

橋梁維持管理へのロボット技術の適用（NEDOプロジェクト）

技術本部 永田 尚人

● 橋梁点検ロボット分野の研究開発への取り組み

平成 24 年 12 月に発生した中央道笹子トンネル事故など、高度経済成長期に建設された社会インフラの老朽化が急速に進行している。新技術の速やかな導入・共有化、IT 等を活用したインフラ維持管理の高度化等の推進が重要な政策課題として取り上げられ、国としての「科学技術イノベーション総合戦略」が平成 25 年 6 月 7 日に閣議決定されている。この中で、「インフラの安全・安心の確保」が重点的課題の一分野として取り上げられ、これを受けて国土交通省は、国民生活や経済の基盤であるインフラが的確に維持されるよう、様々な施設の老朽化対策に対して総合的に取り組んできている。

国土交通省の公表資料¹⁾によると、橋梁分野に関しては、10 年後に全国で約 70 万橋ある延長 2m 以上の橋梁の 43%が建設後 50 年を経過することが想定され、橋梁の長寿命化を目的とした維持管理が喫緊の課題となっていることから、平成 26 年 6 月には「道路橋定期点検要領」が策定された。この点検要領では、5 年に 1 回の頻度で近接目視により定期点検を行うことが基本とされ、必要に応じて触診や打音等の非破壊検査等を併用した点検を行うことも明記されている。

このような背景のもと、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO とする）では、インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクトとして、インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発に関する研究開発公募²⁾を行った。

当社はこのプロジェクト公募に対して、鋼橋を対象とした磁石車輪による移動機構とそれに搭載するセンサを組み合わせた検査ロボットを、(株)移動ロボット研究所、名古屋大学など 5 者によるコンソーシアムで応募、NEDO による審査委員会で採択されたことにより研究開発をスタートさせた。

本稿では、橋梁維持管理への適用を目指したロボット技術開発についての概要を取りまとめ、今後建設業で求められるロボット技術の方向性についても概観する。

● NEDO 委託事業期間（2014～2015 年度）での開発（基礎技術の開発）

研究開発の目標は、指向性を有する小型音源探査装置（音カメラ）を移動ロボットに搭載し、加振機構搭載ロボットと一体となった橋梁の目視点検を補助する検査システムを確立するものであり、研究開発の内容については、以下のとおりであった。

- 目視点検の補助を目的に、音による橋梁老朽化診断手法を開発することで、新たな橋梁点検技術を開拓する
- 音の発生箇所をビジュアル化する音カメラ装置と磁力式移動ロボットを組み合わせた点検ロボットを開発する
- 床版を微小な力で加振し、指向性音カメラ搭載ロボットと連動して損傷位置を把握する検査システムを開発する

開発するロボットは、鋼橋上部構造のうちコンクリート床版の点検に活用するものであり、橋梁点検や調査を行うユーザー側のニーズに基づくシステムが求められる。

【 研究開発の項目 】

開発する移動ロボットの開発項目は、 Fig.1 に示す通りであった。

本研究プロジェクトの開発項目

■ 指向性音源探査装置(センサ)の開発

- 非健全部のリアルタイムでの表示
- 高解像度動画の無線伝送機能(情報取得・判断機能)

■ 音源探査装置搭載ロボットの開発



- 鋼橋での走行性能 (アクセス機能)
- 鋼橋への取付け機能 (アクセス機能)

■ 微小振動により加振する検知機構

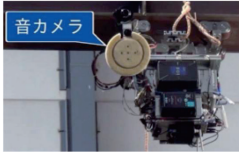
- 非健全部を検知可能な加振機構の設計と開発

■ コンクリート床板のひび割れ劣化診断を補助する技術の検証

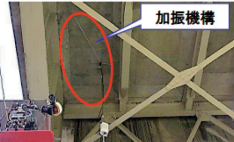
- 高精細カメラによる橋梁床板の展開図作成
- 0.2~0.3mm程度のクラックの把握

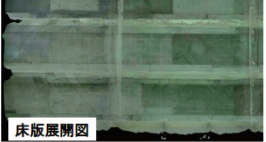
リアルタイム映像



音カメラ



加振機構



床版展開図

Fig.1 研究開発プロジェクトの開発項目

開発した移動ロボットはPhoto.1に示すように、音響検査を行うための音源探査装置 (以下、指向性音カメラという)、解析装置、高精細カメラなどのセンサシステム、走行のためのモータコントローラ、電源などが搭載され、総重量は約 36kg と非常に重いロボットであった。

指向性音カメラは、Photo.1 に示すように、平面的に配置された 5 本のマイクロホンと ひとつの CCD カメラを装備した装置である。

永久磁石車輪は、鋼橋桁部に存在する添接板の段差、ボルトやリベットを踏破できるようタンデム構造で設計を行っている。車輪の直径はおよそ 60mm、厚さ 10mm のネオジウム磁石 3 枚と接地部の保護、トラクション伝達のためのゴムリングより構成されている。タンデム車輪 1 組で 30kg 以上の強力な吸着力を発生するため、ロボットは鋼桁フランジ下部の添接部以外の個所では安定した水平走行や天井面走行などが可能である。鋼橋桁フランジ下部の走行の際、磁石車輪が想定外に剥離するような事態に対応するため、ロボットには落下防止アームを装備している。

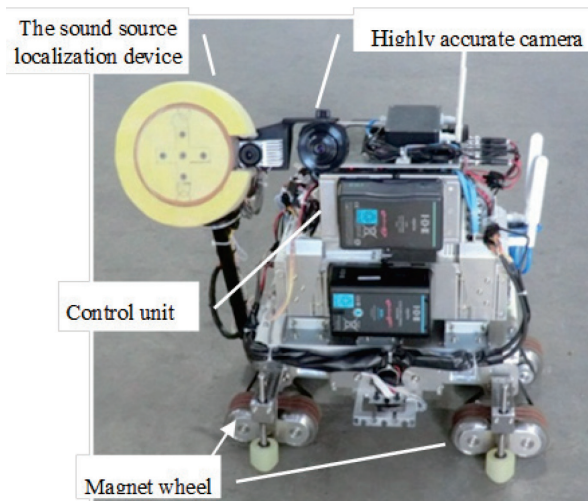


Photo.1 開発した初期の点検ロボット

実用化を目的に開発するロボットシステムにおいては、運用に関わる全ての技術課題に対して解が求められた。実環境での実証実験として、国土交通省次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会による茨城県久慈川幸久橋での現場実証への参加、NEDO 事務局立会いのもとでの自動車専用道路高架橋におけるシステム全体の運用試験を実施した。Fig.2 に実橋梁でのシステムの検証項目を示している。



Fig.2 実橋梁での検証項目

得られた合成画像から、0.2mm 程度のひび割れが検出可能であることを実証実験で確認した。また、指向性音カメラによる損傷検出システムについても、一連の動作およびコンクリート床版の非健全部の音響特性を視覚的に明示できることを確認している。しかしながら、本研究で開発した指向性音カメラセンサは、現場実証の評価委員会からの以下のような指摘を含めて、研究開発目的の実現にあたっては大きな課題が存在することも事実であった。

- 指向性音カメラの測定精度の向上，ならびに，ロードノイズなどの暗騒音による影響，健全部を特定する条件定義等について現場実測を積み重ね検討する必要がある
- センサ（音源探査装置）の有用性について，実橋梁等での実証データの蓄積からコンクリート床版の損傷程度と卓越周波数との相関性を定量的に把握する必要がある
- 移動機構についても各種の添接板を安定して走行できる機構への改良が必要である

一連の実証実験を通して、音カメラをセンサとして搭載する初期モデルのロボットシステムは、NEDO によるステージゲート（中間審査）で不採択との評価となり、センサ部分の軽量化を含めて抜本的な対応が必要となった。見直しの際には、ロボットの改良に集中するため、非健全部の検知を行う加振機構についても開発を中止する方針決定を行っている。

● NEDO 助成事業期間 (2016~2017 年度) での改良 (ロボットの抜本的改良)

NEDO によるインフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発に関する助成事業に対して、改良型ロボットシステム開発の再提案が採択され、2016~2017 年度の期間で開発を継続した。

改良を行った磁石走行式ロボットは、従前のもと同様に鋼桁橋コンクリート床版を対象としているが、橋梁点検車等による現状の点検と同等以上の速度での写真撮影に特化し、合成画像からの損傷展開図を作成し、目視点検の補助を可能にする検査システムを確立するものとした。

【研究開発の最終目標】

本研究開発では、以下の 2 項目を最終的な目標として設定した。

- 静止状態でひび割れの高精細画像が確実に取得できる永久磁石車輪式走行ロボットによる移動機構の確立
- 橋梁下面に設置されたはく落防止ネット越しの床版撮影、床版写真の合成とひび割れ展開図を作成できるシステムの開発

はく落防止ネット越しでの走破が可能な磁力吸着機構により、はく落防止ネットが設置された橋梁においても高所作業等の危険作業が不要となるため、仮設足場費用を削減できるだけでなく、比較的強い風速 (地上で 5m/秒~6m/秒程度) でも床版の詳細なひび割れ画像の取得を可能とするものである。床版のひび割れの画像合成については、ロボットに搭載する高精細カメラによる撮影画像を用いて作成された床版展開図により検出する。横桁や配管等の障害物が存在しない格間に関しては、富士フィルム株式会社が開発した AI を用いたクラウド型の「社会インフラ画像診断サービス」³⁾ を利用した自動画像合成を行い、障害物の存在する格間に関しては手動による画像合成を行なえる撮影方法を確立している。

ロボットを活用した点検方法を Fig.3 に示す。

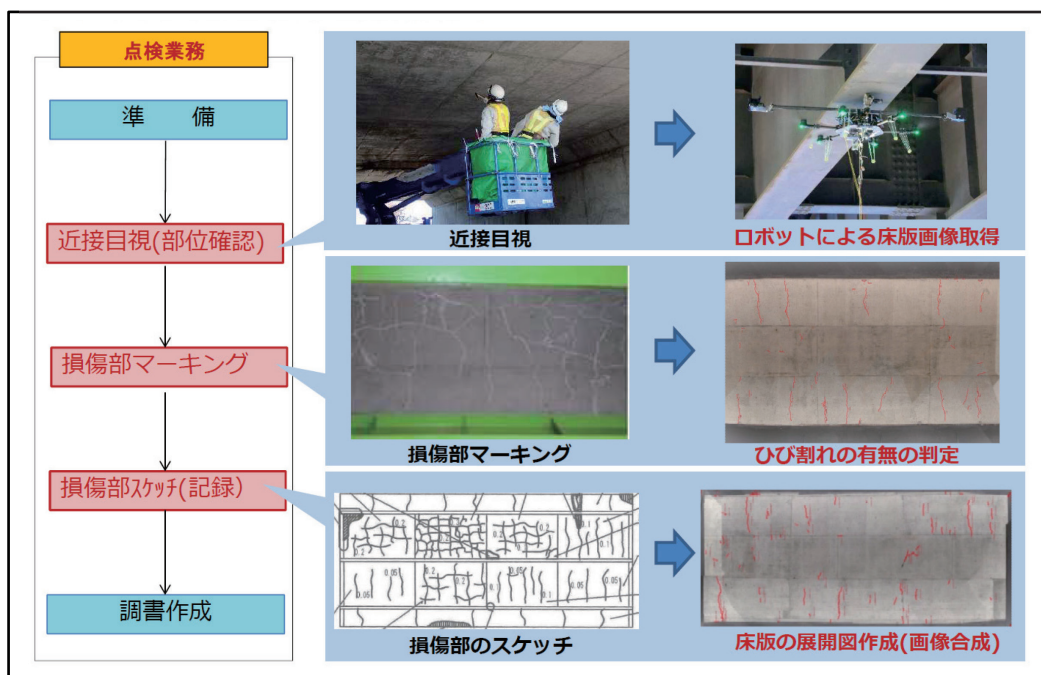


Fig.3 ロボットを活用した点検方法

助成期間においては、つくば研究所内に設置した模擬橋梁等で試作ロボットの走行性能に関する実験を繰り返し実施した。この期間に試作されたロボットを Fig.4 に、最終的に製作したロボットを Fig.5 に示す。

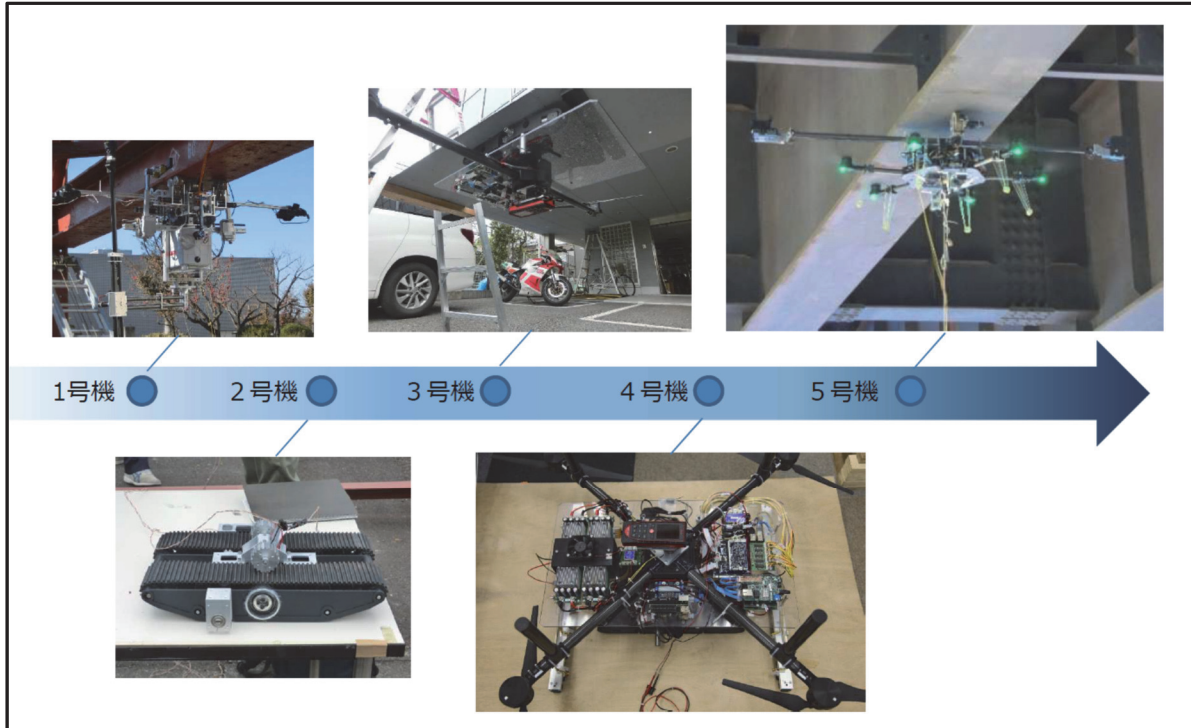


Fig.4 助成期間（2016年4月～2018年3月）に試作されたロボット

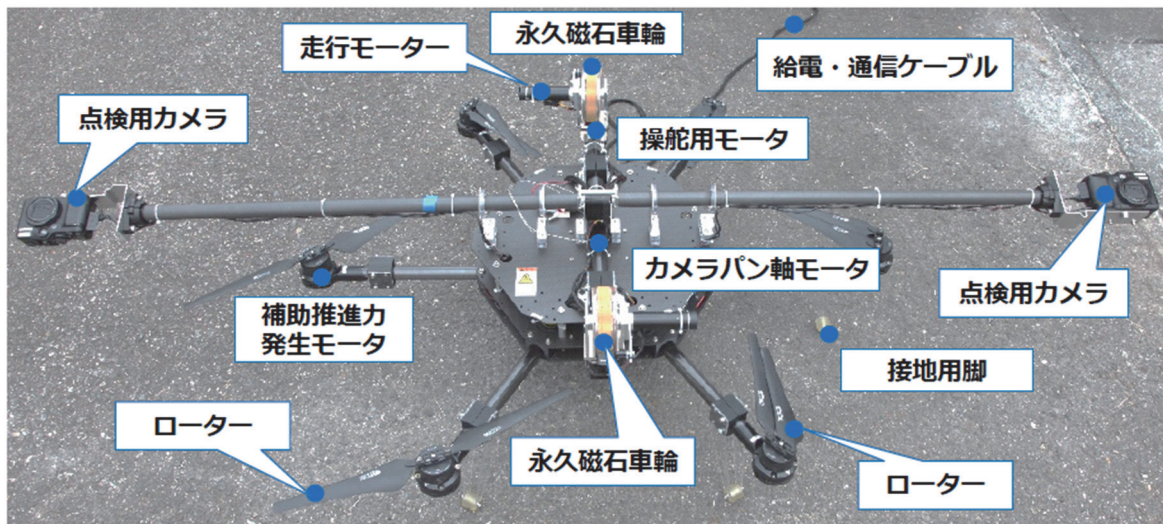


Fig.5 最終的に製作した永久磁石車輪式走行ロボット

最終的な永久磁石車輪式走行ロボットは、ボルト添接部等の走行安定性を確保するために、ローターを吸着装置の補助として搭載している。この落下防止機構については、直径440mm、推力約3kgのローター6個を安定化電源で駆動する形式とし、添接部踏破中のロボット脱落等の急激な姿勢変化に対する揚力変動を考慮し、ロボットの自重13kg以上の推力で設計している。

神奈川県さがみロボット産業特区協議会の支援のもと、神奈川県伊勢原市の単径間橋長約 40m の毘沙門橋において NEDO インフラ維持管理ロボット技術委員会による現場実証実験を行った。

実証実験は、前掲 (Fig.5) の補助吸着装置を搭載した 2 輪型ロボットを使用し、実用現場での運用シナリオを想定して、点検は以下に示す手順で実施した。運用は、主桁へのロボットの設置・撤去を含めて、ロボット操作、補助推力ローター操縦、高精細カメラの操作員各 1 名の合計 3 名体制で実施した。

主桁 1 本あたりの点検時間は概ね 25 分であり、1 径間の床版点検時間は約 25 分×7 本の 180 分程度であった。

- 現場での点検作業
 - 1) 桁への移動ロボットの設置・撤去：各 3 分
 - 2) 鉸桁橋の主桁部を、高精細カメラを搭載した移動ロボットが走行・撮影：約 15 分
 - 横構あり区間の撮影間隔 20cm, 走行速度 10cm/秒, 撮影時間 20 秒
 - 横構なし区間の撮影間隔 80cm, 走行速度 20cm/秒, 撮影時間 20 秒
 - 3) ロボット設置場所 (出発地点) への移動時間：約 4 分
 - 平均速度 30cm/秒, ボルト添接部走行 1 分/1 箇所
- 事務所での画像合成等の作業
 - 4) 撮影画像を PC に伝送し取得画像の確認とひずみ補正, 格間毎のデータ保存を行う
 - 5) 格間毎の補正画像からひび割れ (ひび割れ幅 0.2mm 以上) の有無を判定
 - 6) 画像の支障となる横構等を除去した展開図作成, 点検調書の作成

【 ロボットシステムの有効性 】

模擬橋梁や実橋による現場実証試験を通して確認できたロボットシステムの有効性は、以下のとおりである。

- 鋼橋フランジ下部に吸着して移動する永久磁石車輪式走行ロボットは、吸着力の低下する添接板やボルト頭部の走行に大きな技術的な壁が存在していたが、ローターを利用した補助吸着装置を最大限利用して安定した走行の実現を図ることが可能となった
- 主桁と平行に架設された配管や横構等の障害物についても約 20cm 隔での撮影でクリアな床版の画像取得を実現した
- はく落防止ネットが設置された鋼桁の道路橋についても、磁石車輪で走行し近接目視点検を補助できるひび割れ画像の取得の可能性を示すことができた

しかしながら、ネット越しの画像取得にあたっては、撮影の障害物であるネットとカメラの距離が一定ではないため安定した画像取得ができず、自動合成に至らなかった。また、カメラ焦点距離の遠隔操作機能や軽量の補助照明等の検討課題が残っているのも事実であり、今後の検討が必要である。

今回のプロジェクトを通して、油田先生が述べられているように、ロボットが達成すべき仕事とその環境条件を、ロボットの使用者と開発者の双方に理解できるように表現することは決して簡単ではないことを痛感している。今後、建設現場で稼働するロボットの開発においては、建設現場を熟知している我々が「ロボットがどのような環境で働くか」をロボットの開発者と共有することが重要になる。

● 求められるロボット技術の方向性について

日建連が公表している資料によると、建設現場を支えている高年齢層の離職によって 2025 年には建設技能労働者が約 128 万人程度不足することが想定され、新たな入職者の確保が重要課題となっている。また、国土交通省では 2025 年度までに建設現場の生産性 20% 向上を目標とした「i-Construction」の導入を進めている。このような背景のもと、建設各社は現場へのロボット導入事例を活発に公表しているだけでなく、無人化施工技術等への人工知能導入や自律型ロボット技術を導入する次世代建設生産システムの開発にも注力することが求められてきている。

建設業を取り巻く環境変化としては、現場へのロボット導入だけでなく社会の大きな流れとして、Society 5.0 が位置付けられている。経団連の報告⁴⁾の中で、わが国が積み上げてきた社会基盤を最大限に活用しつつ、IoT や AI などによる新たな社会サービス基盤を活用して都市の進化を支えていくことが記載されている。都市全体を最適化し、都市交通やエネルギーなどの刻一刻と変化するデータを分野横断で分析・制御することで、持続可能な都市を実現するシステムを構築することが提言されている。

海外での先進事例として、シンガポールでは、国土全体を 3D モデル化し建物や土木インフラなどに様々な情報をリンクさせた「バーチャル・シンガポール」の構築が、現在進められている。この意思決定のためのプラットフォームでは、老朽化が進む社会インフラ（橋梁・トンネル等）について、その位置や構造を立体的に表示するだけでなく、構造物に設置されたセンサから集まる情報を基にその損傷状況を可視化することを可能にしている。このような都市を創造していくためには、今後、都市空間も含めてあらゆるところで多様なロボットが活躍し、人間が行ってきた各種の作業を AI とロボットによって代替・支援することが求められる。社会が大きく変革する今、都市の進化に貢献するため、我々はロボット技術の建設分野への導入に向けての研究開発を加速する必要がある。ここで、我々が肝に銘じておかなければならないのは、技術革新のシーズはユーザー側が求めるニーズと利用される環境をよく理解した上でマッチングすることであり、現場に役立つ、社会に役立つ効率的なロボットシステム等の開発が求められていることであろう。

謝 辞：本書の巻頭言を頂戴した芝浦工業大学特任教授の油田先生には、「NEDO のインフラ維持管理等の社会課題解決システム開発プロジェクト（2014-2017 年度）」の研究開発を進める中で、NEDO プロジェクトのリーダー（PL）のお立場だけでなく、研究開発のいろいろな局面で貴重なご助言を頂戴いたしました。ここに、改めて篤く御礼を申し上げます。

なお、本稿で取りまとめた研究成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」の委託事業ならびに助成事業の結果で得られたものであり、研究開発に参画された皆様に改めて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局企画課監修：道路統計年報 2012 (平成 24 年度), 2012.
- 2) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構ロボット・AI 部：インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト－インフラ維持管理用ロボット技術－, pp.15-18, 2018.
(<https://www.nedo.go.jp/content/100878961.pdf>)
- 3) 富士フイルム(株)HP：社会インフラ画像診断システム「ひびみつけ」,
<http://fujifilm.jp/business/material/infraservice/index.htm>
- 4) 一般社団法人日本経済団体連合会：Society 5.0 実現に向けた行動計画 ～WG 報告書集～, 2017.

学会等への投稿論文等ならびに口頭発表 (抜粋)

[投稿論文および報告]

1. 永田尚人：磁石走行式橋梁点検ロボットの研究開発－音源探査装置搭載型移動ロボット－, 土木学会誌, Vol. 101, No. 1, pp. 46-47, 2016.
2. 永田尚人, 小柳栄次, 北原成郎, 西岡吉弘：鋼橋の維持管理用点検ロボットの開発, 土木学会第 16 回建設ロボットシンポジウム講演集 04-5, 2016. (審査付)
3. 永田尚人, 小柳栄次：磁石走行ロボットによる橋梁点検システムの開発, 検査技術 Vol. 23, No. 3, pp. 61-67, 2018.
4. 永田尚人, 小柳栄次, 西岡吉弘：永久磁石車輪式走行ロボットによる橋梁点検システムの開発, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol. 74, No. 2, pp. I_1-I_9, 2018. (査読付)

[口頭発表]

1. 永田尚人, 北原成郎, 大脇雅直, 西岡吉弘ほか：磁石走行式橋梁点検ロボットの研究開発－音源探査装置搭載型移動ロボット－, 土木学会第 15 回建設ロボットシンポジウム講演集, 2015.
2. 永田尚人, 小柳栄次, 北原成郎ほか：音源探査装置搭載移動ロボットの橋梁維持管理への適用, 第 33 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2015.
3. 小柳栄次, 野口宏実, 栗田由紀夫, 西岡吉弘ほか：音源探査装置搭載移動ロボットの橋梁維持管理への適用, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2016.
4. 小柳栄次, 野口宏実, 西岡吉弘ほか：クローラ型移動ロボットの橋梁維持管理への適用, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2017.
5. 久保隆司, 瀧上隆也, 小柳栄次ほか：磁石走行式ロボットを活用した橋梁点検システムの開発, 第 36 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2018.

[表彰等]

1. 建設技術展 2016 近畿注目技術賞を受賞：
<https://www.kyokai-kinki.or.jp/kengi2016/images/award/award-technology02.pdf>