

橋梁点検システムの開発

堀 武司, 中西 洋介, 波 通隆, 須永 俊明*,
若山 昌信*, 清野 弘明**, 澤 幸男***

Development of Bridge Inspection System

Takeshi HORI, Yousuke NAKANISHI, Michitaka NAMI,
Toshiaki SUNAGA*, Masanobu WAKAYAMA*,
Hiroaki SEINO**, Yukio SAWA***

抄 録

我が国の多くの橋梁は高度成長期に建設されたものであり、今後老朽化時期に入る見込みであるため、効率的な維持管理と定期点検が重要になっている。しかし、検査員が直接接近するのが難しい橋梁桁下部の点検作業はコストが高く、安全性にも問題がある。これらの課題を解決するため、著者らは、カメラ搭載多関節ロボットアームにより橋梁桁下部の点検を行う新しい橋梁点検車両を開発した。本システムは、作業足場や有人点検車両などの従来手法と比較して、より低コストかつ安全に点検を行う事が出来る。さらに本システムでは、損傷箇所の写真と3次元位置情報を同時に取得し、それらの情報から点検診断調書を半自動的に作成する事も可能である。これらの自動化機能の導入により、データ管理や文書作成を含む作業工程全体の効率化が実現された。

キーワード：橋梁点検, 予防保全, 画像計測

Abstract

Preventive maintenance and periodic inspection of bridges become important, since a considerable number of bridges in Japan built in the high-growth period are expected to be superannuated in the near future. However, the inspection of the underpart of bridge is expensive and unsafe. To resolve these problems, we developed a new bridge inspection vehicle to inspect the underpart of bridge beam, by use of the polyarticular robot arm with the image sensor. This system can carry out the inspection of bridge at a lower cost and more safely than conventional inspection methods, such as scaffoldings and manned inspection vehicles. By introducing those computer-aided automation features, efficiency of the entire process related bridge inspection including data management and documentation is improved.

KEY-WORDS : bridge inspection, preventive maintenance, image measurement

* 株式会社帝国設計事務所

* TEIKOKU DESIGN OFFICE Co.,Ltd.

** 株式会社エルムデータ

** ELM DATA Co.,Ltd.

*** 株式会社カナモト

*** KANAMOTO Co.,Ltd.

事業名：民間等共同研究

課題名：高性能橋梁点検ロボットのための情報処理システムの開発

1. はじめに

我が国の橋梁の多くは1960年代の高度経済成長期に建設されたものであり、それらの多くが今後一斉に老朽化時期（建設後50年以降）を迎える事が予想されている¹⁾。図1は、北海道所管の橋梁における老朽化橋梁の推移を示したグラフであるが、今後20～25年間で老朽化時期を迎える橋梁が急速に増加する事がわかる。

しかし、国や自治体の公共事業予算は減少傾向にあり、全ての老朽化橋梁に関して架け替えや新規建設で対応する事は不可能である。そのため、適切な維持管理の実施により既存橋梁の長寿命化を図り、更新コストの抑制と平準化を実現する事が重要な課題となっている。

橋梁の長寿命化を実現するには、きめ細かな定期点検を実施し、損傷状況を的確に把握する事が不可欠である。橋梁の定期点検は主に検査員の目視によって行われるが、橋梁桁下部に関しては地形等の制約で検査員が直接接近する事が難しい場合が多い。このような場合の点検には、足場の構築や、特殊な有人空中作業車両を用いた作業が必要であるが、コスト面の制約から必ずしも十分な点検が行われていないのが現状である¹⁾²⁾。また、検査員が桁下部に降りて作業する事は、作業の安全面においても問題がある。

これらの課題を解決するため、(株)帝国設計事務所を中心とするグループでは、カメラを搭載した無人型ロボットアームを用いた点検システムの開発に取り組んできた。平成15、16年に行った簡易型点検システム開発の後、平成17年度には本格的な試作システムとなる「橋竜」1号機を開発した。その運用試験結果に基づき、平成19年に量産を想定した改良機である「橋竜」2号機を開発した。

本報告では、橋梁点検システム「橋竜」の概要と、そこに盛り込まれた橋梁点検作業の効率化技術について述べる。以下、本報告の構成について述べる。2章では、自治体等が現在実施している橋梁維持管理業務の現状と課題について整理し、本システム開発における目標を示す。3章では、橋梁点検システム「橋竜」の機能について、主にハードウェアの観

点から説明する。4章では、車載コンピュータ上に搭載された点検作業支援用の情報処理システムと、それによる点検業務全体の効率化について説明する。5章では、実際の橋梁を用いて行ったシステムの評価試験、および本システムのユーザである橋梁管理者による評価について述べる。最後に、6章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 橋梁維持管理業務の現状と課題

現在、北海道が所管する橋梁では、各橋梁につき5年に一度の間隔で定期点検（一次点検）を実施するよう規定している。全橋梁数は約5,000橋であるため、1年あたり約1,000橋のペースで点検を実施している事になる。

点検作業の内容は目視による点検が中心であり、それ以上の詳細な検査や補修作業は一次点検により損傷が確認された場合にのみ行われる。市町村が所管する橋梁についても、点検項目や頻度に差はあるが、目視点検が主体である点は基本的に同じである。ただし、国所管の橋梁や高速道路などでは、一次点検においても打音検査等の実施が義務づけられている。本システムの開発にあたっては、地方自治体における橋梁点検業務を主要なターゲットとして位置付け、現在行われている目視点検と同水準の点検作業を効率的に実現する事を第一の目標とした。

定期点検に要する工数は、現地での点検作業そのものに加えて、記録データの整理や診断調書の作成などの事務作業が占める割合が大きい、点検員による一般的な点検作業では、損傷箇所を写真撮影すると同時に、その位置や損傷状況を野帳等に記録する。しかし、一回の点検につき数百件以上の写真記録がある事、写真と損傷状況記録の対応付けなど作業が複雑である事から、最終成果物である点検診断調書を取りまとめるには長い時間を要し、人件費を押し上げる要因の一つとなっている。そこで、点検データ取得から点検診断調書作成までの一連の作業について、自動化技術の導入などにより効率化を図る事を、本システムの第二の目標とした。

3. 橋梁点検システムのハードウェア構成

1章で述べたように、「橋竜」の開発は試作1号機（平成17年度開発）、2号機（平成19年開発）の順で行われた。ここでは、そのハードウェアの概要、および1号機から2号機での仕様変更点について述べる。

3.1 車両と点検アーム

橋梁点検システム「橋竜」の外観を図2に示す。

システムを搭載するためのベース車両としては、4tトラックを選定した。これにより、類似の遠隔点検車両と比較してコンパクトな構成となり、小規模な橋梁での運用が容易となっ

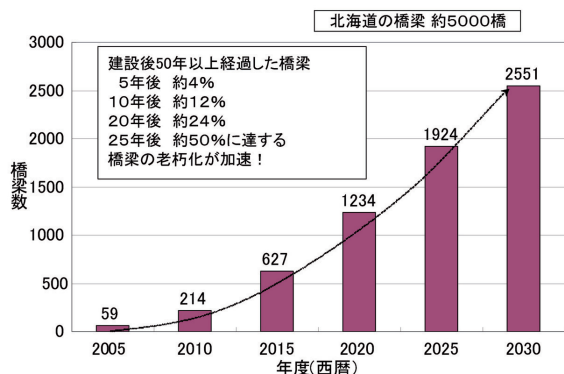


図1 建設後50年以降の橋梁の推移

た。また、普通運転免許での運用が可能であり、特殊な資格が必要ない点も利点である。

点検作業に使用する多関節ロボットアームは、古河ユニック(株)が本システム専用で設計・開発を行ったものである。点検アームは4関節、10自由度の構造であり、油圧によって駆動される。点検アームの伸縮長と可動範囲は、図3、図4に示す通りであり、橋梁端面から内側に向かって約10mまでの範囲で点検作業を行う事が出来る。



図2 橋梁点検システム「橋竜」試作2号機

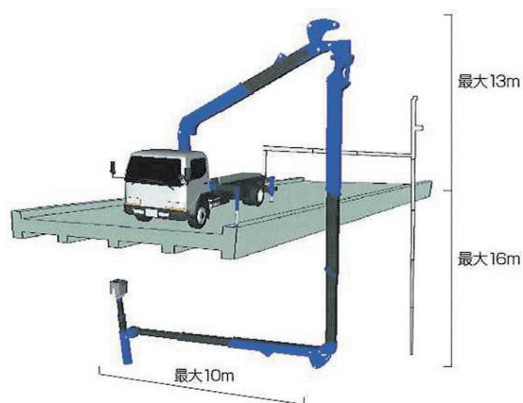


図3 点検アームの伸縮長

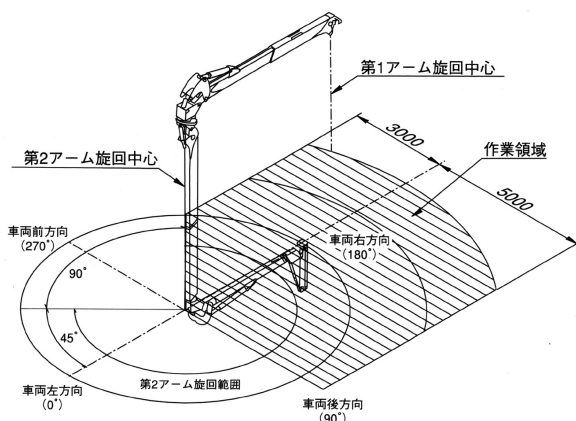


図4 点検アームの作業領域

作業アームを格納状態(図2)から作業姿勢(図3)まで展開するには、数分間を要する。試作1号機の運用試験の結果、1回の作業が終了し車両を移動する際のアーム格納～再展開作業が最も時間を要している事が判明した。そのため、2号機では車輪付きの特殊アウトリガ(図5)を導入し、作業アームを橋梁桁下に下ろした状態での車両の移動を可能とし、作業時間の短縮を図った。



図5 車輪付きアウトリガ

3.2 点検用センサ機器

3.2.1 目視点検用センサ雲台

目視点検作業のためのセンサ機器類は、点検アーム先端に設置した2軸可動型の雲台上に搭載した(図6、図7)。

雲台に搭載された主な点検用センサ機器は以下の通りである。

- ・ 動画像用ビデオカメラ(作業アーム操作用、および損傷箇所の探索用)
- ・ 静止画像カメラ(損傷箇所の写真記録用)
- ・ 距離センサ(点検箇所の位置計測用)
- ・ 照明機器(夜間作業用)

動画像用ビデオカメラには、ハイビジョン規格(1,980×1,080画素)の民生用ビデオカメラを選定した。機器選定時の予備試験では、数m先のコンクリート表面における0.1mm幅のクラックを発見出来る事が確認されており、点検員による目視点検と同等水準での検査が可能である。

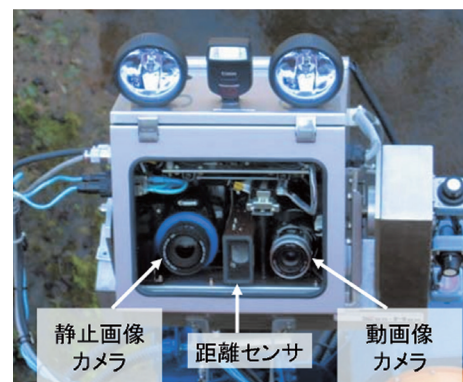


図6 試作1号機のセンサ雲台



図7 小型化された試作2号機のセンサ雲台

静止画像用カメラについては、試作1号機では高精細画像が得られる一眼レフ型デジタルカメラ（800万画素）を搭載したが、2号機では、雲台の小型化、低コスト化のため、独立した静止画像用カメラは廃止し、動画、静止画記録の両方をハイビジョンビデオカメラで行うように仕様変更を行った（図7）。これにより静止画像の品質は200万画素相当まで低下したが、点検診断調書に添付する写真データ（北海道の規定では1,024×768画素）に対しては十分な品質を有している。距離センサは、Time of flight型のレーザ距離計を搭載しており、20m程度先までの対象物の距離を精度1mmで計測出来る。距離計による計測情報は、3.2.2節で説明する点検箇所的位置計測のために用いられる。

3.2.2 位置計測用センサ

従来の人手による点検作業の問題点の一つとして、点検箇所の位置に関する情報を、正確に記録する事が難しい事が挙げられる。本システムでは、点検を行った箇所について、正確な位置情報を自動的に取得するための機構を開発した。

位置計測は、図8に示す手順で行われる。

Step 1

車両の走行距離計から得られた情報を用い、橋梁上における車両の停車位置を求める。

Step 2

作業アーム、雲台の可動部に取り付けられたロータリーエンコーダ等の情報を用い、現在の作業アームの姿勢情報を取得する。アームの構造と姿勢から順運動学計算により、先端部の位置・姿勢を求める。

Step 3

画像センサと同軸に設置されたレーザ距離計を用いて、点検対象物までの距離を計測し、対象の座標を求める。

以上の手順により、点検用画像センサが撮影している対象物の位置を、橋梁を基準とする3次元座標として取得する事

が出来る。

ここで得られた位置情報は、4章で述べる点検作業支援システムによって写真データ等と共に自動的に記録、管理され、データ整理や点検診断調書の作成に用いられる。

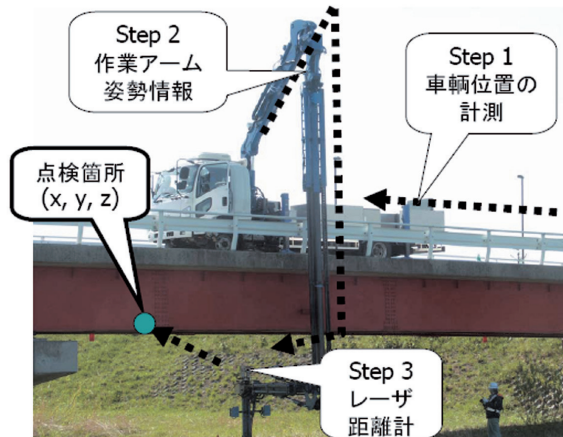


図8 点検箇所の位置計測

3.2.3 監視用センサ

点検アームの操作時に周囲の状況を確認し、障害物等との衝突を防止するため、点検アームの各部に小型の監視用カメラを配置した（図9）。

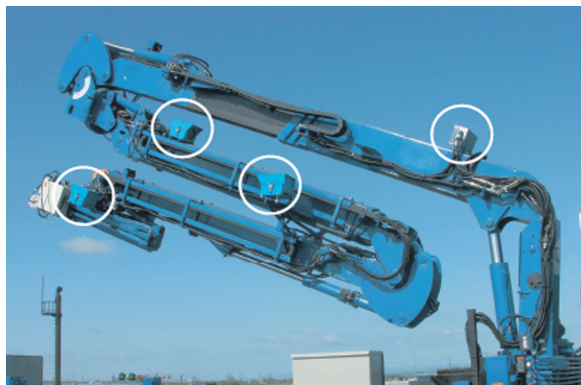


図9 監視カメラの取り付け位置

3.3 操作室

車両には運転席と兼用で操作室が設けられており、オペレータはその中から遠隔作業で点検作業を行う（図10）。

操作室内には、ビデオ表示用の大型ハイビジョンモニター、雲台操作用のジョイスティック、データ管理用コンピュータなどを配置し、点検に関する全ての作業を室内からの指示で実施可能とした。

点検作業を行う際の要員としては、点検アーム等の操作を行うオペレータ1名、点検診断とデータ記録を行う点検員1名の計2名による運用を想定しており、有人空中作業車を使う場合よりも少ない人員での作業が可能である。



図10 操作室

3.4 機器の制御と車両ネットワーク

本システムには多数のセンサや機器が搭載されており、その多くは作業アーム先端の雲台部に集中している。一方、点検アーム上の電気配線や油圧ホース等を収容するケーブルベアの容量は限られており、全ての搭載機器について個別の配線を行う事は困難である。

そのため、本システムではEthernetによる車両LANを構築し、機器間の通信は可能な限り車両LAN上に集約する方針で設計を行った。搭載機器の機種選定にあたっては、Ethernetで接続可能な機器を優先して選択し、それ以外の機器に関してはEthernetインターフェースを備えた制御マイコン経由で接続する構成とした。その結果、点検アーム上の通信線を、車両LAN用ケーブルとビデオ伝送用ケーブル（IEEE1394又はHDMI）の2系統に集約し、配線量を大幅に削減する事が出来た。

4. 点検作業支援システム

2章で述べた通り、橋梁点検診断業務の工数の多くは、点検後のデータ整理と点検診断調書の作成で占められている。数百件の写真記録と手作業で野帳に記載された診断記録を参照しながら必要な情報を探し出し、点検診断調書を作成する作業は非効率であり、改善が望まれていた。

そこで本システムでは、現場での点検データの取得、記録から点検診断調書作成までの一連の作業を自動化するためのコンピュータ支援システム（以下、点検作業支援システムと呼ぶ）を開発し、業務の効率化を実現した。

4.1 作業環境の可視化システム

オペレータは、操作室内から直接目視する事なく点検アームの操縦を行わなければならないが、複雑な構造を持つ作業アームの現在の姿勢、および橋梁との位置関係を常に把握し、的確な操作を行うのは困難であり熟練を要する作業である。そこで、オペレータの負担を軽減し、作業環境の把握を支援するため、3次元CGによる可視化技術を導入した。

開発した可視化システムの画面を図11に示す。橋梁、点検車両、作業アーム、画像センサの視線と現在の注視点など、作業空間内に存在する要素が橋梁原点を基準とする3次元座標系に基づきCGで表示され、3面図および任意視点からの表示を選択する事が出来る。

車両の停車位置、および作業アーム、雲台の姿勢に関しては、3.2.2節で述べた各種センサから情報を取得し、リアルタイムで表示を行っている。また、レーザ距離計の動作時には、レーザの軌跡（カメラの視線）と測距されたポイント（現在の注視点）がCG表示される。

橋梁のモデルに関しては、予め橋梁図面などに基づきCADで作成したモデルを外部から読み込んで表示している。橋梁モデルは現実の橋梁の構造を完全に反映したモデルではないため、CG画面のみを頼りにアームの障害物回避などを行う事は出来ないが、橋梁と作業アームの3次元的位置関係を直感的に把握する事でオペレータの作業性は大きく改善される事が実地試験での評価で確認されている。

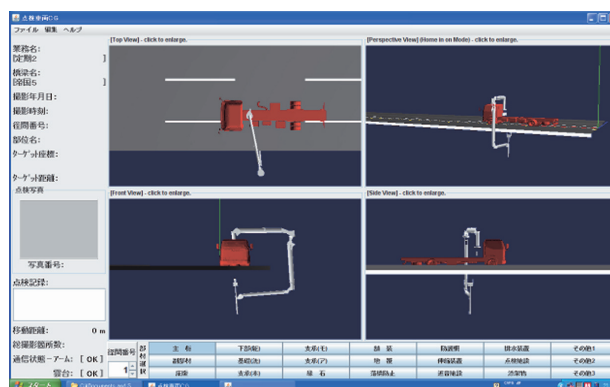


図11 作業環境可視化システム

4.2 点検情報データベース

点検作業中のデータを自動的に記録・管理するために、車載コンピュータ上にデータベースサーバを設置した。

オペレータが点検用ビデオ映像を見ながら損傷箇所を確認し、記録ボタンを押すことにより、静止画像データが取得される。それと同時に表1に示す項目が自動的に点検情報データベースに保存される。人手による記録作業とは異なり、点検箇所の画像情報と関連する属性情報が一体となって管理されるため、事後のデータ整理や二次利用を効率的に行う事が可能である。

表 1 点検データの記録項目

記録項目	内容
静止画像	JPEG 形式データ
点検時刻	画像取得時の時刻
点検箇所的位置	3 次元座標
カメラ位置	3 次元座標, 視線方向
診断コメント	テキストデータ (オペレータが入力)
その他	点検箇所の径間, 部材情報

点検情報データベースに記録されたデータは、ブラウザ(図12)を用いて参照する事が可能である。また、作業環境可視化システムのCG画面上では、記録された点検箇所の3次元座標がマーカーとして表示される。オペレータは、点検作業が完了した部位を画面上のマーカー分布により直感的に確認出来るため、点検作業の漏れや重複を防ぐ事が出来る。

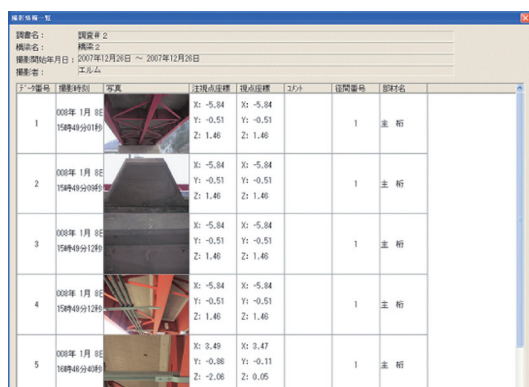


図12 点検データベースブラウザ

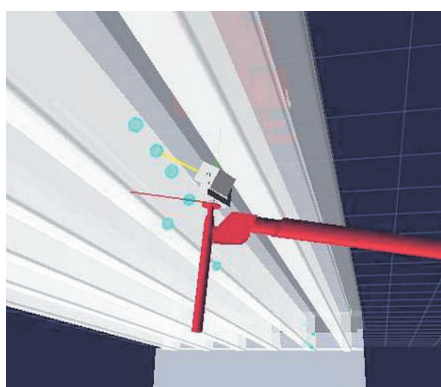


図13 点検実施箇所を示すマーカー表示

4.3 点検診断調書作成の自動化

現場作業の後に行われる橋梁点検診断調書の作成作業を効率化するため、点検情報データベースの記録を参照しながら点検診断調書を半自動で作成するシステムを開発した。

車載PC上の点検情報データベースに蓄積されたデータは、

同じ論理構造を持つ事務所側のデータベースサーバへ複製され、以後の調書作成作業は事務所内システムで行われる(図14)。

事務所内システムにおいても車載システムとほぼ同様の機能が利用可能であり、点検データブラウザによる点検データ閲覧や、作業環境可視化システムによる点検箇所のCG表示を行う事が可能である。調書の作成作業者は、これらの機能を用いて点検記録の内容を確認する。

次に、調書に記載すべきデータの取捨選択を、調書作成ソフトウェア上で指示する。調書作成ソフトウェアは、選択された点検記録をデータベースから読み出し、予め登録されたフォーマットに従ってMicrosoft Excel形式の点検診断調書を出力する。

現況写真台帳(図15)は、損傷部位を撮影した写真とそれに対する診断結果を記載するための書式であり、データベース上の写真データや診断コメントなどの情報を自動的に書式に埋め込んで出力する。損傷位置図(図16)は、台帳に記載された損傷部位に対応する位置を橋梁平面図上に図示したものである。こちらについても、調書作成ソフトウェアがデータベース中の座標データを用いて損傷部位を自動的に記入する。

現時点で対応している調書フォーマットは北海道建設部が定めた形式であるが、他機関のフォーマットへの対応も容易に可能である。

これらの機能によって、従来の作業で時間を要していた写真と損傷部位の対応付け、様式へのデータ記入などといった作業の大半が自動化され、作業の大幅な省力化が実現された。



図14 事務所での点検診断調書作成作業

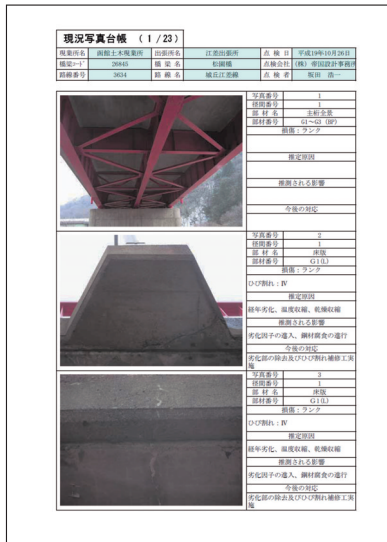


図15 現況写真台帳

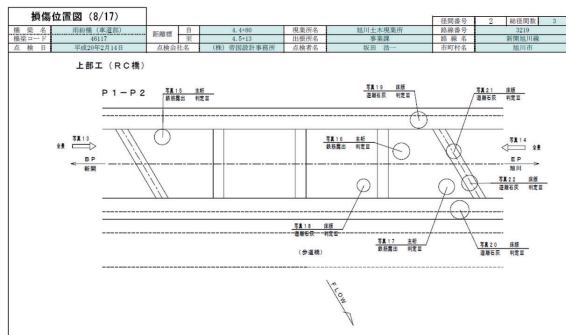


図16 損傷位置図

5. 実地試験での評価

道内、国内各地の橋梁での実地評価試験を行った結果について述べる。

5.1 作業速度

点検作業の速度は、点検作業コスト（要員の人件費、機材レンタル費）に直接影響を及ぼす要素であり、技術普及にあたって最も重要な評価項目といえる。

実地評価試験において作業時間の計測を行ったところ、車輪付きアウトリガを装備しアーム展開状態で車両移動が出来る「橋竜」2号機ならば、既存の有人空中作業車と同等かそれ以上の速度で点検作業が可能である事が確認出来た。

また、有人空中作業車による作業内容が点検員による目視のみであるのに対し、「橋竜」による点検作業はデータの記録整理や診断調書作成の準備作業を含んでいる点を考慮に入れば、工程全体としての作業効率は「橋竜」が大幅に上回っているといえる。

5.2 利用者の評価

実際に橋梁の管理業務を行っている自治体や機関の担当者を対象として、技術説明を兼ねた実地評価試験を数回実施しており³⁾、そこで得られた意見、感想を整理した。

本システムの利点としては、

- 従来の目視点検と同水準の点検が、遠隔でも可能である。
- 作業員が桁下に降りる必要がないので、安全に作業ができる。
- 点検データの記録、管理の自動化機能が便利である。
- 損傷箇所の記録が、正確な位置情報も含めて管理されているので、損傷の進行度合いなどを複数年に渡って観察する場合などに有用である。

などの項目が挙げられており、システム開発時に意図した目的、目標が概ね達成出来ている事が確認された。

一方、改善すべき点としては、

- 大規模な橋梁や特殊な橋梁（側壁が高いなど）に対応出来るように、作業アームの可動範囲を広げてほしい。
- 目視だけでなく、打音検査にも対応してほしい。
- 夜間の点検の場合、対象までの距離が5m以上になると撮影能力が低下する（照明の強化が必要）。

といった事項が挙げられた。これらについては、技術的には実現可能であるものの、システム全体のコスト増につながる面もあるため、機能とコストのバランスについて慎重に検討する必要がある。

6. まとめ

橋梁桁下部の目視点検作業を、迅速、低コスト、かつ安全に行うため、カメラ搭載無人ロボットアームによる遠隔点検システム「橋竜」の実用化開発を行った。実地試験の結果、本システムは点検員による目視点検と同等の点検能力と、既存の有人空中作業車を上回る作業効率を有する事が確認出来た。また、コンピュータを活用した点検データ管理の自動化機能により、現場での点検作業から点検診断調書の作成に至る点検業務の全工程に関する大幅な効率化を実現出来た。

本システムは実用化段階に入っており、既にいくつかの橋梁において実際の点検業務を行った実績を有している。

今後は、本システムを活用した橋梁点検が新しい工法として認知され、全国の自治体等で活用されるように、技術普及活動をすすめていく予定である。また、国道や高速道路などの点検業務へ対応するため、点検アームの改良、打音検査用アタッチメントの開発など、システムの機能向上に関しても継続して取り組みたいと考えている。

謝辞

本研究開発の一部は、経済産業省 新連携支援事業「高性能橋梁点検ロボットを利用した橋梁点検診断システムの開発・販売」によって実施されたものです。記して感謝致します。

引用文献

- 1) 公共土木施設長寿命化検討委員会 報告書, 北海道建設部, (2004)
- 2) 若山昌信・須永俊明・杉本博之: 予防保全型維持管理のための橋梁点検車の開発, 平成16年度土木学会北海道支部論文報告集, vol.61, (2005)
- 3) 井口祐樹・山下欣也・奥尾政憲: 新たなる橋梁点検車「橋竜」の導入について, 阪神高速道路第41回技術研究発表会論文集, pp.413-418, (2009)