

# 論文 バーチャルリアリティを活用した橋梁目視点検支援システムの開発

内村 俊二\*1・澤村 修司\*2・宮本 文穂\*3

**要旨：**橋梁の目視点検結果では、複数人で同じ箇所を点検しても、かなりのばらつきがあることが指摘されている。この要因としては、点検・診断技術者の技術能力に一定の基準がない点、一定の基準となるような点検者教育システムがない点が挙げられる。これらの問題に対して本研究では、バーチャルリアリティを活用して目視点検の体験が行える、橋梁目視点検支援システムを開発した。本システムを用いることで、点検者間で診断の検討・確認を行うことで点検結果のばらつきの低減が期待できる。本稿では、本システムの概要と、実橋目視点検における点検結果のばらつきの低減への効果について述べる。

**キーワード：**RC 橋梁, 目視点検, 点検のばらつき, バーチャルリアリティ

## 1. はじめに

近年の少子高齢化による若手人材の不足、熟練技術者の退職などにより、若手技術者が経験豊富な技術者からの専門的な教育や技術の伝承を受ける機会が失われつつある。このため、既存橋梁の点検技術（精度）の低下が懸念されている。一般的な既存橋梁の維持管理業務では、定期的に現地に出向いて主に目視点検によって劣化・損傷の有無を把握し、橋梁維持管理マニュアルなどに基づいて必要な性能の現状を診断する。したがって、橋梁点検に携わる技術者への教育は、橋梁構造の初歩的な勉強から始め、橋梁現地に出向いて熟練技術者の指示のもとで点検、診断手法などの伝授が行われ、逐次経験を積み重ねさせていく。しかしながら、我が国の橋梁点検技術者教育には、図-1に示すようないくつかの課題が存在している。その結果、例えば複数の点検技術者で既存橋梁に対する同一範囲内の劣化・損傷箇所を目視点検しても、その点検（検出）および診断結果にはかなり

の“ばらつき”がみられることが指摘されている<sup>1)</sup>。この原因として、橋梁の点検・診断技術者の技術能力に専門的資格のような一定の基準が十分整っていないこと、一定の基準を効率的に満足させるような橋梁点検技術者教育システムが不十分なことが挙げられ、技術基準および資格制度の整備と橋梁点検技術者教育の確立が急務である<sup>2)</sup>。

上記の問題点を解決する方法の一つとして、橋梁現地に近い「空間」を創造し、橋梁の長いライフサイクルを短い「時間」で表現する環境を提供することが可能なバーチャルリアリティ（Virtual Reality; VR）技術<sup>3)</sup>を利用した橋梁点検技術教育のための新たなシステムの開発がある<sup>4),5)</sup>。VRは、最新情報処理技術の一つで、4次元的なマルチメディア映像を利用して仮想体験ができるシステムをいう。既存橋梁に発生する様々な損傷状態を擬似的に体験したり、維持管理の専門家が、環境条件や発生している損傷を基に、どこを見て、どのように診断しているのかの思考プロセスを、臨場感を持って仮想的に体験することが可能な、橋梁点検技術者の体験（トレーニング）システムに適用可能なものである。

近年、IT関連技術の急激に進歩に伴って、3次元CGの描画性能も飛躍的に向上し、仮想現実世界を大型スクリーンやディスプレイ上に映し出すことができるようになった。この橋梁目視点検支援システムを導入することにより、仮想的な橋梁点検技術の教育が可能となる。さらに、専門家に対しては、橋梁の画像と点検結果を示しながら、損傷と評価レベルの検討を行うことで、点検のばらつきを改善することが可能となる。本論文では、橋梁目視点検支援システムについて述べる。さらに、本システムを専門家へのヒアリングに導入し、点検ばらつきの改善への効果について述べる。

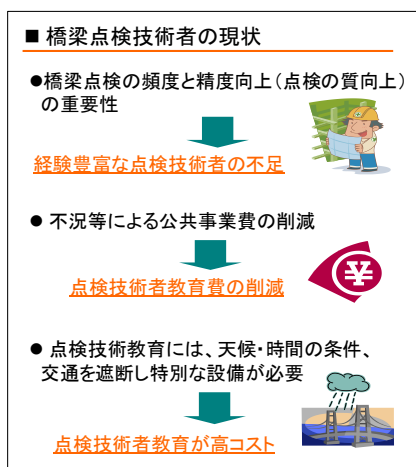


図-1 橋梁点検技術者教育における現状と課題

\*1 山口大学大学院 医学系研究科助教 (正会員)

\*2 (財) 山口県建設技術センター 主任

\*3 山口大学大学院 理工学研究科教授 工博 (正会員)

## 2. 橋梁目視点検支援システムの開発

本章では、種々の課題を有する橋梁目視点検の精度を向上させ、その後続く性能診断における信頼性を高めるための、バーチャルリアリティ(VR)を活用した橋梁目視点検支援システム(以下、本システム)の開発について述べる。

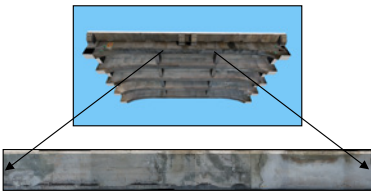
### 2.1 本システムの目的と活用の考え方

橋梁点検技術者のための本システムは、(1)3次元画像(3D-CG)による劣化・損傷の確認、(2)VRを利用して点検箇所ウォークスルーによる仮想(疑似)体験、(3)劣化・損傷の確認と評価レベルの確認、(4)点検技術者の意見のフィードバック、(5)現地に何回も足を運ばなくても3D-CGによる仮想体験によって何時でも確認ができる、(6)過去に実施した点検結果の再現が可能のため両者の比較によって劣化・損傷の進行を具体的に把握し易い、などを目的として開発する。図-2に本システムの機能の概要を示し、以下にそれぞれの機能を解説する：

#### システムの機能

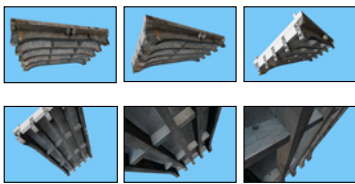
##### 1. 画像による損傷確認

・橋梁の実画像を用いて損傷した部位の劣化状態の確認ができる。



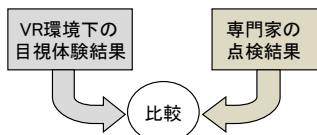
##### 2. ウォークスルーによる点検疑似体験

・橋梁の外観の画像を用いて3次元CGによるVRシステムを構築し、VR環境下で点検の疑似体験を行う。



##### 3. 損傷の確認と評価レベルの確認

・点検の疑似体験の結果と専門家の点検結果を比較し、損傷の有無の確認と評価レベルの確認ができる。



##### 4. 点検者の意見のフィードバック

・損傷と評価レベルの検討のために、点検した専門家へのヒアリングを行い、点検結果のばらつきを改善する。



図-2 本システムの機能の概要

- (1) **点検結果の保管**：データベース(DB)を利用し、写真データから作成した3次元モデルデータ・外観の画像と点検結果を保管する。これが教育システムにおいて教材となる。
- (2) **点検の疑似体験**：例えば、既存鉄筋コンクリート(RC)橋の外観の画像を用いて3次元CGによるVRシステムを構築する。これにより、VR環境下で点検の仮想(疑似)体験を行うことができる。
- (3) **点検結果をもとにした学習**：VR環境下での疑似目視点検の結果と専門家の点検結果とを比較することで、損傷の有無の確認と評価レベルの確認ができる。このシステムを用いて、点検技術者個々に学習を行うことができ、さらに、専門家を講師とする集合教育も行うことができるため、効果的な技術者教育が期待できる。
- (4) **点検結果のばらつき改善への活用**：橋梁の画像と点検結果を示しながら、点検した専門家へのヒアリングを行い、損傷と評価レベルの検討を行うことができる。これにより、点検技術者間の結果のばらつきを改善することが期待できる。

いずれの機能もVR環境下で実現することの最大の利点は、現場での点検の練習は必要最小限に留めることができ、時間および場所の制約を受けずに繰り返し点検の体験(練習)ができることである。

### 2.2 点検体験のためのバーチャルリアリティ化

人間の種々の感覚に訴えるようなVR環境を実現するには、そのための高額な機材と、高度かつ複雑なシステムを必要とする。しかしながら一方で、多大なコスト(時間および金銭)をかけないでより教育効果の高い技術教育システムも望まれている。

そこで、技術教育の主題が橋梁の目視点検技術向上であることを考慮して、VRの構成要素である視覚情報(すなわち映像)の提示と、入力映像間の双方向性の実現を重点的に行うことで、バーチャルリアリティ化を図る。映像は、双方向性を考慮して、リアルタイムで処理される橋梁の3次元コンピュータグラフィックス(3D-CG)を表示する。そのために以下の仕様とした。システムの構成を図-3に示す。

- 映像のコンテンツは、既存RC橋梁の3D-CGとする。そのため、橋梁の3D-CGモデルを作成する必要がある。橋梁モデルの表面は、計算による色塗りではなく、既存橋梁の劣化・損傷を含んだ外観写真を貼り付ける。これにより、橋梁の3D-CGにリアル(質感)が加わる。
- VRを指向した3D-CGのツール(ライブラリ)とし

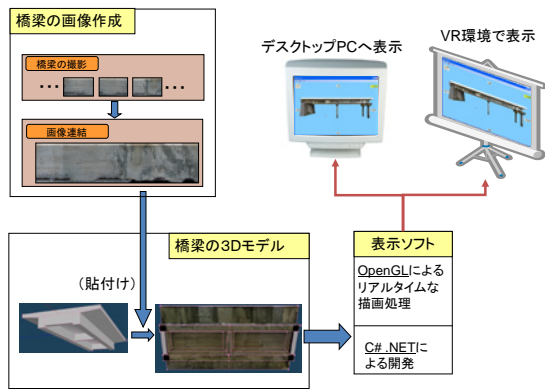


図-3 本システムの構成

て、OpenGL ライブラリを用いる。これは、将来より高速な処理が可能な Linux ベースの PC クラスタやグラフィック処理に特化した高性能コンピュータへの適用を考慮するためである。

- 橋梁の 3D-CG モデルを表示するソフトは、目視点検技術に関連する機能を必要とするため、独自に開発する。

### 2.3 本システムの構築手順

本システムの構築手順は、(1)RC 橋梁の写真撮影、(2)橋梁の画像の作成、(3)橋梁 3D-CG モデルの作成と画像の貼付け、(4)表示ソフトウェアの開発である。手順の概要を図-4 に示す。各手順について、以下に述べる。

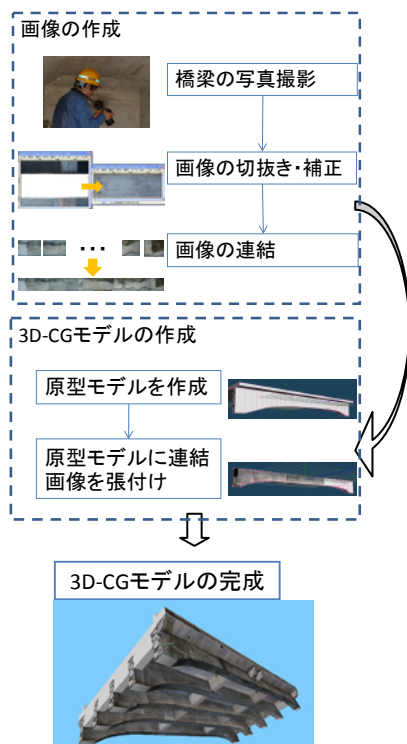


図-4 橋梁 3D-CG モデルの作成手順

### (1) RC 橋梁の写真撮影

デジタルカメラを用いて、橋梁の各部材に対して近接撮影を行う。近接撮影ができない場合は、望遠レンズを用いて、各部材の外観の詳細をできるかぎり撮影する。その際、次に述べる画像作成のために、写真に前後の写真との重複する領域を持つように撮影する。

### (2) 部材外観の画像の作成

まず、デジタルカメラで撮影された各写真に対して、画像編集ソフトを用いて、レンズ補正、部材画像の切り抜き、整形などの画像処理を施し、部材外観の部分画像を作成する。

次に、部分画像の連結を行い、部材外観の画像を作成する。連結手順の概要を図-5 に示し、連結手順を以下に述べる。

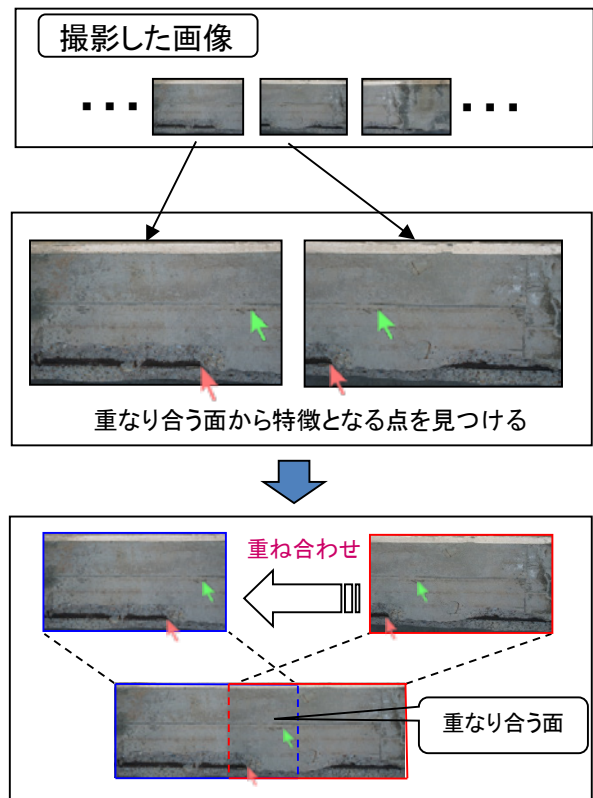


図-5 画像の連結

#### 1) 連結候補点の抽出

部材外観におけるひび割れ等の損傷による形状の急激な変化や色の急激な変化は、画像を連結する際の目印となる。そこで、2枚の部分画像に対して、各画素の色相および輝度の一次微分値を求め、一次微分値がある閾値よりも大きい画素を連結候補点とする。

#### 2) 連結点の選択

- 1)で抽出された連結候補点の中から、特徴的な2組

の連結点を目視により選択する。

### 3) 連結点に基づく移動・拡大縮小・回転処理

2)で選択された連結点の組が合致するように、1枚の画像に対して拡大縮小および回転の画像処理を行った後、もう1枚の画像へ移動することで画像の連結を行う。

以上の手順を部材の部分画像すべてに対して行うことで、部材外観の画像を作成する。連結された部材外観画像の例を図-6に示す。



図-6 連結画像の例

### (3) 橋梁3次元モデルの作成と画像の貼付け

様々な形状の橋梁に対応するため、汎用の3D-CGモデル作成ソフトを用いて、対象橋梁の3D-CGモデルを作成する。対象橋梁の寸法図をもとに橋梁のモデルを作成した後に、(2)で作成した各部材の外観画像を貼り付ける。作成した橋梁の3D-CGモデルの例を図-7に示す。



図-7 橋梁3D-CGモデルの例

### (4) 表示ソフトウェアの開発

(3)で作成した橋梁3D-CGモデルをデスクトップPCのディスプレイや大型スクリーンへ表示するためのソフトウェアを開発した。開発言語にC#.NETを、グラフィックライブラリにOpenGLをそれぞれ用いた。

表示機能には、橋梁下でウォークスルーを行うことができる全体表示と、点検結果の検証などに用いる部材表示を備えた。全体表示の例を図-8に、部材表示の例を図-9にそれぞれ示す。

全体表示では、キーボードの矢印キーやマウスを用いて画面を移動することができ、あたかも実橋梁の下を歩いて(=ウォークスルー)点検を行っているような表示

になる。また、部材表示では、点検結果との比較のために、点検区域のインデックスも表示できる。



図-8 全体表示の例

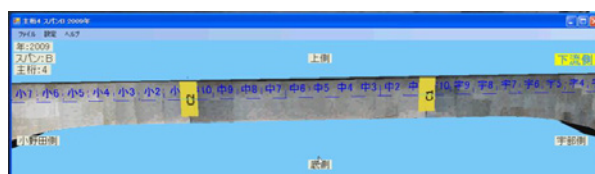


図-9 部材表示の例

## 3. 実橋における目視点検の実施と本システムの適用

本章では、目視点検における点検結果のばらつきを低減する目的で本システムを適用した事例を述べ、点検結果のばらつき低減の効果を検討する。

### 3.1 実橋目視点検の概要

点検対象の橋梁は、1935年に供用が開始され1998年にその役目を終えた「KT橋(単純RC-T桁橋(5主桁))」(以下、本橋)である。本橋は、2003年から複数年に渡り段階的に撤去が開始され、2009年完全に撤去された。この撤去に際し、目視点検を行う民間業者の複数の専門家(従事年数10~20年)により、2003年、2007年、2008年、2009年と過去4回に渡り目視点検調査を行った。点検対象は、各年段階的に撤去された8径間(2径間/年)である。目視点検では、撤去工事の際に架設される足場を利用して近接目視およびチェックハンマーによる打音による剥離の判定を行った。

### 3.2 2008年以前の点検結果のばらつき

2008年以前の点検結果について述べる。点検業務に10~20年従事した専門家の間でも損傷箇所の指摘および損傷度の評価にばらつきがあることが報告されている<sup>1)</sup>。ばらつきの例として、2008年の各専門家の点検結果について、図-10にひび割れの指摘箇所、

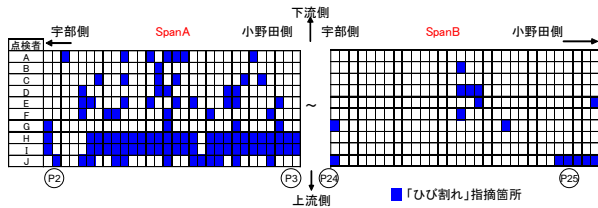


図-10 ひび割れの指摘箇所(2008年)

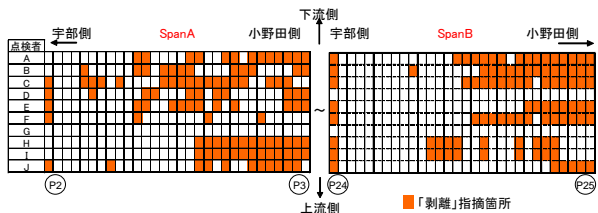


図-11 剥離の指摘箇所(2008年)

図-11に剥離の指摘箇所をそれぞれ示す。図-10、11より、損傷の指摘箇所に個人差があり、専門家間にはばらつきがあることがわかる。この原因の一つとして、ひび割れと剥離が両方ある場合の判定および記録が個々の点検者に委ねられていたことが考えられる。

### 3.3 本システムの専門家ヒアリングへの導入

2009年の目視点検の実施前に、前回(2008年)にも参加した点検者(8組織・18名)を一同に会し、本システムを用いて過去の点検結果を表示し、過去の目視点検結果について議論を行うヒアリング会を実施した。ヒアリング会の実施概要を図-12に示す。

ヒアリング会の実施内容は、最初に前回の点検現場を思い出してもらうことを考え、本システムを用いて点検箇所のウォークスルーによる疑似体験を実施した。次に、主桁ごとに画像による損傷の確認を行った。さらに、点検で作成した変状図を用い、損傷種別・位置の確認と評価レベルの確認を行った。最後に、点検者同士で議論し、点検者の意見の抽出・共有を行った。その結果、剥離についてはチェックハンマーによる打音検査を行って判定すること、また、ひび割れと剥離が両方ある場合は両方を記録することが申し合わされた。

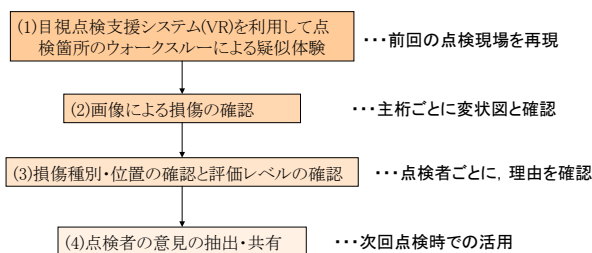


図-12 ヒアリング会の実施概要

### 3.4 点検結果の比較

本システムを用いたヒアリング会の効果を検討するため、事前のヒアリング会を実施した2009年の点検結果とヒアリング会を実施しなかった2008年の点検結果とを比較する。2008年および2009年の両点検に参加した専門家6名の点検結果について、図-13にひび割れの指摘箇所、図-14に剥離の指摘箇所の比較図をそれぞれ示す。

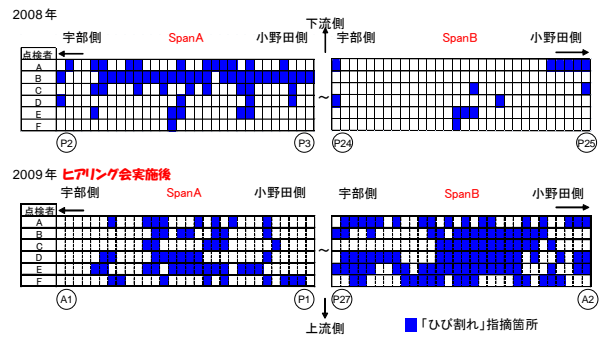


図-13 ひび割れの指摘箇所の比較

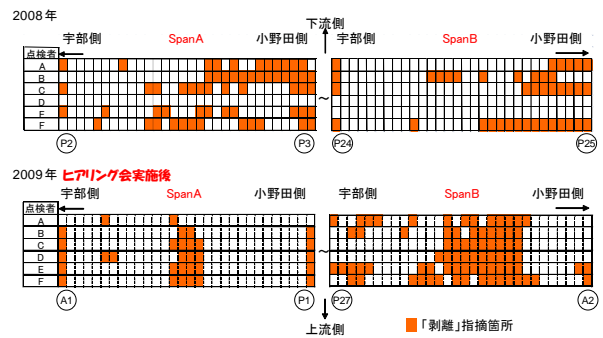


図-14 剥離の指摘箇所の比較

さらに定量的な検討を行うために、2008年および2009年の点検におけるばらつきの度合いを、式(1)に示す評価式によって算出した。

$$Q = (\sum(P \times N) / \sum N) / P_0 \quad (1)$$

ここで、

- P: 同じところを指摘した人数
- N: 指摘した人数が同じ場合の回数
- P<sub>0</sub>: 点検者の総数

である。式(1)で得られる評価値が大きいほど、点検結果のばらつきが小さいことを表す。表-1に評価値の比較を示す。

表-1 ヒアリング会前後の評価値の比較

	ひび割れ	剥離
2008年(ヒアリング会なし)	28%	47%
2009年(ヒアリング会実施後)	59%	56%

表一 1 よりひび割れ、剥離ともに、ヒアリング会を実施しなかった2008年の評価値にくらべて、ヒアリング会を実施した2009年の評価値が向上している。

### 3.5 考察

図一 13, 14において、ひび割れ・剥離ともに、ヒアリング会を実施しなかった2008年の結果にくらべて、ヒアリング会を実施した2009年の結果にばらつきが小さくなっているように見える。さらに、表一 1 において、ひび割れ、剥離ともに、ヒアリング会を実施しなかった2008年の評価値にくらべて、ヒアリング会を実施した2009年の評価値が向上している。特にひび割れについては、2倍以上の改善が示されている。このことは、本システムを用いたヒアリング会を実施したことにより、その後の目視点検の結果においてばらつきが低減したことを意味する。これは、本システムを用いて橋梁の損傷画像が示されたことで、専門家間で損傷のイメージが共有され、損傷の判定に対する議論および意見の集約が容易になったことが、点検結果のばらつきが低減した要因として考えられる。特にひび割れについては、視覚的に明確なひび割れ画像を提示したことで、ひび割れ損傷のイメージを共有でき、その結果ひび割れの点検結果のばらつきが半減したと考えられる。このことから本システムは、点検技術者間で損傷のイメージの共有および議論の情報を提供でき、さらには点検結果のばらつきの低減に寄与できる有用なツールであると言える。

### 4. まとめ

本論文では、橋梁の目視点検の教育および点検結果の検討を支援する目的で開発した、バーチャルリアリティを活用した橋梁目視点検支援システムについて述べた。まず、本システムの目的について述べ、本システムの活用法を提案した。次に、本システムの構築手順について述べた。さらに、実橋の目視点検結果のばらつきについて、本システムを用いた事前ヒアリング会を実施した2009年の結果と、ヒアリング会を実施しなかった20

08年の結果とを比較し、本システムの効果を検証した。その結果、本システムを用いたヒアリング会を実施した場合の点検結果においてばらつきが低減し、本システムが点検結果のばらつき低減に寄与できる有用なツールであることが示された。

今後の課題として、本システムのもう一つの活用法である目視点検の技術教育において、本システムの有効性を検討することがあげられる。さらに、橋梁の損傷を多角的に検討・理解するために、コンクリートコアの材料試験データやハンマー打音データの付加、断面図による劣化・損傷のプロセス表示などの機能を付加することも課題である。

**謝辞** 本研究に対して有益な議論を行っていただきました電気化学工業㈱の高橋順氏および㈲ミツワ電器の江本久雄氏に感謝いたします。また、実橋の目視点検調査に協力していただいた専門家の方々に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 江本久雄, 高橋順, 宮本文穂, 今井宏: 専門家による既存RC橋の目視点検結果と評価のばらつき, 土木学会第64回年次学術講演会講演論文集, VI, 372, 2009.
- 2) 道路橋の予防保全に向けた有識者会議: 道路橋の予防保全に向けた提言, <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/maintenance/>, 2008.
- 3) Sherman W.R. & Craig A.B.: *Understanding Virtual Reality: Interface, Application and Design*, Morgan Kaufmann, 2003.
- 4) Miyamoto A., Konno M. & Rissanen T.: "VR-based education system for inspection of concrete bridges", *Computers and Concrete*, Vol. 3, No. 1, pp. 29-42. 2006.
- 5) 内村俊二, 江本久雄, 高橋順, 宮本文穂: 目視点検を対象とした既存RC橋の点検者教育システムの開発, 土木学会第64回年次学術講演会講演論文集, VI, 373, 2009.