空転する場面が見られた。壁面から落下することはなかったが、タイヤ材質、形状の改良が必要である。
- * 取得した動画データは、良好で壁面の状況を把握できた。ただし、カメラと撮影対象（壁面）との距離が小さく画角も狭いため、SfM 処理の後処理が適切にできない可能性がある。カメラ位置の変更が環境に応じて簡単に変更できる機構・治具の開発が必要である。

3.2.5. 実証実験（第1回 2018年12月）

橋梁点検の現場にて、機器の動作確認と、データの取得性の検証や取得したデータの次の後工程の検証を試行している。

- * カテゴリー1：小規模橋梁の架橋環境下において、走行性、伝送性能、バッテリーの持ちを検証する。
- * カテゴリー2：プレ実証実験、室内試験で得られた結果をもとに、LiDARおよびSfM処理用の画像データ取得方法に係わる搭載方法、撮影方法等の条件を変えてデータを取得する。それらの条件を変えて取得したデータで、後処理への影響を判断する。
- * カテゴリー4：地上走行型ロボットで取得した画像データを機械学習（AI）のためのデータとして取得する。

(1) 実験機器

本実験で用いられている機器を次表・次図に示す。

表 2 実験機器

| No | 機材 | 備考 |
|----|-------------------|---------------------------|
| 1 | 地上走行型ロボット 本体 | |
| 2 | 地上走行型ロボット用送信機 | |
| 3 | Li-ion バッテリー | ロボット本体、映像伝送装置で使用 |
| 4 | GoPro hero7 | |
| 5 | GoPro hero7 バッテリー | |
| 6 | LiDAR | Velodyne VLP-16 Hi-Res |
| 7 | バッテリー | 電力丸 LiDAR に使用 |
| 8 | ノートパソコン | LiDAR コントロール用 |
| 9 | LAN ケーブル | LiDAR/PC 接続 |
| 10 | 一眼レフカメラ | Panasonic GH5S SfM データ取得用 |
| 11 | デジタルカメラ | 作業記録用 |
| 12 | 分度器 | |
| 13 | パネル | 計測目標用 |
| 14 | 工事看板 | 計測目標パネル支持用 |
| 15 | 測量用アルミスタッフ | 計測目標用 |
| 16 | 地上型レーザースキャナー | FARO Focus S350 |



図 16 実験機器

(2) 実施場所

実施場所は、以下の条件に沿った橋長 2.00m、幅員 4.49m、桁下 0.85m の RC 床版桁橋を選定している（図 17 参照）。

- * 橋梁構造は、桁下 70cm 程度の RC 床版桁橋かボックスカルバート橋とする。
- * 交通量が少ない地域とする。
- * 近くに住宅密集地などが無い地域とする。
- * 直近で橋梁点検を実施済みである。
- * 自社から自動車で移動できる地域とする。
- * 桁下環境は水位の低い河川が望ましい。
- * ヒトが点検しにくい。



図 17 実験場所

(3) 実施内容

本実験の実施内容は次のとおりである。

- * 地上走行型ロボットに LiDAR、カメラを搭載
- * 検討したパラメータに応じて、資材を現地に設置
- * 走行状態で LiDAR 計測を実施

- * 走行状態でカメラ撮影
- * 地上型レーザースキャナーで全体計測

カテゴリー毎の実施内容を以下に示す。

1) カテゴリー 1

以下の要求仕様に対する性能を確認する。

- 河床状況（泥、段差）
- 運動性能（スロットル開度）
- バッテリー（稼働時間）
- 画像伝送システム（伝送状況）

2) カテゴリー 2

LiDAR に関する検証として、LiDAR 搭載角度、目標物の設置状況をパラメータとして 9 ケースを計測する（表 3、図 18、図 19 参照）。また、カメラ（SfM、AI）に関する検証として、カメラ機種、搭載方法などをパラメータとして 32 ケースを計測する（表 4、図 20 参照）。

表 3 LiDAR に関する検証内容（当初予定）

| | | 橋梁側面に板の設置 | | | | |
|----------|---------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | ナシ | アリ | | | |
| | | | 出口側のみ | | 両側 | |
| | | | 離隔アリ | 離隔ナシ | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 設置 角度 | 水平から40° | 1 | 実施 1-1-1 | - | - | - |
| | 水平 | 2 | 実施 1-2-1 | 実施 1-2-2 | 実施 1-2-3 | 実施 1-2-4 |
| | 水平から15° | 3 | 実施 1-3-1 | 実施 1-3-1 | 実施 1-3-3 | 実施 1-3-4 |

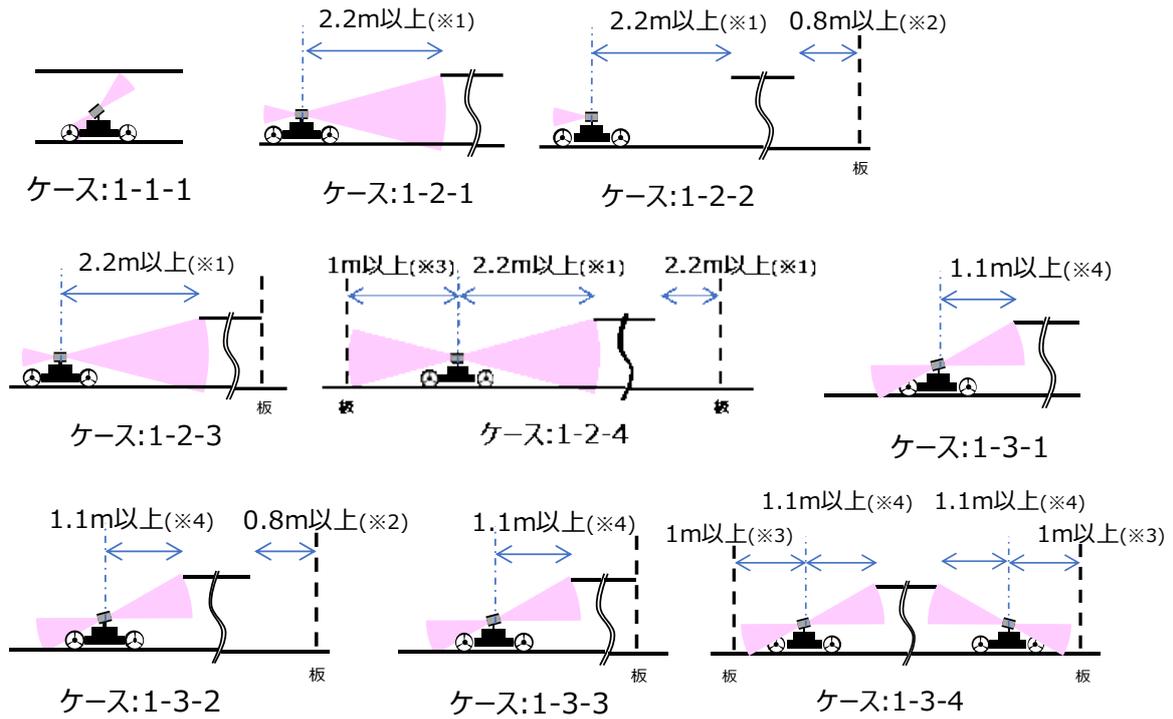


図 18 ケース別の LiDAR/目標物設置イメージ

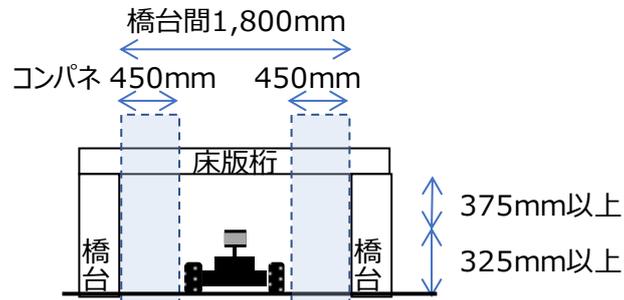


図 19 パネル寸法と設置位置

表 4 カメラに関する検証一覧（計画時）

| カメラ機種 | カメラの設置方向 | | 撮影方式 | 静止画 撮影ピッチ | ケースNo. | 通しNo. | |
|------------------|----------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|----|
| | 鉛直方向 | 水平方向 | | | | | |
| 1.GH5S (高画質) | 1.水平 | 1.正面 | 1.動画 | - | 2-1-1-1-1-0 | 1 | |
| | | | 2.静止画 | 100mm | 2-1-1-1-2-1 | 2 | |
| | | | | 300mm | 2-1-1-1-2-3 | 3 | |
| | | 500mm | 2-1-1-1-2-5 | 4 | | | |
| | | | 2.右45° | 1.動画 | - | 2-1-1-2-1-0 | 5 |
| | | | | 2.静止画 | 100mm | 2-1-1-2-2-1 | 6 |
| | 300mm | 2-1-1-2-2-3 | | | 7 | | |
| | 500mm | 2-1-1-2-2-5 | 8 | | | | |
| | | 2.上向き45° | 1.正面 | 1.動画 | - | 2-1-2-1-1-0 | 9 |
| | | | | 2.静止画 | 100mm | 2-1-2-1-2-1 | 10 |
| | 300mm | | | | 2-1-2-1-2-3 | 11 | |
| | 500mm | | 2-1-2-1-2-5 | 12 | | | |
| | | | 2.右45° | 1.動画 | - | 2-1-2-2-1-0 | 13 |
| | | | | 2.静止画 | 100mm | 2-1-2-2-2-1 | 14 |
| | 300mm | 2-1-2-2-2-3 | | | 15 | | |
| | 500mm | 2-1-2-2-2-5 | 16 | | | | |
| 2.Go Pro (広角) | 1.水平 | 1.正面 | 1.動画 | - | 2-2-1-1-1-0 | 17 | |
| | | | 2.静止画 | 100mm | 2-2-1-1-2-1 | 18 | |
| | | | | 200mm | 2-2-1-1-2-2 | 19 | |
| | | 300mm | 2-2-1-1-2-3 | 20 | | | |
| | | | 2.右45° | 1.動画 | - | 2-2-1-2-1-0 | 21 |
| | | | | 2.静止画 | 100mm | 2-2-1-2-2-1 | 22 |
| | 200mm | 2-2-1-2-2-2 | | | 23 | | |
| | 300mm | 2-2-1-2-2-3 | 24 | | | | |
| | 2.上向き45° | 1.正面 | 1.動画 | - | 2-2-2-1-1-0 | 25 | |
| | | | 2.静止画 | 100mm | 2-2-2-1-2-1 | 26 | |
| | | | | 200mm | 2-2-2-1-2-2 | 27 | |
| | | 300mm | 2-2-2-1-2-3 | 28 | | | |
| | | | 2.右45° | 1.動画 | - | 2-2-2-2-1-0 | 29 |
| | | | | 2.静止画 | 100mm | 2-2-2-2-2-1 | 30 |
| | | 200mm | | | 2-2-2-2-2-2 | 31 | |
| | | 300mm | 2-2-2-2-2-3 | 32 | | | |

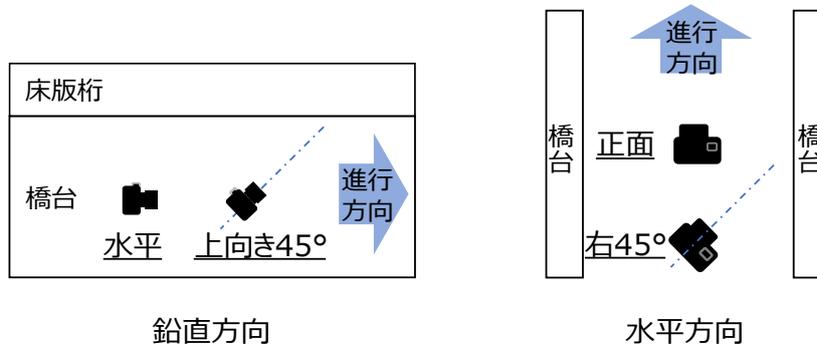


図 20 カメラ設置方向

3D化したい対象物に対してカメラが正対しない、かつ、広角撮影の場合、無限遠の範囲が出てくるので、画角全てをラップ率算出の対象とするのは望ましくないため、カメラ中心から右側の画角範囲をラップ率対象範囲と定義し、静止画撮影ピッチ算出に用いている（図 21 参照）。

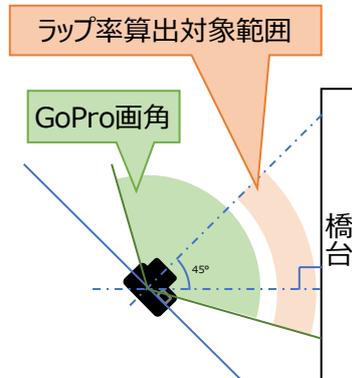


図 21 SfM 用写真ラップ率対象範囲の考え方

写真ラップ率の基準値は、SfM 用素材として理想とされている「90%」と、航空測量で一つの指標とされている「60%」とを基本に、中間の「75%」を追加し、3 パターンで検証することとしている（図 22 参照）。

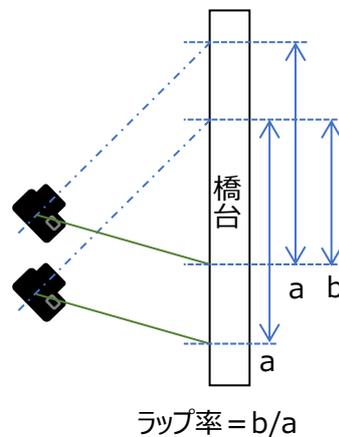


図 22 静止画撮影ピッチの決定



図 23 実験の様子

(4) 実験結果及び考察

定例会議で議論したチャンピオンデータの取得を目指し、より優位な条件のケースを実施するため、実施計画策定時には無かったケースとして、次のケースを追加／変更実施している。

1) LiDAR の検証

- 目標物の板をコンパネ 2 枚で隙間がある状態から、全面を覆う形式に変更
- 標定点（白線の設置）設置ケースを追加
- LiDAR 設置角度 40° のケースも板を設置したケースを追加実施
- 当初予定 9 ケースから 19 ケースを実施

2) カメラの検証

- 標定点（測量用アルミスタッフ、リボンロッド）設置ケースを追加
- 当初予定 16 ケースから 32 ケースを実施

LiDAR 計測において、ファイル管理の観点から、往復走行に対して片道毎にファイルを分割して作業していた。しかし、後工程においてファイル分割した状態では往復データの検証ができないことがわかった。このため、次回の検証では、往復を一連のデータとして取得する計画としている。

以下に実際に実施したケースの一覧表を示す。

表 5 LiDAR に関する検証一覧

| ケースNo | 角度 | 起点板 | 終点板 | 標定点 |
|-----------------|-----|---------------|---------------|-----|
| 1-1-1 | 40° | - | - | なし |
| 1-1-1-Line | 40° | - | - | 白線 |
| 1-1-1-Line-wall | 40° | - | ● (0.0m) | 白線 |
| 1-2-1 | 0° | - | - | なし |
| 1-2-1-Line | 0° | - | - | 白線 |
| 1-3-1 | 15° | - | - | なし |
| 1-3-1-Line | 15° | - | - | 白線 |
| 1-2-2 | 0° | - | ● (0.8m以上) | なし |
| 1-2-2-Line | 0° | - | ● (0.8m以上) | 白線 |
| 1-3-2 | 15° | - | ● (0.8m以上) | なし |
| 1-3-2-Line | 15° | - | ● (0.8m以上) | 白線 |
| 1-2-3 | 0° | ● | ● (0.0m) | なし |
| 1-2-3-Line | 0° | ● | ● (0.0m) | 白線 |
| 1-3-3 | 15° | ● | ● (0.0m) | なし |
| 1-3-3-Line | 15° | ● | ● (0.0m) | 白線 |
| 1-2-4 | 0° | ● (3.2m以上) | ● (3.2m以上) | なし |
| 1-2-4-Line | 0° | ● (3.2m以上) | ● (3.2m以上) | 白線 |
| 1-3-4 | 15° | ● (2.1m以上) | ● (2.1m以上) | なし |
| 1-3-4-Line | 15° | ● (2.1m以上) | ● (2.1m以上) | 白線 |

表 6 カメラに関する検証一覧（実施）

| ケースNo | 機種 | 鉛直 | 水平 | 動画 | 静止画 | 標定点 |
|---|-------------|--------|------|----|-----|------|
| 2-1-1-1-1-0 | GH5S | 水平 | 正面 | ● | - | なし |
| 2-1-1-1-1-0 | GH5S | 水平 | 正面 | ● | - | スタッフ |
| 2-1-1-1-2-1 2-1-1-1-2-3 2-1-1-1-2-5 | GH5S | 水平 | 正面 | - | ● | なし |
| 2-1-1-1-2-1 2-1-1-1-2-3 2-1-1-1-2-5 | GH5S | 水平 | 正面 | - | ● | スタッフ |
| 2-1-1-2-1-0 | GH5S | 水平 | 右45° | ● | - | なし |
| 2-1-1-2-1-0 | GH5S | 水平 | 右45° | ● | - | スタッフ |
| 2-1-1-2-2-1 2-1-1-2-2-3 2-1-1-2-2-5 | GH5S | 水平 | 右45° | - | ● | なし |
| 2-1-1-2-2-1 2-1-1-2-2-3 2-1-1-2-2-5 | GH5S | 水平 | 右45° | - | ● | スタッフ |
| 2-1-2-1-1-0 | GH5S | 上向き45° | 正面 | ● | - | なし |
| 2-1-2-1-1-0 | GH5S | 上向き45° | 正面 | ● | - | スタッフ |
| 2-1-2-1-2-1 2-1-2-1-2-3 2-1-2-1-2-5 | GH5S | 上向き45° | 正面 | - | ● | なし |
| 2-1-2-1-2-1 2-1-2-1-2-3 2-1-2-1-2-5 | GH5S | 上向き45° | 正面 | - | ● | スタッフ |
| 2-1-2-2-1-0 | GH5S | 上向き45° | 右45° | ● | - | なし |
| 2-1-2-2-1-0 | GH5S | 上向き45° | 右45° | ● | - | スタッフ |
| 2-1-2-2-2-1 2-1-2-2-2-3 2-1-2-2-2-5 | GH5S | 上向き45° | 右45° | - | ● | なし |
| 2-1-2-2-2-1 2-1-2-2-2-3 2-1-2-2-2-5 | GH5S | 上向き45° | 右45° | - | ● | スタッフ |
| 2-2-1-1-1-0 | GoPro Hero7 | 水平 | 正面 | ● | - | なし |
| 2-2-1-1-1-0 | GoPro Hero7 | 水平 | 正面 | ● | - | スタッフ |
| 2-2-1-1-2-1 2-2-1-1-2-3 2-2-1-1-2-5 | GoPro Hero7 | 水平 | 正面 | - | ● | なし |
| 2-2-1-1-2-1 2-2-1-1-2-3 2-2-1-1-2-5 | GoPro Hero7 | 水平 | 正面 | - | ● | スタッフ |
| 2-2-1-2-1-0 | GoPro Hero7 | 水平 | 右45° | ● | - | なし |
| 2-2-1-2-1-0 | GoPro Hero7 | 水平 | 右45° | ● | - | スタッフ |
| 2-2-1-2-2-1 2-2-1-2-2-3 2-2-1-2-2-5 | GoPro Hero7 | 水平 | 右45° | - | ● | なし |
| 2-2-1-2-2-1 2-2-1-2-2-3 2-2-1-2-2-5 | GoPro Hero7 | 水平 | 右45° | - | ● | スタッフ |
| 2-2-2-1-1-0 | GoPro Hero7 | 上向き45° | 正面 | ● | - | なし |
| 2-2-2-1-1-0 | GoPro Hero7 | 上向き45° | 正面 | ● | - | スタッフ |
| 2-2-2-1-2-1 2-2-2-1-2-3 2-2-2-1-2-5 | GoPro Hero7 | 上向き45° | 正面 | - | ● | なし |
| 2-2-2-1-2-1 2-2-2-1-2-3 2-2-2-1-2-5 | GoPro Hero7 | 上向き45° | 正面 | - | ● | スタッフ |
| 2-2-2-2-1-0 | GoPro Hero7 | 上向き45° | 右45° | ● | - | なし |
| 2-2-2-2-1-0 | GoPro Hero7 | 上向き45° | 右45° | ● | - | スタッフ |
| 2-2-2-2-2-1 2-2-2-2-2-3 2-2-2-2-2-5 | GoPro Hero7 | 上向き45° | 右45° | - | ● | なし |
| 2-2-2-2-2-1 2-2-2-2-2-3 2-2-2-2-2-5 | GoPro Hero7 | 上向き45° | 右45° | - | ● | スタッフ |

3.2.6. 実証実験（第2回 2019年1月）

第1回目の実証実験の結果を受け、見出した改善点などを検証するため、次のことに着眼して再度実証実験を実施している。

- * カテゴリー1：障害物のある状況において伝送性能を検証する。
- * カテゴリー2：第1回実証実験で得られた結果をもとに、LiDAR および SfM 処理用の画像データ取得の際、搭載方法、撮影方法等の条件を変える。それらの条件を変えて取得したデータで、後処理への影響を判断する。
- * カテゴリー4：地上走行型ロボットで取得した画像データを機械学習（AI）のためのデータとして取得する。また、現地でひびわれ幅を計測し、画像から確認出来る最小幅を確認する。
- * 全体：第1回実証実験の分析結果をふまえて異なる環境下で、同様の傾向がみられるかを検証する。また、点検作業全体工程の検証として、作業時間を確認する。

(1) 実験機器

本実験で用いた機器を下表に示す。

表 7 実験機器

| No | 機材 | 備考 |
|----|-------------------|------------------------|
| 1 | 地上走行型ロボット 本体 | |
| 2 | 地上走行型ロボット用送信機 | |
| 3 | Li-ion バッテリー | ロボット本体、映像伝送装置で使用 |
| 4 | GoPro hero7 | |
| 5 | GoPro hero7 バッテリー | |
| 6 | LiDAR | Velodyne VLP-16 Hi-Res |
| 7 | バッテリー | 電力丸 LiDAR に使用 |
| 8 | ノートパソコン | LiDAR コントロール用 |
| 9 | LAN ケーブル | LiDAR/PC 接続 |
| 10 | デジタルカメラ | 作業記録用 |
| 11 | 分度器 | |
| 12 | パネル | 計測目標用 |
| 13 | 工事看板 | 計測目標パネル支持用 |
| 14 | 測量用アルミスタッフ | 計測目標用 |
| 15 | 地上型レーザースキャナー | FARO Focus S350 |

(2) 実施場所

第1回実証実験に対する改善項目を検証するため、実施場所は第1回と同様の橋梁にて実施することになっている。また、他の現場に対する適用性を検証するため、以下の他2橋を新たに選定している。

なお、以下の本文では、第1回実証実験で実施した橋梁を「橋梁0」、他2橋を「橋梁1」、「橋梁2」と記載する。

- * 橋梁1：橋長 2.20m、幅員 4.00m、桁下 0.70m、RC床版桁橋（図 17 参照）
- * 橋梁2：橋長 5.35m、幅員 1.80m、水路内空断面 0.85×0.85m、内空延長 13.00m、コンクリート箱桁橋（水路橋）



図 24 実験場所：橋梁 2

(3) 実施内容

1) 全体

- 地上走行型ロボットに LiDAR、カメラを搭載
- 検討したパラメータに応じて、資材を現地に設置
- 走行状態で LiDAR 計測を実施
- 走行状態でカメラ撮影
- 地上型レーザーキャナーで全体計測

2) カテゴリー 1

第1回実証実験に対する改善点の効果を確認する。

- ホイール固定ボルトの変更
- ステアリングサーボの変更
- LiDAR、カメラの固定方法の変更
- カメラ設置個数の変更

3) カテゴリー 2 (LiDAR)

- 第1回実証実験に対する、改善点（目標物の種類、設置方法の変更）の効果を確認する。

- 条件の異なる橋梁で検証する。

以上を踏まえ、LiDARに関する検証として、LiDAR 搭載角度、目標物の設置状況、橋梁をパラメータとして 16 ケースを計測する（表 8、図 25、図 26 参照）。

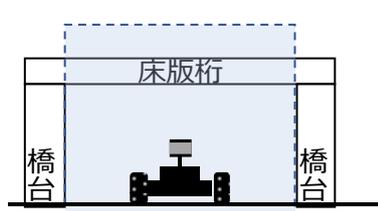
表 8 LiDAR に関する検証一覧（計画時）

| No. | LiDAR角度 | 正面の目標物設置 | | |
|-----|-----------|------------|----------------|------------------|
| | | 側面からの位置 | 幅 | |
| 通し | 1:LiDAR | 1:水平 2:10° | 0:無し 1:接触 2:離隔 | 0:無し 1:大 2:中 3:小 |
| 1 | 0-1-1-0-0 | 水平 | 無し | 無し |
| 2 | 0-1-1-1-1 | 水平 | 接触 | 大 |
| 3 | 0-1-1-1-2 | 水平 | 接触 | 中(人間) |
| 4 | 0-1-1-1-3 | 水平 | 接触 | 小(スタッフ) |
| 5 | 0-1-1-2-1 | 水平 | 離隔1m | 大 |
| 6 | 0-1-1-2-2 | 水平 | 離隔1m | 中(人間) |
| 7 | 0-1-1-2-3 | 水平 | 離隔1m | 小(スタッフ) |
| 8 | 0-1-2-0-0 | 10° | 無し | 無し |
| 9 | 0-1-2-1-1 | 10° | 接触 | 大 |
| 10 | 0-1-2-1-2 | 10° | 接触 | 中(人間) |
| 11 | 0-1-2-1-3 | 10° | 接触 | 小(スタッフ) |
| 12 | 0-1-2-2-1 | 10° | 離隔1m | 大 |
| 13 | 0-1-2-2-2 | 10° | 離隔1m | 中(人間) |
| 14 | 0-1-2-2-3 | 10° | 離隔1m | 小(スタッフ) |

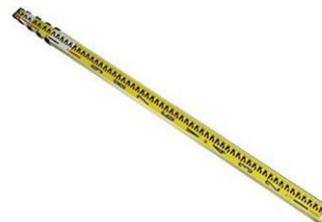
橋梁 0

| No. | LiDAR角度 | 正面の目標物設置 | | |
|-----|-----------|------------|----------------|------------------|
| | | 側面からの位置 | 幅 | |
| 通し | 1:LiDAR | 1:水平 2:10° | 0:無し 1:接触 2:離隔 | 0:無し 1:大 2:中 3:小 |
| 20 | 1-1-1-0-0 | 水平 | 無し | 無し |

橋梁 1、2

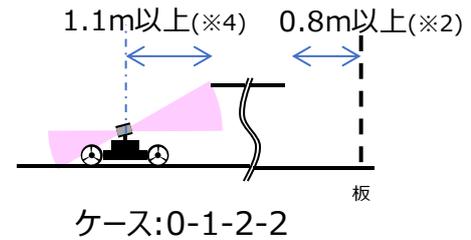
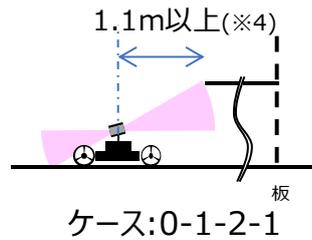
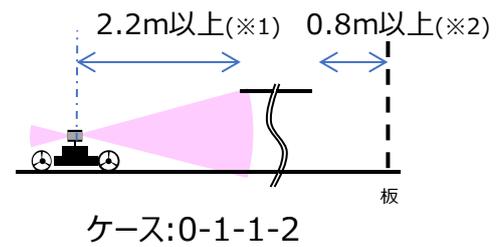
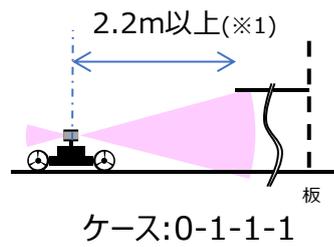


板の設置



スタッフ（測量用アルミスタッフ）

図 25 LiDAR/目標物イメージ



板設置状況



板設置状況

図 26 ケース別の LiDAR/目標物設置イメージ

4) カテゴリー 2 (カメラ)

- 第 1 回実証実験に対する改善点 (カメラ設定、カメラ設置方向) の効果を確認する。
- 条件の異なる橋梁で検証する。
- カメラの増設: 第 1 回実証実験の条件では、SfM の観点ではカメラは正面 1 台のみで十分である可能性が高いが、部分的にデータが欠損した場合は側面に向けた撮影が必要になると考えられる。また、損傷記録の観点では、損傷に対して正対した撮影が望ましい。このような場合、カメラを付け替えて再計測する必要がある。そこで、同時に側面も撮影する方法で検証する。

以上を踏まえ、カメラに関する検証として、レンズモード、カメラ搭載角度、橋梁および照明をパラメータとして 20 ケースを計測する計画としている。

表 9 カメラに関する検証一覧（当初予定）

橋梁 0

| No. | | レンズモード | 設置方向 | 撮影方法 |
|-----|-----------|-----------|---------|------------|
| 通し | 2:カメラ | 1:魚眼 2:広角 | 1:横 2:縦 | 1:動画 2:静止画 |
| 15 | 0-2-1-1-1 | 魚眼 | 横 | 動画 |
| 16 | 0-2-1-2-1 | 魚眼 | 縦 | 動画 |
| 17 | 0-2-2-1-1 | 広角 | 横 | 動画 |
| 18 | 0-2-2-1-2 | 広角 | 横 | 静止画 |
| 19 | 0-2-2-2-1 | 広角 | 縦 | 動画 |

橋梁 1、2※

| No. | | レンズモード | 設置方向 | 照明 | 撮影方法 |
|-----|-------------|-----------|---------|-----------|------------|
| 通し | 2:カメラ | 1:魚眼 2:広角 | 1:横 2:縦 | 1:無し 2:有り | 1:動画 2:静止画 |
| 21 | 1-2-1-1-1-1 | 魚眼 | 横 | 無し | 動画 |
| 22 | 1-2-1-1-2-1 | 魚眼 | 横 | 有り | 動画 |
| 23 | 1-2-1-2-1-1 | 魚眼 | 縦 | 無し | 動画 |
| 24 | 1-2-1-2-2-1 | 魚眼 | 縦 | 有り | 動画 |
| 25 | 1-2-2-1-1-1 | 広角 | 横 | 無し | 動画 |
| 26 | 1-2-2-1-1-2 | 広角 | 横 | 無し | 静止画 |
| 27 | 1-2-2-1-2-1 | 広角 | 横 | 有り | 動画 |
| 28 | 1-2-2-1-2-2 | 広角 | 横 | 有り | 静止画 |
| 29 | 1-2-2-2-1-1 | 広角 | 縦 | 無し | 動画 |
| 30 | 1-2-2-2-2-1 | 広角 | 縦 | 有り | 動画 |

※橋梁 1 は桁下が比較的明るい環境のため、照明有りのケースは実施しない

(4) 実験結果及び考察

1) LiDAR の検証

- * 実験当日は風が強く、LiDAR の検証で予定していた壁の設置 4 ケースは固定が困難な状況だったため実施できなかった。
- * 橋梁 2 にて、当初予定のケースではデータの取得が難しい事が予想されたため、目標物としてヒトを配置するケースを追加で実施している。
- * 当初予定 16 ケースから、13 ケースを実施している。

2) カメラの検証

- * 当初の予定どおり 20 ケースを実施している。
- * 以下に実際に実施したケースの一覧を示す。

表 10 LiDAR に関する検証一覧（実施）

| 橋梁 | ケースNo. | LiDAR角度 | 正面の目標物設置 | |
|---------------------|-----------|---------|------------|---------------------------------|
| | | | 側面からの位置 | 幅 |
| | | | 1:水平 2:10° | 0:無し 1:接触 2:離隔 0:無し 1:大 2:中 3:小 |
| 橋梁0 (前回実験と同様の橋梁) | 0-1-1-0-0 | 水平 | 無し | 無し |
| | 0-1-1-1-2 | 水平 | 接触 | 中(人間) |
| | 0-1-1-1-3 | 水平 | 接触 | 小(スタッフ) |
| | 0-1-1-2-2 | 水平 | 離隔1m | 中(人間) |
| | 0-1-1-2-3 | 水平 | 離隔1m | 小(スタッフ) |
| | 0-1-2-0-0 | 10° | 無し | 無し |
| | 0-1-2-1-2 | 10° | 接触 | 中(人間) |
| | 0-1-2-1-3 | 10° | 接触 | 小(スタッフ) |
| | 0-1-2-2-2 | 10° | 離隔1m | 中(人間) |
| | 0-1-2-2-3 | 10° | 離隔1m | 小(スタッフ) |
| 橋梁1 (新規橋梁) | 1-1-1-0-0 | 水平 | 無し | 無し |
| 橋梁2 (新規橋梁) | 2-1-1-0-0 | 水平 | 無し | 無し |
| | 2-1-1-0-2 | 水平 | 無し | 中(人間) |

表 11 カメラに関する検証一覧（実施）

| 橋梁 | ケースNo. | レンズモード | 設置方向 | 照明 | 撮影方法 |
|-------------------|-------------|-----------|---------|-----------|------------|
| | | 1:魚眼 2:広角 | 1:横 2:縦 | 1:無し 2:有り | 1:動画 2:静止画 |
| 橋梁0 (前回と同様の橋梁) | 0-2-1-1-1 | 魚眼 | 横 | - | 動画 |
| | 0-2-1-2-1 | 魚眼 | 縦 | - | 動画 |
| | 0-2-2-1-1 | 広角 | 横 | - | 動画 |
| | 0-2-2-1-2 | 広角 | 横 | - | 静止画 |
| | 0-2-2-2-1 | 広角 | 縦 | - | 動画 |
| 橋梁1 (新規橋梁) | 1-2-1-1-1-1 | 魚眼 | 横 | 無し | 動画 |
| | 1-2-1-2-1-1 | 魚眼 | 縦 | 無し | 動画 |
| | 1-2-2-1-1-1 | 広角 | 横 | 無し | 動画 |
| | 1-2-2-1-1-2 | 広角 | 横 | 無し | 静止画 |
| | 1-2-2-2-1-1 | 広角 | 縦 | 無し | 動画 |
| 橋梁2 (新規橋梁) | 2-2-1-1-1-1 | 魚眼 | 横 | 無し | 動画 |
| | 2-2-1-1-2-1 | 魚眼 | 横 | 有り | 動画 |
| | 2-2-1-2-1-1 | 魚眼 | 縦 | 無し | 動画 |
| | 2-2-1-2-2-1 | 魚眼 | 縦 | 有り | 動画 |
| | 2-2-2-1-1-1 | 広角 | 横 | 無し | 動画 |
| | 2-2-2-1-1-2 | 広角 | 横 | 無し | 静止画 |
| | 2-2-2-1-2-1 | 広角 | 横 | 有り | 動画 |
| | 2-2-2-1-2-2 | 広角 | 横 | 有り | 静止画 |
| | 2-2-2-2-1-1 | 広角 | 縦 | 無し | 動画 |
| | 2-2-2-2-2-1 | 広角 | 縦 | 有り | 動画 |

3.3. 自走式ロボットの要件定義

3.3.1. 要件

前節までの研究成果を基にして、自走式ロボットの要件を定義している。

- * 狭隘空間の点検作業：人が容易に進入できない様々な環境下（悪路等）にある狭隘空間において危険を冒さずに点検・現況把握が可能となる遠隔操作を実現する。
- * 操作用カメラおよび SfM 系ソフト用データ取得カメラ（以下、データ用カメラと言う）の搭載：遠隔操作に不可欠な操縦用カメラおよび SfM 系ソフトによる後処理に耐えうる分解能の画像取得が可能なデータ用カメラを搭載する。
- * 映像伝送装置の搭載：操縦用カメラおよびデータ用カメラの映像をモニターに伝送する無線機を搭載する。
- * 自己位置推定用 LiDAR の搭載：自走式ロボットの自己位置情報取得のための LiDAR を搭載する。

3.3.2. プロトタイプの開発による要件の妥当性評価

次頁に示す流れで要件に準じたプロトタイプを開発し、要件の妥当性を検証している。また、図中の改良依頼 1・2 の内容を次に示す。

- * 【第 1 回実証実験終了後の改良 1】
 - タイヤのボルトの「ゆるみ」から脱輪が起きた為、ボルトを強固な太めのインチボルトに変更
 - ステアリングサーボに「ゆるみ」を発見した為、ボルトが太めの別のステアリングサーボに変更

- * 【第二回実証実験終了後の改良 2】
 - 機材搭載位置の最終調整を行いカメラ取付治具の制作
 - 機材搭載位置の最終調整を行い LiDAR の取付治具の制作
 - 2 台の映像伝送装置を同時に各モニターにバインドを行うと通信障害が起き繋がらなかった為、装置メーカーに問い合わせた。回答として 2 台の装置を 1m 以上離れたところでバインドを行い定位置に設置してあげると、問題なく通信ができると回答を得たため、治具を固定式からマグネットを利用した脱着式に変更
 - ロボットセンター部のバッテリーケースの蓋をボルト留めで行っていたが容易に開閉可能なマグネットを利用した開閉式に変更

搭載機材は次のとおりである。

- * 操縦用カメラおよび SfM 用データ取得カメラ（以下、データ用カメラと言う）
 - 操縦用カメラ：解像度 12MP、広角レンズ 170° のアクションカメラを他搭載機材と干渉しない車体前方に搭載。
 - データ用カメラ：解像度 12MP、広角レンズ 170° のアクションカメラを効率的な撮影を行うために正面・右・左の 3 方向に各 1 台搭載。他搭載機材と干渉せず、更に搭載機材の中で最も重量がある為バランスを加味し車体中央に搭載。
- * 映像伝送装置 2 台の搭載：映像伝送装置を操縦用カメラおよびデータ用カメラの映像を送る
- * 自己位置推定用 LiDAR の搭載：重量によるバランスと他搭載機材と 360° 方向で干渉しない位置と言う事から最も高い位置である前項、データ用カメラ搭載位置の中心部に搭載。

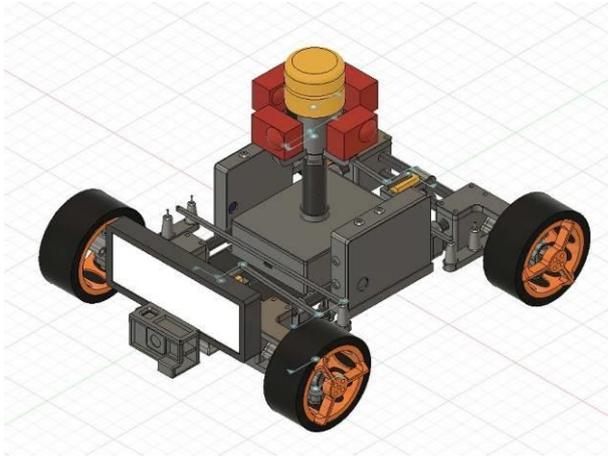


図 27 開発したロボット（プロトタイプ）

3.4. 要件の満足度の照査（総括）

本研究（本章の研究テーマ）の目的は、技術動向、開発・維持費用や汎用性の観点も踏まえて現実的に社会実装できる“小規模橋梁の桁下に進出し、後工程の点検作業に必要な十分なデータが取得できるロボットを開発できる要件”をまとめることである。

研究成果概要は前節に示したとおりであるが、要約すると次のことが言える。

- * 要件で対象としている橋梁は、全国の小規模橋梁の点検に利用できる汎用性を確保した規模である。
- * 対象損傷は、橋梁点検で扱われている内容になっている。
- * ロボットに搭載する計測機器（カメラ、レーザ）は、損傷抽出に必要な計測精度の確保に加えて、橋梁点検の市場でも導入可能な費用面にも配慮して選定されている。
- * 小規模橋梁のみにしか適用できない特殊な計測機器は開発せずに、既存の計測機器を組み合わせる、いわゆる複合技術の開発となっていることから、計測技術の動向を踏まえたカスタマイズが行いやすい汎用性も確保されている。
- * 要件の仮定、プロトタイプの開発、現場での実証実験による要件の評価を繰り返すトライアンドエラー方式によるアプローチを採用しており、実験回数を重ねる都度、内容や結果が高度化していることが見て取れる。その結果、改良を重ねたプロトタイプは一定の実用に供するレベルの成果となっている。
- * 国内外の様々な組織にて、橋梁点検技術の開発が進められているが、公知化されている資料（特許、技報や学术论文など）を見る限り、本研究成果より優位性のある先例は見あたらない。

以上の理由から、本研究の成果は、小規模橋梁の点検ロボットの今後の開発に貢献に大いに期待できると言える。

4. 三次元空間の形成アルゴリズムの照査

4.1. 三次元空間の形成アルゴリズムの考案

任意の点群データに対して、面や線の地物を抽出することを計画していたが、橋梁の構造は様々形状があるため、まずは対象の橋梁構造形式を限定し、その仮モデル（標準モデル）を定義して、そのモデルと点群データとをフィッティングする手法（下記 Step.1~4）を考案している。

- * Step.1 : SLAM と Photo Scan を用いた点群データの生成
 - 生成可否や課題を明らかにする
- * Step.2 : 点群からの平面とエッジの推定
- * Step.3 : 点群と仮モデルのフィッティング
 - 面とエッジの推定が困難な場合もあるので、Step.3 と Step.2 の手順を逆転させることも一案
 - 点群と仮モデルを大まかに位置合わせ（Step.3）した後、平面やエッジ位置に当たりをつけて推定（Step.2）するアプローチも検討する
- * Step.4 : 三次元モデルの生成
 - 現況点群から抽出した数値を用いて、仮モデルの寸法値を更新する

上記の形成アルゴリズムを基に以下の流れで洗練を図っていく基本方針としている。

(1) プレ実証実験

想定している実データで、早急に試行するため、プレ実証実験を実施しデータを取得する。詳細は、3.2.2 室内実験、3.2.3 予備実験を参照。

(2) 画像と点群データの計測

現場で取得したデータに対して有効的なアルゴリズム／プログラムを開発するため、実際の橋梁点検の現場にてデータを取得する。

なお、本研究テーマで開発するプログラムは、考案したアルゴリズムの有用性を検証するためのプロトタイプである。

(3) 標準形状の調査と仮モデルの作成

ロボットの運用が期待される小規模橋梁で主要な橋梁形式を調査すると共に、三次元モデル化アルゴリズムの構築にあたり、適切な橋梁形式を選定する。また、選定した橋梁形式に合わせた仮モデルを作成する。

(4) SLAM と PhotoScan を用いた点群データの作成

LiDAR で取得したデータを SLAM 処理（自己位置推定）するアルゴリズムの構築およびプログラムを作成する。また、写真を基データとして SfM 処理（点群データ作

成)を行う(使用ソフト PhotoScan)方法で、三次元モデルの基となる点群データの取得を試みる。

(5) 点群からの平面とエッジの推定

取得した点群データを基に、平面を生成し、その平面の交差からエッジを推定するアルゴリズムを構築およびプログラムを作成する。

(6) 点群と仮モデルのフィッティング

推定した位置を基準に、作成したモデルをスケールするアルゴリズムを構築およびプログラムを作成する。

(7) 三次元モデルの生成

生成された三次元形状データを CAD データとして出力するアルゴリズムを構築およびプログラムを作成する。

4.2. 有用性の検証

4.2.1. 実施概要

(1) LiDAR による自己位置情報取得

- * LiDAR 機種は、Velodyne 社製 VLP-16 Hi-Res を使用
- * SLAM は、LOAM という技術をベースに開発
- * 計測条件として、ロボット進行方向正面に測量用アルミスタッフを目印として設置すると、開発したプログラムにて橋台/床版の概形が取得できることを確認
- * 高さ約 0.85m×幅約 0.85m×奥行約 13m の空間は、形状が再現できない
- * 開発した SLAM は、自己位置推定(形状再現)をするには一定の条件を満たす必要があり、その条件は、対象としている橋梁では合致しない部分がある

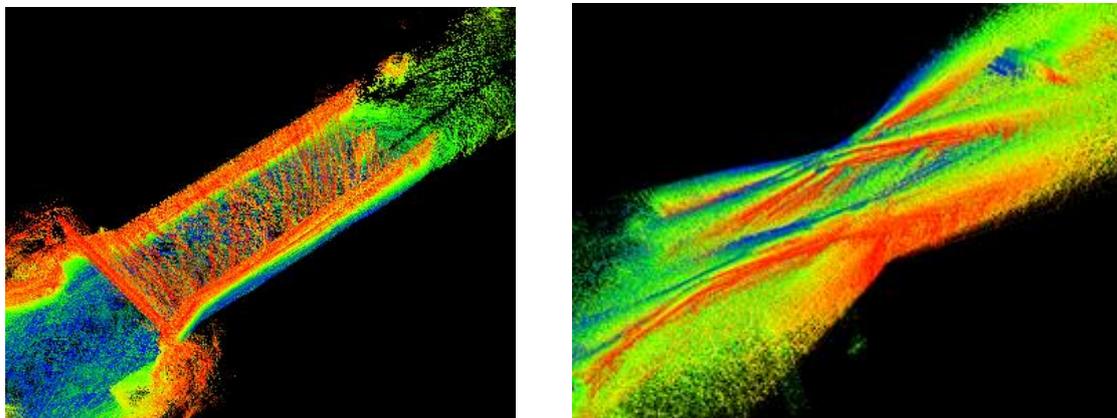


図 28 SLAM 処理結果

(2) PhotoScan を用いた点群データの生成

* 3 橋に対して試行した結果、何れの橋梁に対しても概形の再現ができた (図 29)。

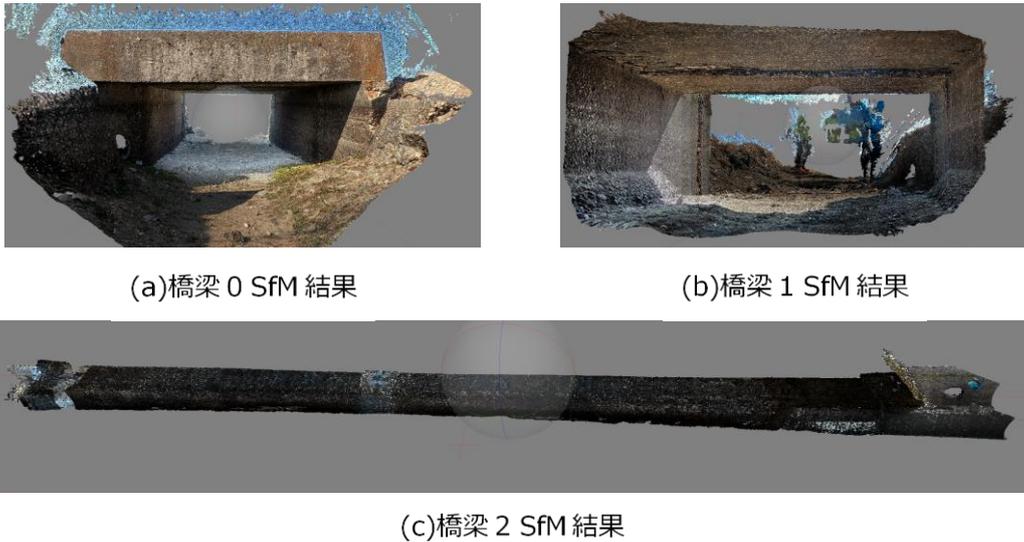


図 29 橋梁 2 の SfM 結果

- * ロボットによる撮影条件、データ処理条件の検証結果は以下のとおりである。
- 撮影機材：一眼レフカメラよりアクションカメラ (GoPro) の方がデータのマッチング率が高い。
 - 撮影方法：静止画と動画を比較すると、生成されたデータに特段の差は見られず、動画撮影の方が現場での作業性がよく、撮影密度の調整も可能であり、動画の方が望ましい。
 - カメラ設置向き：データ取得量は、縦向きよりも横向きの方が多い。
 - 撮影モード：広角 (フラット) より魚眼モードの方がデータの欠損が少ない。
 - 照明：薄暗い環境では、照明がある事でデータ品質が上がる。
 - 静止画切出し：生成データの精緻さ、点密度、処理時間のバランスを鑑みると、0.2 秒間隔が最適。

(3) 3D-CAD モデルの生成

* 開発したプログラムにて、三次元モデルを生成できた (図 30)。

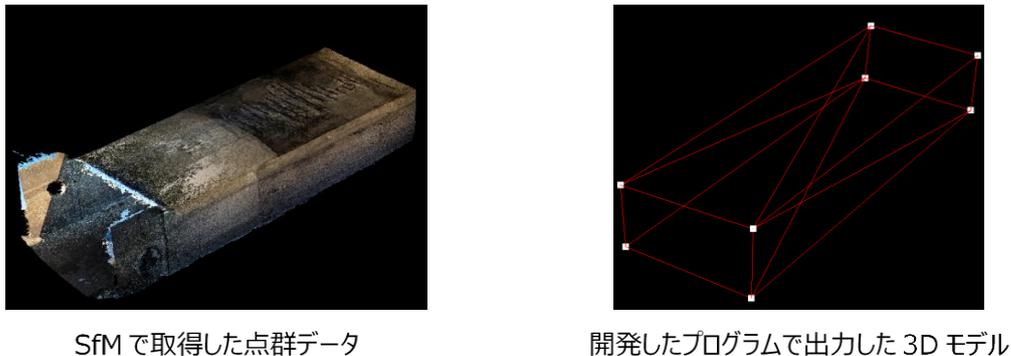


図 30 取得した点群データと生成した 3D モデル

* 構築したアルゴリズムは以下のとおりである (図 31)。

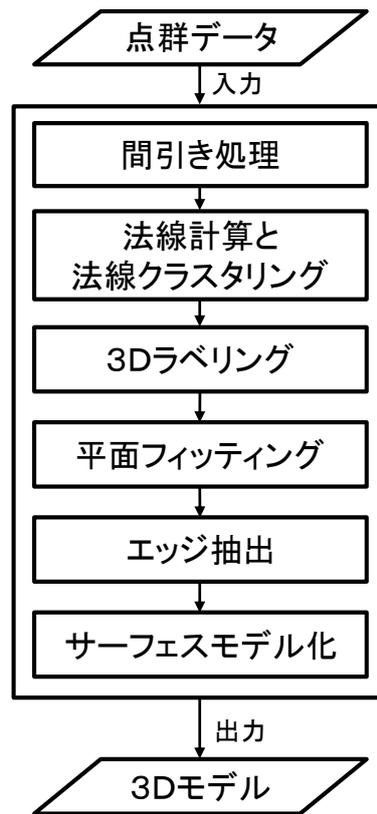


図 31 点群データからの三次元モデル生成アルゴリズム

4.2.2. 結果詳細

(1) LiDAR による自己位置情報取得

1) LiDAR の選定

流通量が多く標準的な Velodyne 社製 VLP-16 Hi-Res を選定している。

2) SLAM 処理アルゴリズムの選定

KITTI(SLAM 処理品質を競う評議会)にて上位ランクしている LOAM をベースとし、Velodyne の出力データに対応するようカスタマイズしている。

3) SLAM 処理アルゴリズムの改良

当初構築したアルゴリズムでは、計測対象が複数の層のように見える点群データになってしまっていた。そこで、自己位置推定の結果、補正した点群 P_t と $P_{(t+1)}$ に対して、隣接点の距離を最小化する剛体変換パラメータ (回転/平行の 6 自由度) を算出するよう改良し、データのズレが改善している (図 32)。

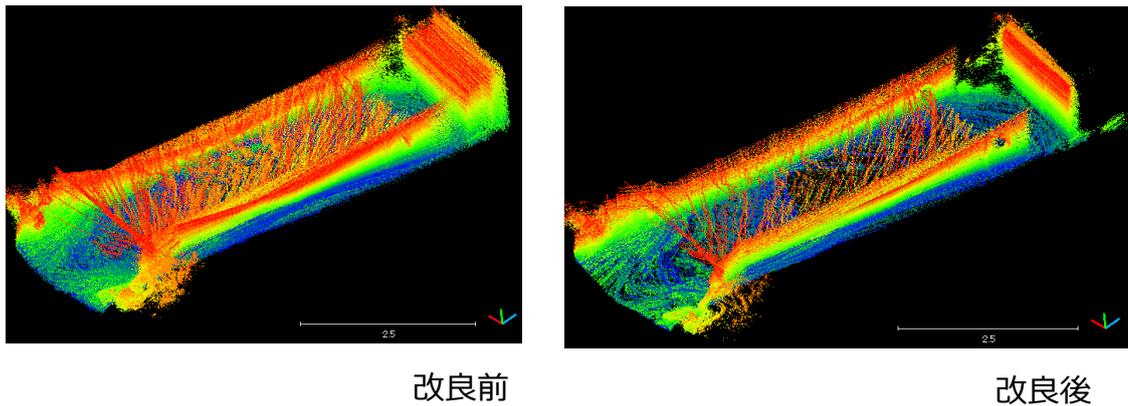


図 32 SLAM アルゴリズム改良結果

4) パラメータの設定

LiDAR が GPS を取得できない環境下で出力できるのは、フレーム毎に自己位置を基点とした相対座標値のみのため、形状再現を実現するには連続的に特徴形状を捉えている必要がある。本研究で対象とする構造物の形状だけでは“特徴形状”が不足する可能性もあるため、試行のパラメータは、LiDAR の設置角度、目標物の位置／種類を採用している。パラメータ毎の試行結果総評を下表に示す。

表 12 第 1 回実証実験結果総評 (LiDAR)

| パラメータ | 条件 | 結果 | 総評 |
|------------|-------|----|--|
| LiDAR 設置角度 | 水平 | ○ | 40° の角度を付ける事で床版のデータ取得は向上するが、全体の形状再現性が悪化する。 |
| | 40° | × | |
| 目標物 | なし | △ | 橋梁自体に特徴形状が多くあれば、目標物なしでも形状再現可能だが、特徴が少ない橋梁の場合は橋梁側面に壁を設置する事で形状再現性が向上する。(河床の白線は効果不明) |
| | 側面に壁 | ○ | |
| | 河床に白線 | △ | |

表 13 第 2 回実証実験結果総評 (LiDAR)

| パラメータ | 条件 | 結果 | 総評 |
|------------|--------------------------------|----|---|
| LiDAR 設置角度 | 水平 | ○ | 角度を付ける事で床版のデータ取得は向上するが、全体の形状再現性が悪化する。 |
| | 10° | × | |
| 目標物 | 無し | × | 目標物はあった方が良い。目標物は平面/直線的な形状の物を、橋梁側面に近づけて設置する事で形状再現性が向上する。 |
| | 側面に人間 | △ | |
| | 側面にスタッフ | ○ | |
| | 側面遠方 | × | |
| 計測対象形状 | 高さ約 80cm 幅約 2m 奥行約 5m | ○ | 奥行が 13m になると、計測開始時に進行方向の目標物の特徴形状の認識が難しく、形状再現できる可能性が低い。 |
| | 高さ約 85cm 幅約 85cm 奥行約 13m | × | |

5) 検証結果例

試行当初の計測点群データとして、LiDAR の設置角度が大き過ぎたため、局所的なデータしか取得ができず、形状再現ができないことを確認している (図 33)。また、データ検証として、LiDAR 取得後、SLAM 処理した点群と地上型レーザースキャナーで取得した点群を比較し、大きな差異が無いことを確認している (図 34)。

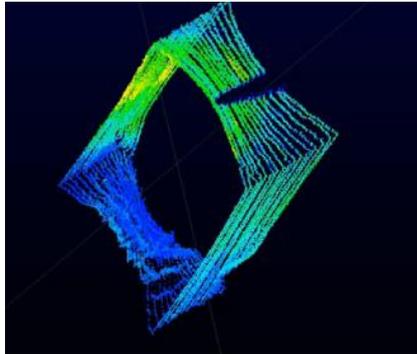
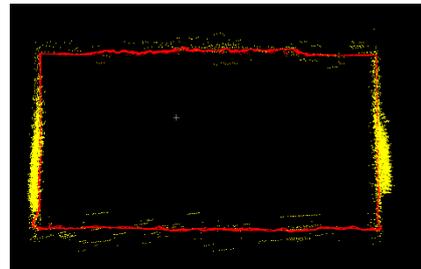


図 33 計測点群データ



赤：地上型レーザースキャナー
黄色：SLAM 処理点群

図 34 生成モデルデータの検証

(2) PhotoScan を用いた点群データの生成

1) カメラの選定

より高画質な画像を使用する事が理想であるため、一眼レフカメラでも上位機種に当たる Panasonic GH5S と、より広角な移動体からの撮影ができるアクションカメラの代表的機種である GoPro hero7 とを選定している。

2) パラメータの設定

SfM の特性上インプット画像には、明瞭な画質かつ常に色的特徴が映りこんでいることが求められ、撮影の条件としてカメラ向き／撮影間隔／照度などが適切な範囲に収まっている必要があるため、試行のパラメータは、カメラの機種、方向、撮影ピッチ、撮影モードとしている。また、現場での作業性（設定の変更等）を考慮すると、撮影方法は静止画より動画の方が簡潔で、撮影間隔の調整がデスクワークで可能になるメリットがある。一方、デメリットとして静止画への変換過程での画質劣化があるが、SfM の品質に及ぼす影響を検証するため、撮影方法もパラメータとしている（表 14 および表 15）。

表 14 第 1 回実証実験結果総評 (SfM)

| パラメータ | 条件 | 結果 | 総評 |
|-------|------------------------|----|--|
| カメラ機種 | 一眼レフカメラ (GH5S) | × | 標準レンズによる一眼レフカメラ画像では、桁下構造の形状が殆ど再現できず、アクションカメラによる広角画像の方が多くの情報を取得でき、SfM データの生成率が高い。 |
| | アクションカメラ (GoPro hero7) | ○ | |
| カメラ方向 | 正面 | ○ | 角度を振った撮影は、局部的に形状再現性が上がる所もあるが、全体形状の再現性が低くなってしまう。 |
| | 正面から右 45° | △ | |
| | 水平から上 45° | △ | |
| 撮影方法 | 静止画 | △ | 動画でも静止画と同等の形状再現が可能であり、作業性の良さと静止画切出し間隔の調整が可能な面で動画が運用に適している。 |
| | 動画 | ○ | |
| 色的特徴 | なし (現況のまま) | ○ | スタッフの有無では有意な差は見られない。 |
| | 追加 (スタッフ) | ○ | |

表 15 第 2 回実証実験総評 (SfM)

| パラメータ | 条件 | 結果 | 総評 |
|--------|----------------------------------|----|---|
| カメラ方向 | 横向き | ○ | 縦向き画像に対して、被写体が横長な場合、橋台（側面）のデータ取得量が低下する。 |
| | 縦向き | △ | |
| レンズモード | 魚眼 | ○ | 魚眼無効は視野角が狭くなり、データ取得量が低下する。 |
| | 魚眼無効 | △ | |
| 照明 | 無し | △ | 薄暗い（被写体の特徴を捉える事が困難な明るさ）環境では、照明を利用することで、データ取得量が増加する。 |
| | 有り | ○ | |
| 計測対象形状 | 高さ約 0.8m 幅約 2m 奥行約 5m | ○ | 奥行が長いために、異なる場所であるにもかかわらず色的特徴を誤認識する可能性が高まる。（走査距離の延長自体は問題にならない） |
| | 高さ約 0.85m 幅約 0.85m 奥行約 13m | △ | |

3) 結果精度検証

ベンチマークとして、地上型レーザースキャナーで取得したデータと今回取得したデータとを照合分析している。図 35 に、橋梁 0 における床版部の照合分析結果を示す。凹凸の状況が似ており、損傷状況を把握するためには十分な精度で計測できていることを確認している。

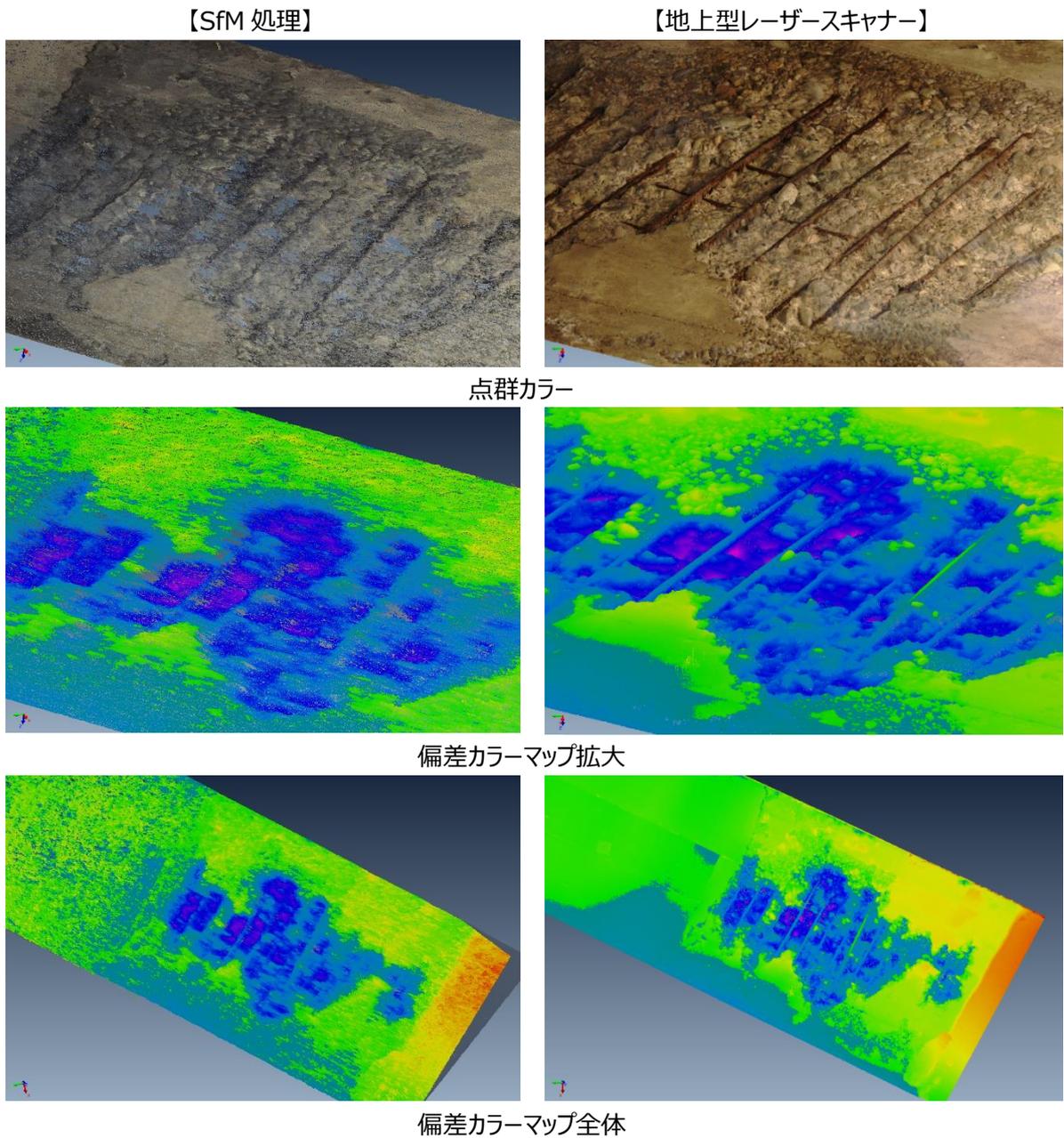


図 35 地上型レーザースキャナーと SfM の比較

4) 検証結果例

一眼レフカメラによるデータ取得として、橋梁桁下に入る前の形状は部分的に取得できているが、桁下構造部はほぼ形状が取得できていなかった（図 36）。



図 36 一眼レフカメラで取得したデータ

カメラ設置方向縦置きによる取得データ(GoPro)として、撮影方向に対して構造物が横長であるため、側面のデータ取得量が少なかった（図 37）。



図 37 カメラ縦置きで取得したデータ

薄暗い場所での照明効果として、薄暗い場所においては、色的特徴の識別が困難なためデータの抜ける箇所が見受けられた（図 38）。



図 38 薄暗い場所で取得したデータ

(3) 3D-CAD モデルの生成

1) アルゴリズムの考案

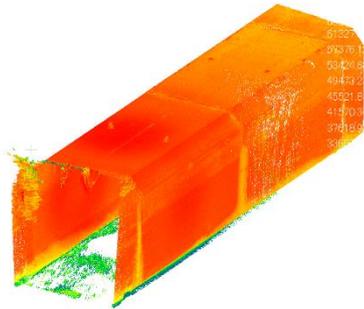
本研究で考案した三次元モデル生成手法の概要は下表のとおりである。

表 16 3D-CAD モデルの生成アルゴリズム

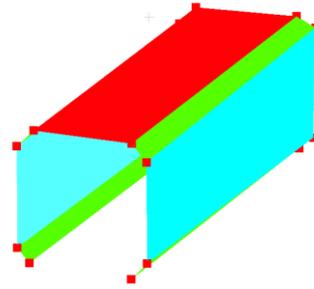
| 工程 | 処理概要 | 検討内容／処理内容 |
|-------------|-----------------------------|---|
| 1 点群間引き | SfM で取得した点群データを減少させる。 | 過剰な点密度は処理速度の低下を招くため、間引きを実施する事とした。Octree を採用する事で、間引き処理自体も高速化した。 |
| 2 法線クラスタリング | 結果生成される平面毎の基となる点群をグループ分けする。 | 対象物を構成する平面領域を推定するため、クラスタリングする事とした。特定の空間内の点から最小二乗法により平面を生成し、平面毎の法線ベクトルと Z 軸の成す角度から、K-means 法によるクラスタリングを行う。 |
| 3 3D ラベリング | モデル化対象外の点群データを除去する。 | モデル化対象の橋梁以外の点群データが存在すると、モデル化の精度が低下するため、モデル化対象外の点群を除去する事とした。空間八分木の全ての空間に対して、点群データを含む空間のみを残しつつ、連結可能なグリットをマージ（距離によるラベリング）し、特定ボリュームに達しないラベルを除去する。 |
| 4 平面フィッティング | ラベル毎にフィッティングした平面を生成する。 | フィッティングの手法として、最小二乗法を使用した。平面は、投影された点を内包する範囲に外形領域を設定する。 |
| 5 エッジ抽出 | サーフェスの頂点を生成する。 | 任意の平面とその他の平面の交線を確認し、交線が確認されれば、エッジとして境界を更新する。 |
| 6 サーフェスモデル化 | 生成された頂点からサーフェスを生成する。 | 各面を構成する頂点を対象に、ドロネー三角形分割を用い、TIN を生成する。TIN から所定の CAD 形式に変換、出力を行う。 |

2) プログラムの動作検証

アルゴリズムの有用性を確認するため、理想的な（計測データとして精度が高い）点群データを用いて試行し、想定どおりの三次元モデルが生成されることを確認している。なお、検証用の点群は FARO 社製地上型レーザースキャナー Focus S350 を使用している。



計測点群



生成された 3D モデル

図 39 検証用点群データによるプログラム動作検証結果

4.2.3. 考察

前項までの研究成果に基づいた以下のとおり考察している。

(1) LiDAR による自己位置情報取得

試行の結果、今回実施した橋梁の中では奥行きが長い（13m）橋梁は、形状再現ができない（自己推定が出来ない）結果になっているが、現行の技術レベルでは“LiDAR による”という条件ではソフト/ハードともに対策を講ずることが極めて難しい。

“LiDAR を使用した”条件の場合、カメラの併用などで形状再現の可能性は高まる。しかし、SfM（カメラ）単独で形状再現が可能な結果が出ているため、LiDAR を運用する必要があるのか、運用目的から再度整理する必要がある。

(2) PhotoScan を用いた点群データの生成

桁下約 70cm の橋梁の桁下構造を SfM により点群にて形状再現するための条件を整理し、目視にて概ね異常の見られない点群データを生成することができた。

現在、SfM で得られた橋梁の三次元形状を定量的に評価する手法は確立されていないため、今後は、評価手法の確立と、実運用に向けたロバスト性の確認として、各種複数のテスト処理を実施する必要がある。

(3) 3D-CAD モデルの生成

地上型レーザースキャナーで取得した、きれいな点群データを用いて、アルゴリズムの構築ができた。また、ロボットで取得した SfM データを用いた検証を行い、モデルが構築することができた。

現在、SfM で得られた橋梁の 3D 形状を定量的に評価する手法は確立されていないため、今後は、評価手法の確立と、実運用に向けたロバスト性の確認として、各種複数のテスト処理を実施する必要がある。

4.3. 要件の満足度の照査（総括）

本研究（本章の研究テーマ）の目的は、“ロボットで撮影した画像を使って三次元モデルの生成する要件”をまとめることである。研究成果概要は前節に示したとおりであるが、要約すると次のことが言える。

- * 要件で対象としている橋梁は、全国の小規模橋梁の点検に利用できる汎用性を確保した規模である（再掲）。
- * 小規模橋梁のみにしか適用できない特殊なプログラムは開発せずに、汎用ソフトウェアの具備する機能を駆使した処理手法を軸にして研究が遂行されており、さらに実用性を網羅的に検証している。
- * カメラ機種、撮影条件・方法、さらにデータ処理の諸条件の組合せ方によって、本研究の核である損傷状況を把握できる結果がケーススタディにより立証されている。
- * 換言すると、本研究の成果であるロボットで撮影した画像を使って三次元モデルの生成する要件が適切であり、かつ社会実装ができる技術であることを立証する成果を得ていると言える。
- * 国内外の様々な組織にて、橋梁点検技術の開発が進められているが、公知化されている資料（特許、技報や学術論文など）を見る限り、本研究成果より優位性のある先例は見あたらない。

以上の理由から、本研究の成果は、小規模橋梁の点検ロボットで計測された画像を用いた三次元モデルの生成手法の今後の開発に貢献に大いに期待できると言える。ただし、前節の考察でも述べられているとおり、ケーススタディによるサンプル数を充実させて定量的な数値（閾値）を設定し、橋梁点検等の実務に利用できる損傷状況を表現しているのかを評価する仕組みづくりが課題として挙げられる。

5. 三次元損傷図作成支援システムの照査

5.1. 三次元損傷図作成支援システムの要件定義

ロボット等で効率よく構造物の三次元モデルを生成する技術を確立した後、各種データを有効活用するための管理の支援策として「三次元損傷図作成支援システム」があげられることから、本研究では同システムの具備すべき要件を明らかにしている。

システムの機能要件を以下のように定義している。

表 17 三次元損傷図作成支援システムの機能要件

| No | 機能 | 概要 |
|----|------------------|---|
| 1 | 橋梁の新規登録 | 橋梁を新たに登録する。 |
| 2 | 橋梁の諸元データの閲覧 | 登録されている橋梁の諸元データを閲覧する。 |
| 3 | 橋梁の諸元データの編集 | 登録されている橋梁の諸元データを編集する。 |
| 4 | 橋梁の検索 | 登録されている橋梁を、決められた検索条件により、検索する。 |
| 5 | 橋梁の 3D モデルの取り込み | FBX 形式の橋梁の 3D モデルを登録。 |
| 6 | 橋梁の 3D モデルの表示・操作 | 取り込んだ橋梁の 3D モデルを表示し、拡大／縮小表示・視点移動の操作を行う。 |
| 7 | 損傷データの新規登録 | 橋梁の 3D モデルの特定箇所に、損傷データを登録する。 |
| 8 | 損傷データの閲覧 | 登録されている損傷データを閲覧する。 |
| 9 | 損傷データの編集 | 登録されている損傷データを編集する。 |

5.2. 有用性の検証

三次元損傷図作成支援システムの機能要件に準じたプロトタイプを開発し、有用性を検証している。データベースは、基本諸元データ、損傷箇所データ、点検履歴データ、損傷データ、三次元モデルデータの構成である。三次元モデルデータのファイル形式は、開発環境として選定した Unix で扱える 3D-CAD モデルファイル形式で、データサイズが軽量かつ色情報を持っているという観点で FBX 形式としている。

各機能を実装している画面やシステム操作の流れを以下に示す。

(1) システムの操作の流れ

システムの操作の流れを以下に示す。

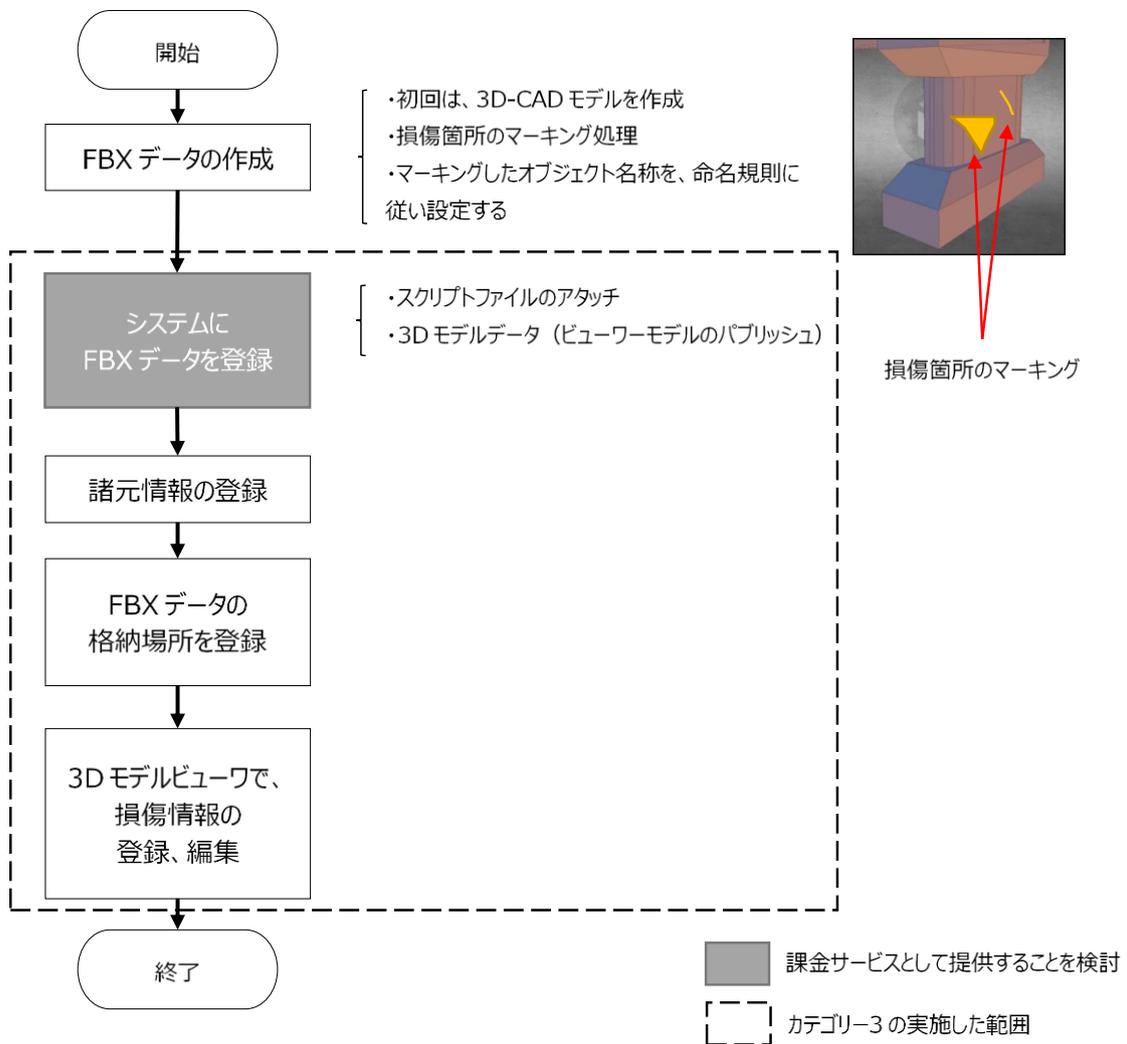


図 40 システムの操作の流れ

(2) 諸元情報の入力画面

橋梁の諸元情報は、例えば国土交通省が管理しているデータベースシステムでは、10 テーブル以上 100 項目以上と膨大な項目が登録されている。本研究では、それらから主要な必要最低限の項目に限定してデータベースを設計している（図 41 参照）。

| | | | | |
|----------|-------|-------------|------|------------------|
| 都道府県 (*) | 北海道 | 市区町村 (*) | 札幌市 | (*)必須項目 |
| 橋梁番号 | 1 | 径間数 | 1 | |
| 橋梁名称 (*) | サンプル橋 | 設置年度 | 1988 | 年 |
| 路線名称 | 国道〇号 | 上部工構造形式 | | |
| 橋長(m) | 20.00 | 3Dモデル格納フォルダ | | 参照 |
| 全幅員(m) | 6.00 | | | ◆3Dモデルが格納されていません |

写真: C:\Users\jts905005\Pictures\login_t 参照

写真を登録してください

登録 キャンセル

図 41 入力画面

(3) 現況写真の登録、変更入力

諸元情報と同じ画面で、橋梁の全景写真や側面写真を登録できる（図 42）。写真は 6 枚まで登録できる仕様とした。FBX データの登録も、同じ画面で指定する。

| | | | | |
|----------|-------|-------------|------|-------------------|
| 都道府県 (*) | 北海道 | 市区町村 (*) | 札幌市 | (*)必須項目 |
| 橋梁番号 | 1 | 径間数 | 1 | |
| 橋梁名称 (*) | サンプル橋 | 設置年度 | 1988 | 年 |
| 路線名称 | 国道〇号 | 上部工構造形式 | | |
| 橋長(m) | 20.00 | 3Dモデル格納フォルダ | | 参照 |
| 全幅員(m) | 6.00 | | | ◆3Dモデルが既に格納されています |

写真: C:\Users\jts905005\Pictures\login_t 参照

この写真を削除する

この橋梁を削除する

登録 キャンセル

図 42 登録画面

(4) 損傷情報の登録、変更入力

Unity で開発した三次元モデルビューアシステムで損傷情報を登録、変更する（図 43）。点検情報、損傷情報を登録するには、「損傷フォーカス」機能で情報を登録したい損傷箇所を画面中央に表示させる。損傷箇所をクリックすると画面左側に、その箇所に登録されている場合は、点検情報、損傷情報が表示される。新規の場合は、未入力の状態と同じ画面が表示される。情報を登録するには「編集」ボタンをクリックし、編集モードに変更する。点検情報登録画面で、必要項目、写真データ等を登録する。

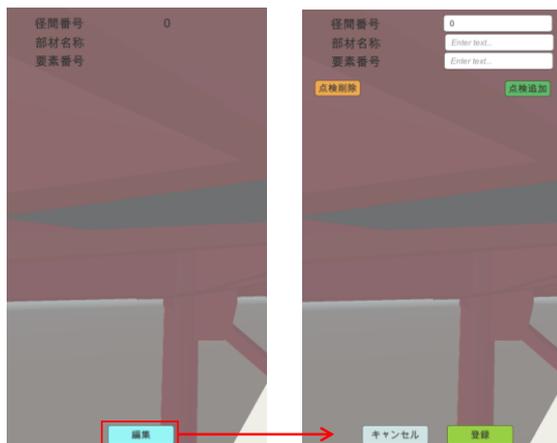


図 43 損傷情報の登録画面

(5) 諸元情報・損傷状況の閲覧

諸元情報の入力画面もしくは初期表示画面で諸元情報の一部の項目は確認する（図 44）。損傷箇所を三次元モデルビューア部でマウス操作や検索機能で表示させて、損傷マークをクリックして損傷状況を閲覧する。点検を複数回実施して、データが蓄積されると損傷データ確認画面の一番上の矢印ボタンで過去、現在の損傷状況を切り替えて表示させられるため、進行状況を写真や損傷程度で比較して確認ができる。

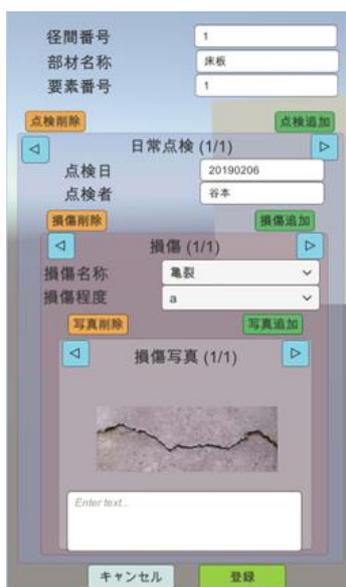


図 44 閲覧画面

5.2.2. 考察

三次元損傷図作成支援システムの要件定義、プロトタイプの開発による検証を経て得られた利用するユーザ（システム管理者、利用者、施設管理者）の課題を以下のように整理している。

- * システム管理者側の課題：Unity 開発環境を用いて、FBX データを関連付けする作業の自動化およびそれらの作業をサービスとして提供する場合の価格設定等を検討する必要がある。
- * 利用者（点検事業者）側の課題：点検業務を効率良く、確実にを行うためには、最終成果品となる点検調書の出力機能もしくは登録したデータの外部ファイルへの出力機能が必須になると考える。またロボットで取得したデータから損傷発生位置を何らかの仕組みで 3D モデルデータへ効率良く関連づける仕組み、機器の開発が望まれる。
- * 施設管理者側の課題：
<データベースの整備、運用から得られる機能>
 - インフラを長持ちさせるための情報共有のベースシステム：補修、補強、架け替えといった PDCA における措置に対して最適な時期を通知する機能や補修を捉えた場合、最適な対症療法（補修工法）の選定と最適な予防保全対策を支援する機能
 - リスクコミュニケーションとしての活用：最適な補修時期の通知、危険箇所のアラート通知機能<3D モデルの活用>
 - 最適な補修・補強工事計画立案の支援機能
 - 地域おこしへの活用（情報化インフラツールズム）

5.3. 要件の満足度の照査（総括）

本研究（本章の研究テーマ）の目的は、小規模橋梁の点検結果を有効活用するための支援策“三次元損傷図作成支援システムの要件”をまとめることである。

研究成果概要は前節に示したとおりであるが、要約すると次のことが言える。

- * ロボットで撮影した画像を使って生成した三次元モデルをはじめ、小規模橋梁の維持管理で扱う各種データを扱える機能を定義している。
- * 現実的に社会実装ができるように、必要最低限の要件の定義としている。
- * 特定企業のプラットフォームに依存した稼働環境を必要としない要件となっており、ファイルフォーマットの永続性も概ね確保されている。
- * 要件の仮定、プロトタイプの開発による検証を経た結果、プロトタイプは一定の実用に供するレベルの成果となっている。

以上の理由から、本研究の成果は、小規模橋梁の点検結果を有効活用するための支援策となる三次元損傷図作成支援システムの今後の開発に貢献に大いに期待できると言える。

ただし、道路管理システム（台帳システム）を導入している地方公共団体も多くあることから、システムの乱立を回避する配慮も必要となる。このため、既存の道路管理システムとの相互運用性を高めるための方策を検討していくことが今後の課題として残る。

6. 人工知能を用いた損傷判定の有用性の検証結果の照査

6.1. 損傷の選定

ロボットが取得した大量の画像から人工知能を用いて損傷箇所を自動抽出するための学習データ作成方法および実運用に向けた要件を整理している。国土交通省が定めた定期点検要領（平成 26 年直轄版）では、橋梁に発生する 26 種類の損傷を定義している。今回対象とする小規模橋梁では、ひびわれ、剥離・鉄筋露出という損傷が発生する割合が高い。ひびわれの検出は、多方面で研究が盛んに行われており、また狭隘部に進入したロボットで撮影した画像データで判別するには難易度が高い。これらの理由より本研究では、剥離・鉄筋露出（図 45）およびひびわれを対象に検証している。



出展：「国総研資料 第 196 号」2.2 コンクリート部材の損傷

図 45 点検要領の剥離・鉄筋露出

6.2. 有用性の検証

6.2.1. 学習環境の構築

本研究は、損傷など識別対象の箇所をピクセル単位で色分けして表示できる可能性を有する Mask R-CNN を試行対象のアルゴリズムとして採用し、次の実行環境を構築している。

- * OS : Windows 10 Pro 64bit
- * CPU : インテル Corei7-8700 (6 コア/12 スレッド、 3.20GHz)
- * メモリ : 64GB
- * GPU : Nvidia GeForceGTX1080Ti/11GB
- * ソフトウェア : CUDA tool kit 9.0、cuDNN 7.0.5、Tensor Flow 1.9.0

学習データの作成には、VGG Image Annotator (VIA; Visual Geometry Group、Department of Engineering Science、University of Oxford)を利用している。Web システムケーションとなっているこのツールでは、ローカルの画像群をアップロードしてツール内で画像一枚ずつにマウス操作により対象部位 (ROI) を基本的な図形で囲み、その属性名 (識別対象のカテゴリ名) を指定することでアノテーションを付与することができる (図 46、図 47)。アノテーションを付与する操作を終えたら、すべての画像の

ファイル名称、画像の属性名、ROIの形状情報(閉領域の輪郭をなす点の画像座標集合)、各ROIに付与されたカテゴリー名を、リストまたは辞書形式で読み取れるように、すべての画像のアノテーション情報を1つのjson形式のファイルにとして出力している。



図 46 ひびわれの学習データ



図 47 剥落の学習データ

6.2.2. 識別結果

損傷のある画像の識別テストを実施した結果例として検出された損傷箇所と損傷の 카테고리一次図に示す。それぞれ、入力画像と予め付与していた損傷のラベルを併せて提示している。



図 48 入力画像と正解ラベル（ひびわれ）（左列）と識別結果（剥落）（右）

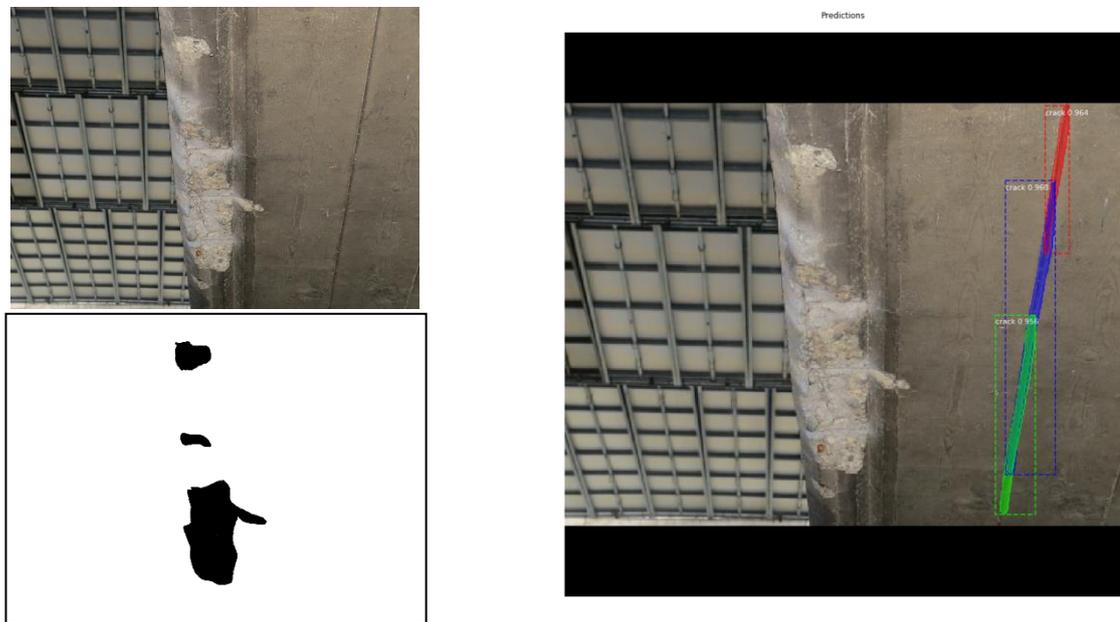


図 49 入力画像と正解ラベル（剥落）（左列）と識別結果（ひびわれ）（右）

6.2.3. 考察

(1) 識別結果

今回の識別結果を次のように整理している。

- ひびわれと剥落の誤認識
- 剥落箇所は発見できても網羅していない
- 剥落箇所が検出されず、かわりにひびわれが誤検出
- 同一のひびわれが分割されて個別に認識
- 範囲の違い

(2) 教師データ画像、ラベル付け、アノテーションデータの作成について

本研究では、ひびわれと剥離の損傷について、教師データを用意するにあたり、専門性の高い作業により作成された教師データを確認しつつ、手動でアノテーションの付与作業を行っている。その際に、情報の 2 種類のばらつき方が存在すると考える。

1 点目は、専門家により作成された画像中の ROI となるラベル領域と、多角形で表現しなおした閉曲線との差異である。特に、選択すべき領域の輪郭が目視でも曖昧にしか分からない画像も多く、また 1 ピクセル単位のひびわれの幅や小さな剥離領域では、中空の閉領域として多角形表現することが難しい場合も多く、広めの領域を囲んでラベル領域の形状としている。また、専門家によるラベル付けにおいても、そのラベルの範囲が画像によって曖昧であったり、同様の損傷が同一画像に含まれていてもラベルの付与が網羅的でなかったりする場合があった。

また、同一の損傷対象を別角度で撮影した複数の画像で、ラベルの箇所や形状が異なるケースもあった。したがって、教師データにおける情報の基準やアノテーションの品質を統一する仕組みが必要であると考えられる。そのためには、専門家によるラベル付けと損傷の種類を付与する際に支援となるような画像処理やユーザインタフェースの整備についても今後の開発すべき事項として考えられる。また、専門家が付与したラベルの輪郭を自動抽出して、適切な線分近似により閉領域の形状情報を生成するアルゴリズムの開発も望ましいと考えられる。

(3) ハードウェア構成

本研究では市販のパソコンを使用して、学習用データの準備から、学習モデルの生成、識別テストに至る一連のプロセスを実施した。流通している計算機資源を利用するという点で、本研究と同様の目的での機械学習技術の導入のハードルは低い。特に識別機能においては、計算負荷はさほど高くないが、新たな識別対象を設けたり、学習モデルを更新したりする場合に必要な学習モデルの生成プロセスにおいては、計算負荷が非常に高く、GPU を用いた並列計算が必要となるため、GPU のハードウェア資源が要求される。GPU の性能に合わせた **configuration** を選択しないと、同じソースコードであっても、処理時間の違いを生じるだけでなく、処理そのものが実行できないケースが容易に生じる。したがって、使用するハードウェアによって、実行可能

な configuration とそれに見合う学習データの解像度や量が制限されることとなる。上位機種の計算機ハードウェアのレンタルやクラウドサービス（AWS：Amazon Web Service など）といった GPU ハードウェアを整備することによって、用意した学習データセットを全て活用して高い識別性能を引き出すことを考える場合は、その稼働時間によりコストが決まるため、試行錯誤による稼働時間を低減することが重要である。そのためには、本研究で実施したように、手元の PC 等で実行できる学習プロセスや識別性能などを確認しておき、その条件から段階的に、上位のハードウェア環境で調整することが可能になり、手戻りなくコストパフォーマンスの高い運用に繋がると考えられる。

(4) 学習させるデータおよびデータ収集方法の改善

図 50 は、点検技術者が構造物に発生している損傷・異常箇所の判定手順を示している。図のような流れで、損傷の疑いがある箇所を発見したあと、点検ハンマーや手で対象を打音、触診を行う。劣化が進んでいる箇所は、打音検査をした時にコンクリート片が剥落する。点検員は剥落の前後の状況を見ている。これは同一箇所における剥落前（見た目は健全）と剥落後（損傷箇所）の状況を観察しており、経験として学習をしていると考えられる。

また、疑いのある部位を発見した時に、点検技術者は、近接して対象範囲の確認を前述の点検ハンマーや触診したり、いろいろな角度から損傷箇所の観察をしたりして学習している。さらに、事前に机上調査を設計図書や過去の点検調書等を参照して構造物の諸元情報や周辺環境情報等を調査・確認している。

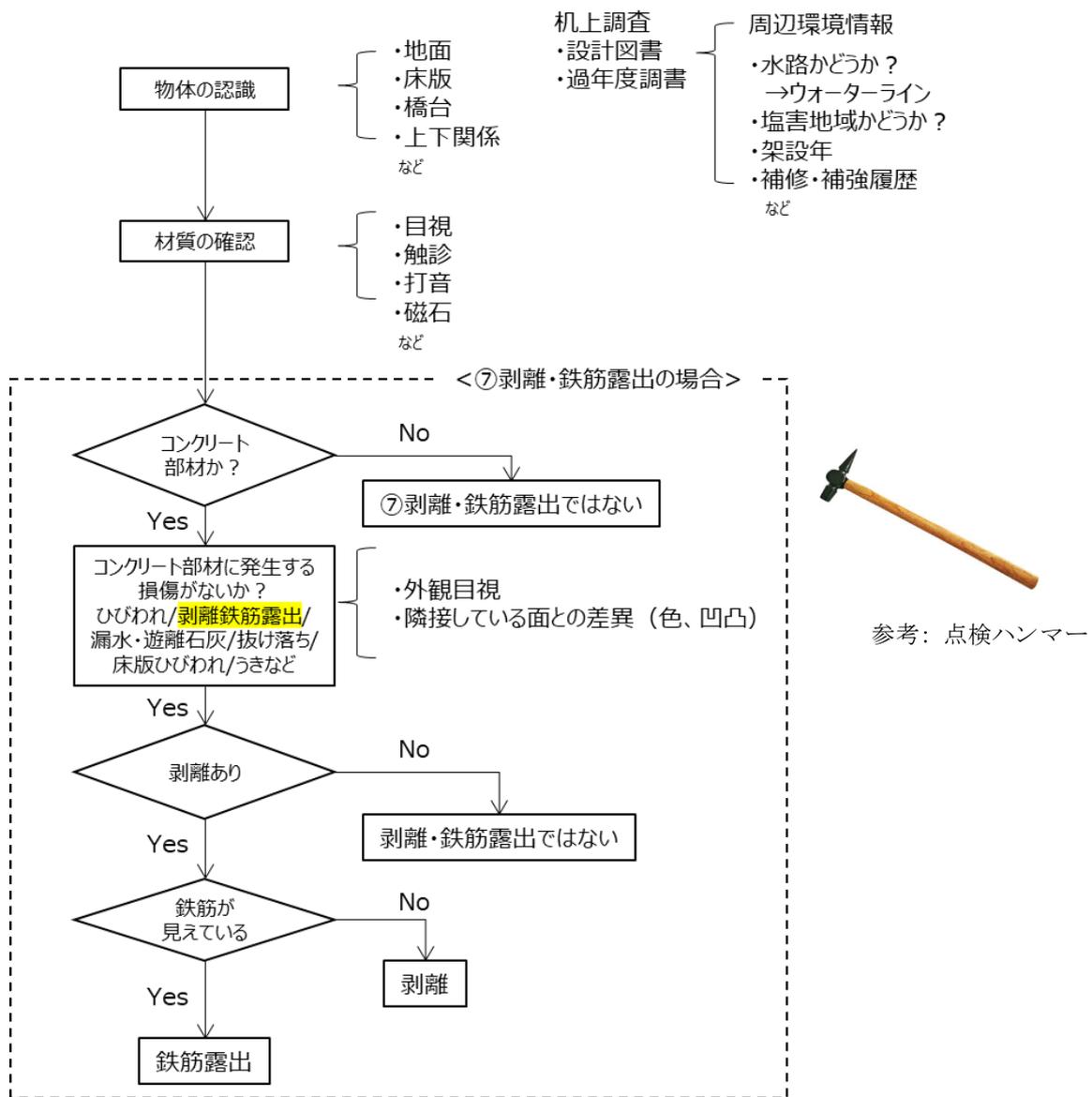


図 50 点検技術者による損傷・異常箇所の判定手順

AIの判断結果と点検技術者の判定手順を比較し、違いを整理することで、今後どのような学習データを整備する必要があるかを検討している。

ロボットが撮影した画像と、AIが検出した損傷箇所とを次図に示す。

| 自走式ロボットで撮影した画像 (GoPro) | AIの検出結果 |
|---|--|
|  |  |
| 左上に、1箇所赤いエリアが損傷として検出された領域 | |

図 51 損傷の検出例

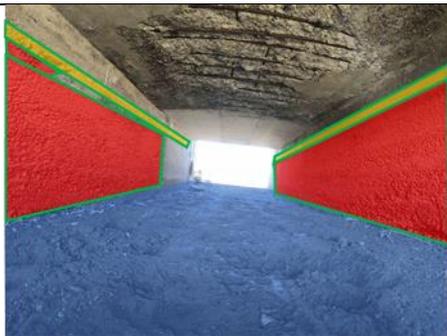
現在は、上記のような結果であるが、点検技術者の判定手順を学習できると、次のような検出結果が得られることが期待できる。

| 自走式ロボットで撮影した画像 (GoPro) | AI の検出結果 |
|---|---|
| <p>画像の下半分において、中心部 (出口付近) の白い箇所以外は全体的 (均一) にゴツゴツとした表面形状となっている →隣接している面の差異が確認されないため、異常箇所なしと判定</p> |  <p data-bbox="1034 710 1230 741">青塗り潰し箇所</p> |
| <p>画像上部の領域について、天井面に対する剥離箇所の割合が大きく→隣接する面との差異が確認されないため異常箇所なしと判定</p> |  <p data-bbox="963 1084 1302 1115">緑の枠線、青塗り潰し箇所</p> |
| <p>画像左上部に、隣接する面との差異がある箇所が確認される→異常箇所と推定</p> |  <p data-bbox="963 1458 1302 1489">緑の枠線、赤塗り潰し箇所</p> |

※面の認識をしていると仮定して、AI の判定フローを推測

※学習したデータに、上記画像に含まれる“すり減り”(損傷種類: 23 変形・欠損) は含まれていない

図 52 AI による検出結果のイメージ (1)

| 自走式ロボットで撮影した画像（GoPro） | AI の検出結果 |
|--|---|
| <p>画像下部は、地面（点検対象外） →上下関係の認識をしているため【物体の認識】</p> |  <p>青塗り潰し箇所</p> |
| <p>この橋梁は、夏場農業用水が流れている【机上調査】 →橋台表面は、水が通ることによりコンクリート表面が洗い流されてすり減りの現象が確認できる。 （赤色塗り潰し箇所） →橋台の表面上部に線状のしみが確認される。本橋は水路であり夏場は水位がしみのある箇所まで来ているのであろうと推測。（黄色塗り潰し箇所） →満水時水際は、流木等の衝突で欠損が生じる（赤色塗り潰し箇所）</p> |  <p>緑の枠線、青塗り潰し箇所</p> |
| <p>画像上部（床版下面）には、剥落箇所が広範囲に発生しており鉄筋が露出していることが明白（赤色塗り潰し箇所）</p> |  <p>緑の枠線、赤塗り潰し箇所</p> |

※学習したデータに、上記画像に含まれる“すり減り”（損傷種類：23 変形・欠損）は含まれていない

図 53 AIによる検出結果のイメージ（2）

(5) 仕組みづくり

実際に点検・調査・その後の維持管理に関する意思決定に本取組み内容を活用する上で、ロボットで獲得した画像ファイルに対して、機械学習による損傷の認識および識別を行う所作の導入の在り方はいくつか挙げられる。

例えば、収集された画像から、損傷の可能性のある画像や箇所を識別して、診断を実施する人の支援となるように情報を絞り込む機能が考えられる。この場合は、画像ごとに個別の損傷データとするのではなく、本研究のカテゴリー3の実施内容のように、3次元形状データやCADモデルとの対応関係を生成・保持しながら、総合的に判断が可能となるような枠組みが望まれる。また、本研究のカテゴリー1、2との連携により、自走式ロボットなどによる画像取得時において、損傷個所の可能性を提示し、その場でさらに詳細な情報収集に結び付けるような取組みも、機械学習機能の導入形態として考えられる。この場合は、現場で取得した画像に対する即時性が求められるため、識別機能の実時間最適化が必要である。一方で、ロボット等による画像取得においては、ロボットと対象物との位置関係による撮影視点の制約があるため、識別結果が安全側に働くように教師学習データを工夫するための検討も必要となると考えられる。

(6) 実装するための実施方針（案）

今回のAIによる損傷箇所抽出のケーススタディを実施した結果、AI導入に至るまでの一連の要件を得られており、今回の実証実験を通して得られた知見から、機械学習技術を点検業務へ実装するための手順、実施方針を以下のように整理している。

1) 実施項目1：点検技術者の損傷箇所判定（思考回路・行動）を損傷ごとに整理

適切なアルゴリズム選定・改良を行うために、26種類ある損傷ごとに点検技術者が判定している思考回路・行動を損傷ごとに整理・分類する。本研究では、剥離鉄筋露出に着目してフローをまとめた。このフローを全損傷に対してはじめに整理することで、適切なアルゴリズム選定もしくは改良ができると考えられる。

2) 実施項目2：AI学習データのためのデータ取得方法を検討し実施する

今後ますます活用が推進されるロボットが取得する画像データに対応できる学習データを整備する。通常点検技術者は、損傷を発見したときに、その損傷を画角の中心になるように撮影ポイントを決めて画角・光量を調整する。しかし、ロボットが取得する画像（動画データからの切り出し）は、そのようにはなっていない。

本研究で開発したロボットが適用できる橋梁は、ロボットで画像取得を実施しデータ数を増やす。同一損傷箇所に対して、意図的に異なる距離や角度で撮影したり、打音検査等実施する場合は実施前後をそれぞれ撮影するなど。

3) 実施項目 3：データ整備方針の策定

日々改良、進化、開発されるアルゴリズムに柔軟に対応できるような形式での教師データ作成方法を検討する。ラベル付けツールの調査および必要に応じて開発する。また、教師データを教師データのみで管理せず、橋梁諸元等の情報と対になった形で、教師データを管理するデータベースを整備する。

最も大事なデータは、年間数千橋の点検実績を有効に活用して収集することができる。実業務と連携した教師データの蓄積のための最適な運用プロセスを策定し、早期実用化を目指す。

図 54 は、機械学習の実用化が達成できたときに、ロボット操作者のモニターに表示される画像のイメージである。損傷箇所はもちろん箇所毎に損傷程度が色分けで表示される。損傷の推定根拠となる箇所についても表示されている。これにより、膨大なデータから最適な診断を行うための有効なツールとなる。



※塗り潰しの濃淡で損傷箇所の程度の大小を表示したイメージ
※損傷箇所判定の根拠となった箇所のイメージ

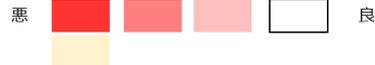


図 54 損傷の判定結果イメージ

6.3. 要件の満足度の照査（総括）

本研究（本章の研究テーマ）の目的は、“ロボットが取得した画像を用いた損傷判定の自動化に対する人工知能の適用可能性を明らかにする”ことである。

研究成果概要は前節に示したとおりであるが、要約すると次のことが言える。

- * 剥離・鉄筋露出およびひび割れを対象にした学習環境を構築して、損傷判定のケーススタディを実施している。
- * 橋梁点検の実用化に至るまでの取り組むべき重点がまとめられている。そのなかでも 20 年以上の実務経験に基づく点検技術者の損傷判定の手順の経験知を形式知として体系化し、ケーススタディ結果を踏まえた教師データの作成の具体的な方策がまとめられているのは特筆事項といえる。
- * 橋梁点検の支援策の既存研究は多数があるが、本研究の成果は、莫大なストック数の小規模橋梁の剥離・鉄筋露出およびひび割れを対象にした損傷判定の自動化に適用していくための教師データの作成に関する重要な示唆を与えている。

以上の理由から、本研究の成果は、ロボットが取得した画像を用いた損傷判定の自動化に対する人工知能の適用可能性を明らかにしており、今後の展開を図るうえで重要な示唆を与えている。

7. アウトリーチ活動の照査

研究成果を用いて、下記要領で実施される展示会へ出展している。社会インフラテック 2018 は、国土交通省が発足させたインフラメンテナンス国民会議が後援する第 1 回目の展示会となる。

「社会インフラテック 2018(第 1 回)」 URL <https://messe.nikkei.co.jp/in/>

| | |
|-------|--|
| 会期： | 2018 年 12 月 6 日 (木) ～8 日 (土) 10:00～17:00 |
| 会場： | 東京ビッグサイト 東ホール (東京都江東区有明 3-10-1) |
| 主催： | インフラメンテナンス国民会議、日本経済新聞社 |
| 来場対象： | 国・地方公共団体 (中央省庁、地方自治体、公共団体、研究機関など)、建設 (ゼネコン、建設コンサルタント、電気・空調・衛生・消防など各種設備)、土木 (道路維持・修繕・改良工事、道路排水工事、上水道・下水道工事、造園工事)、不動産・デベロッパー、住宅メーカー、工務店、設計事務所・デザイナー、運輸・流通・交通機関、地理・気象情報関連、通信、重電、商社、エネルギー、金融・証券・保険、農林業、人材・派遣、投資家、学校・教育関係者、生活者 ほか |
| 展示規模： | 100 社、170 小間 (見込み) |
| 来場者数： | 20,000 人 (見込み) ※同時開催展「エコプロ 2018」とあわせて 17 万人見込み |
| 同時開催： | エコプロ 2018 URL: http://eco-pro.com/2018/ |



図 55 出展の様子

会期 3 日間の来場者は約 16 万名 (同時開催イベント含む総数) で、研究成果を直接説明したのは記録に残っているだけでも 200 名以上であった。以上の結果からも社会インフラテックへの出展は、研究成果のアウトリーチ活動として有意義であったと言える。

今後の対応策としては、研究成果を実務者も多く参加する学会 (日本道路会議等) へ論文投稿していくことが挙げられる。

8. 工程管理の照査

本研究の打合せ実績を以下に示す。

| | |
|-------------------|----|
| * 進捗確認会議 | 6回 |
| * 自走ロボット製作に関する会議 | 9回 |
| * 三次元モデル・AIに関する会議 | 7回 |
| * 損傷システムに関する会議 | 5回 |

本研究は、実施計画書に準じて定例会（Web会議も含む）の開催日や議題を予め設定して遂行している。さらに、中小診断士や学識者による第三者視点からのチェック体制を構築し、研究期間のすべてのプロセスにてチェックを行って、関係者一同が緊密に連携して取り組んで成果を取りまとめており、適切な工程管理を実施してきたと言える。

9. 総括

本研究の目的は、小規模橋梁を対象にして様々な課題・リスクに対して実証実験を実施して、利用シーンに応じた適用範囲を整理し、機能要件定義を明確にして、実運用に向けた開発をするための一資料となる報告書の作成としている。研究を遂行した結果、以下の成果がまとめられており、当初の目的を十分に達成し、今後の小規模橋梁の点検の発展に寄与することが多いに期待できる。

- * 技術動向、開発・維持費用や汎用性の観点も踏まえて現実的に社会実装できる小規模橋梁の桁下に進入し、後工程の点検作業に必要な十分なデータが取得できるロボットを開発できる要件をまとめている。
- * ロボットで撮影した画像を使って三次元モデルの生成する要件をまとめている。
- * 小規模橋梁の点検結果を有効活用するための支援策となる三次元損傷図作成支援システムの要件をまとめている。
- * ロボットが取得した画像を用いた損傷判定の自動化に対する人工知能の適用可能性を明らかにしている。

以上

平成30年度JKA機械振興補助事業

「小規模橋梁の安全確認のための効率的点検技術の調査研究」

総括報告書

平成31年3月

作 成 一般財団法人 ニューメディア開発協会
〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3番2号
リブラビル

TEL (03)6892-5030 FAX (03)6892-5029