

3次元開口合成アレイ検査装置 Matrixeye™ の 橋梁鋼床版検査への適用

Self-Propelled Ultrasonic Testing System for Steel Plate Deck Bridges Applying Matrixeye™
3D-SAFT Array Inspection Equipment

唐沢 博一

池田 賢弘

村野 益巳

山崎 文敬

■ KARASAWA Hirokazu

■ IKEDA Takahiro

■ MURANO Masumi

■ YAMASAKI Fuminori

高度経済成長期に建設された橋梁(きょうりょう)の老朽化が進むなか、点検手法の高度化と効率化が課題となっている。

東芝は、一般財団法人 首都高速道路技術センター及び(株)イクスリサーチと共同で、首都高速道路などの高架橋で多く使用されている鋼床版Uリブ(U字型補強材)部の検査への適用を目指して、航空機機体や自動車ボディなどの産業分野での検査に使用されている3次元開口合成(3D-SAFT(SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique))アレイ検査装置 Matrixeye™と、既に橋梁鋼床版の検査に使用されている探傷ロボットを組み合わせ、自走しながら微小な亀裂を検出できる橋梁鋼床版検査用UT(Ultrasonic Testing)システムを開発した。模擬試験体を用いて試作品の性能を検証した結果、十分な欠陥検出性能を持つことを確認できた。

In response to the deterioration of bridges constructed during the high-growth era in Japan, the sophistication and optimization of defect inspection techniques in this field have recently been attracting attention.

Toshiba, in corporation with Highway Technology Research Center and iXs Research Corporation, has been developing a self-propelled ultrasonic testing (UT) system for steel plate deck bridges with the aim of applying it to the inspection of U-rib steel plate decks that are widely used in highway viaducts. This system consists of the Matrixeye™ portable type three-dimensional synthetic aperture focusing technique (3D-SAFT) array inspection equipment produced by Toshiba, which is used in industrial fields such as defect inspection of aircraft and automobile bodies, and a self-propelled robot produced by iXs Research Corporation, which has already been used to inspect cracks on steel plate deck bridges, equipped with two Matrixeye™ UT array probes. We have confirmed the performance of the system for the inspection of small defects through verification tests using test plates with simulated defects.

1 まえがき

ポータブル3D-SAFTアレイ検査装置 Matrixeye™ (図1)⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾は、超音波アレイプローブ(以下、アレイプローブと略記)を用いて収集した超音波エコーデータに独自に開発した3D-SAFT法を用いることで高精度の3D画像を表示できることを特長としている。この特長を生かし、航空機部品(CFRP(Carbon-Fiber Reinforced Plastic)製の部品など)や、自動車部品(アルミニウムダイキャストやスポット溶接部)、鋼材(配管溶接部や母材)などの検査に適用している。ここでは、3D-SAFT法の原理とその特長、及び橋梁鋼床版検査用UTシステムへ適用して探傷性能を評価した結果について述べる。

2 3D-SAFTアレイ検査装置 Matrixeye™

2.1 装置の概要

Matrixeye™の基本仕様を表1に示す。64ch(チャンネル)のアレイプローブを電子スキャンし、サンプリング周波数80MHzで分解能12ビットのA/D(アナログ/デジタル)変換器で高速収集した超音波エコーデータを3D-SAFTアルゴリズムで合成処理し、3D画像を高速かつ高精度で表示できる。実際の検



図1. Matrixeye™ — アレイプローブで収集した超音波エコーデータを3D-SAFTアルゴリズムで合成処理し、検査対象の内部を3D画像化できる。
Matrixeye™ portable type 3D-SAFT array inspection equipment

査では、アレイプローブを検査対象物の表面上で接触媒質(水又はゲル状の液体)を介してスキャンすることにより、検査対象物内部を3D画像化できる。

2.2 機能の概要

Matrixeye™で得られる検査結果の例として、リニアアレイプローブ(5MHz, 64素子)を垂直探傷でスキャンし、CFRPの内部に発生した剥離を画像化した結果を図2に示す。平面

表 1. Matrixeye™ の基本仕様
Basic specifications of Matrixeye™

項目	仕様
寸法	305 (幅)×210 (高さ)×130 (奥行き) mm
質量	5 kg (バッテリー1個搭載時)
A/D変換器	80 MHz 12ビット
プロセッシング	48 並列回路
画像更新速度	25 フレーム/s 以上 (64 素子リニアアレイ)
送受 ch	64 ch
周波数帯域	2~25 MHz
CPU	Intel® Atom™ D510 1.66 GHz
インタフェース	Ethernet™ 1000BASE-T
ハードディスクドライブ	500 Gバイト

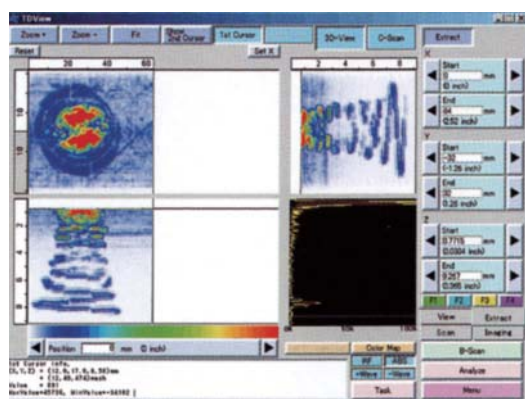


図 2. CFRP 内剝離の表示画像例 — 平面画像と直行する両サイドから見た側面画像により立体的に把握することが可能である。
Example of display showing delamination within carbon fiber reinforced plastic (CFRP)

画像と直行する両サイドから見た側面画像により立体的に把握することが可能である。また、専用の鳥瞰（ちょうかん）画像表示ビューワ（3D Bird's Eye Viewer）により臨場感のある 3D 画像をオフラインで表示することもできる。

もう一つの例として、厚さ 10 mm の鋼材の突合せ溶接部を、10 MHz のアレイプローブで斜角探傷して得られた溶込み不良の断面（S-scope）画像を図 3 に示す。

2.3 3D-SAFT 法の原理

Matrixeye™ の特長である 3D-SAFT 法は、数百から数万点もの多数の送受信パターンで得られた超音波エコーデータを統計的に処理することにより、高解像度で高感度の 3D 画像を得る手法であり、具体的には次の特長を持っている。

- (1) 少ない素子数で高解像度の 3D 画像が得られる
- (2) 距離変化に対して解像度の変化が小さい
- (3) 周波数変化に対して解像度の変化が小さい
- (4) 多数の波形を加算して画像化するため、SN 比（信号対雑音比）改善効果がある

次に、この原理について述べる。図 4 において、圧電振動



*1：底面からの反射により生じる鏡像
*2：1 回目の反射（1 スキップ）により生じた表面の鏡像

図 3. 突合せ溶接不良部の断面（S-scope）画像例 — 厚さ 10 mm の鋼材の突合せ溶接部を、10 MHz のアレイプローブで検査して得られた溶込み不良の断面（S-scope）画像の例である。

Example of cross-sectional (S-scope) display of poorly welded part

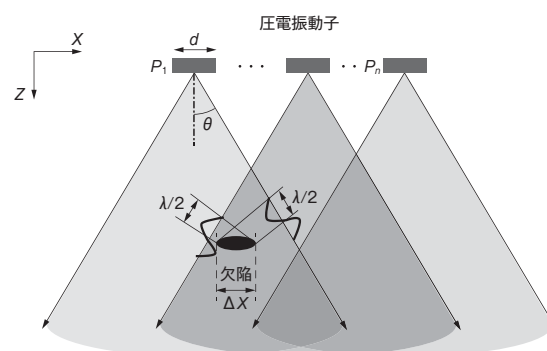


図 4. 3D-SAFT 処理の原理 — 広いビームを電子スキャンして送信し、全開口で受信することで、多数の経路で超音波を送受信する。受信した多数の超音波データから 3D 画像を生成する。

Principle of 3D-SAFT

子は指向性の広いビームを発信しているため、圧電振動子を P_1 から P_n まで電子スキャンすると、反射源で反射された波を受信するまでに要する遅れ時間が変化する。そこで、 P_1 から P_n に電子スキャンする間に得られた多数の反射信号を圧電振動子の位置変化に応じてマッピングし、同一地点からの反射エコーが重なるように加算することにより反射源における対象物の像を再生できる。このとき、水平方向の解像度 ΔX は、超音波の半波長の X 方向への射影成分になるため、式(1)で表せる。

$$\Delta X = (\lambda/2) \times (1/\sin \theta) \quad (1)$$

$$\theta = \text{Arcsin}(k \times \lambda/d)$$

ここで λ は超音波の波長、 θ は指向角、 k は定数、 d は圧電振動子径である。

k の値は、 θ を超音波強度のピークの-16 dB幅とすると0.71であり、完全に0に落ちる幅（ゼロ指向角）とすると1.41である。このため、代表値として $k=1$ とすると、 $\sin \theta = \lambda/d$ となり、 ΔX は式(2)で表される。

$$\Delta X \approx (\lambda/2) \times (d/\lambda) = d/2 \quad (2)$$

すなわち、 ΔX は、 $d/2$ となり、 λ （周波数に反比例する）にも欠陥までの距離 Z にも依存しない。つまり、解像度が欠陥までの距離やプローブの周波数に関わらず一定であることを示している。

2.4 フェーズドアレイ SAFT

Matrixeye™では、2.3節で述べた3D-SAFT法にフェーズドアレイ技術を融合させた“フェーズドアレイSAFT”技術を新たに開発して適用している。フェーズドアレイSAFTは、3D-SAFT法の特長である均一性と高解像度に加えて更なる感度向上と高速化を実現できる特長を持っている。

フェーズドアレイSAFTの概要について、セクタスキャンを例として図5に基づいて以下に述べる。

- (1) 送信ビームが一つの焦点に収束するように複数の圧電振動子（赤色の素子）のタイミングを制御しながら超音波を送信し、反射波形を複数の素子で受信し、受信波形をA/D変換して画像化処理装置に保存する。
- (2) 焦点位置を一定角度で変更しながら(1)の操作を繰り返して、全ての受信波形データをメモリ上に保存する。
- (3) 高速並列演算回路において、メモリに格納された受信波形データに対して、送信から画像化メッシュ（3D画像化する領域内に設定する）で反射して受信されるまでのフライトタイム T_0 （欠陥からの反射波の遅れ時間）に相当する振幅値を取り出し、各画像化メッシュに加算する手順で3D画像を合成する。
- (4) この処理を全受信波形と全画像化メッシュの全ての組合せで繰り返すことにより、全領域で解像度が均一で、バックグラウンドノイズレベルが低減された3D超音波画

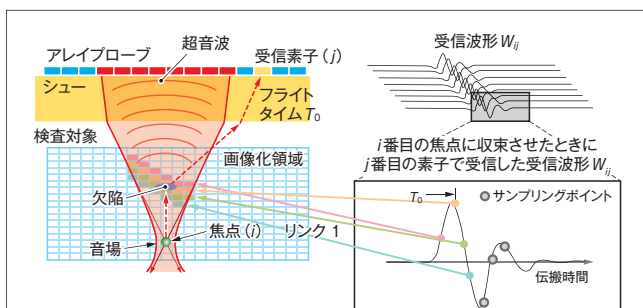


図5. フェーズドアレイSAFTの原理 — 焦点位置を制御しながら、各焦点に応じて得られる受信波形データを瞬時に合成処理重ねることで、高解像度で高感度の3D画像化を実現した。

Principle of phased-array SAFT

像を合成できる。

ここで述べた T_0 の計算においては、シュー^(注1)や水などから成る音響媒体と検査対象の境界での屈折を考慮して計算することにより、検査対象物中の音速、対象物の形状、及び斜角探傷への対応を可能にしている。

3 橋梁鋼床版検査用UTシステムへの適用

開発した橋梁鋼床版検査用UTシステムの全体構成を図6に示す。開発における改良点は次のとおりである。

- (1) 2個のアレイプローブを搭載できる自走ロボットを開発することで、橋梁鋼床版とUリブ溶接部を同時並行で探傷することが可能。自走ロボットは、一般財団法人 首都高速道路技術センター、(株)イクスリサーチが共同開発した鋼床版超音波探傷ロボット SAUT ROBOTをベースに開発
- (2) Matrixeye™に対応したアレイプローブを適用することで、検査部を高精度で3D画像化することが可能
- (3) 2個のアレイプローブによる探傷検査を同時並行にリアルタイム表示及び保存できるUI（ユーザーインタフェース）ソフトウェアを新たに開発

これらの改良点の具体的な成果について、次に述べる。

3.1 自走ロボットの開発

SAUT ROBOTをベースに改良した自走ロボットは、次の特長を持っている。

- (1) 永久磁石により、鋼床版デッキ面及びトラフ面^(注2)に吸着できる
- (2) モータを搭載しトラフ面の溶接ビードに沿って前後に移動できる
- (3) 有線（約6mのケーブル）で遠隔操縦できる
- (4) 操作箱に配置された四つのボタン（前進又は後進、及び高速又は低速）でロボットを制御できる

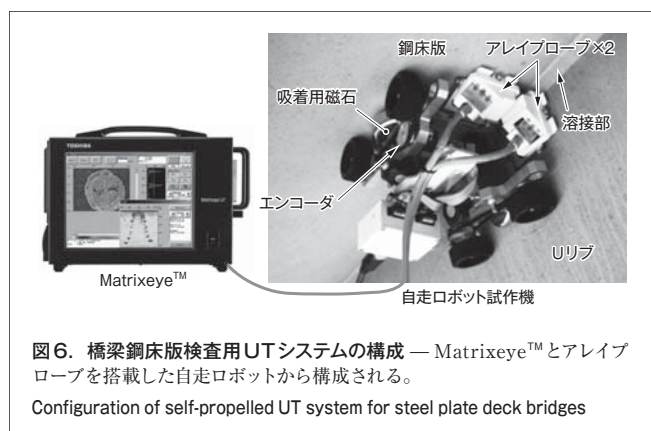


図6. 橋梁鋼床版検査用UTシステムの構成 — Matrixeye™とアレイプローブを搭載した自走ロボットから構成される。

Configuration of self-propelled UT system for steel plate deck bridges

(注1) アレイプローブの前面に密着させる固体の音響媒体。

(注2) Uリブの側面。

- (5) 外部に設置された再充電可能なリチウムイオンバッテリーにより通常の使用条件の下で約8時間稼働できる
- (6) 着脱ポール(約6mのアルミニウム製ポール)により、地上からロボットを着脱できる
- (7) エンコーダを搭載し、ロボットの移動距離を計測できる
- (8) Matrixeye™のアレイプローブ及びシュー各2式を搭載できる
- (9) エンコーダからの信号をトリガとしてMatrixeye™が探傷を一定ピッチで行える

橋梁点検員は、こうした機能を持つ自走式ロボットを、橋梁鋼床版裏面に設置して動作させることにより、探傷作業を実施できる。

3.2 橋梁鋼床版検査用UTシステムの探傷性能評価

探傷性能評価に用いた2種類のアレイプローブの仕様を表2に示す。

試作した自走ロボットに2種類のアレイプローブを搭載し、Matrixeye™により探傷基本性能を評価した。試験には橋梁鋼床版内部とUリブ溶接内の亀裂を模擬した試験体(図7)を用いた。亀裂模擬条件を図8に示す。

今回製作した模擬試験体の鋼床版(厚さ12mm)の模擬亀裂(高さ3, 6, 9, 及び12mm)を用いて探傷性能を検証した結果を図9に示す。

この試験により、鋼床版において、高さ3mm以上の亀裂を

検出できる性能を持つことが確認できた。

また、もう一方のUリブ(厚さ6mm)の溶接部の模擬亀裂(高さ2及び4mm)を用いて探傷性能を検証した結果を図10に示す。この試験により、Uリブ溶接部において、高さ2mm以上の欠陥検出性能を持つことが確認できた。

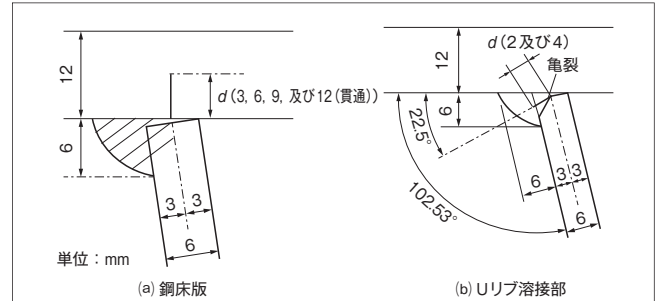


図8. 亀裂模擬条件 — 鋼床版(厚さ12mm)の模擬亀裂(高さ3, 6, 9, 及び12mm)と、Uリブ(厚さ6mm)の溶接部の模擬亀裂(高さ2及び4mm)である。

Details of simulated defects in steel floor slab and U-ribs

表2. 橋梁鋼床版検査用アレイプローブの仕様

Specifications of array probe of self-propelled UT system for steel plate deck bridges

項目	アレイプローブの仕様	
	鋼床版検査用	Uリブ溶接部検査用
周波数 (MHz)	10	10
素子数	32	32
素子ピッチ (mm)	0.6	0.4
シュー材質	ポリスチレン	ポリスチレン
屈折角 (°)	60 (横波)	60 (横波)

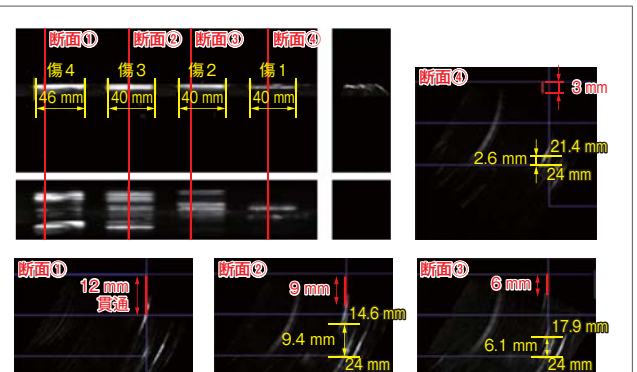


図9. 鋼床版模擬亀裂の探傷試験結果 — 高さ3mm以上の亀裂検出性能があることを確認した。

Results of flaw inspection of simulated defects in steel floor slab

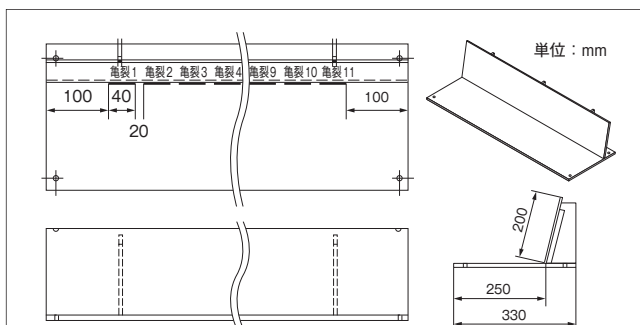
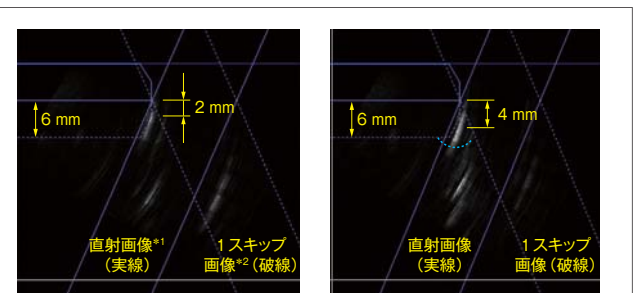


図7. 亀裂模擬試験体 — 40mm幅のスリット(亀裂)を60mmピッチで加工した。

Test plates with simulated defects



(a) リブ部 模擬亀裂2mm (b) リブ部 模擬亀裂4mm

*1: 圧電振動子から直接照射された超音波による画像
*2: 1回反射した超音波による画像

図10. Uリブ部模擬亀裂の探傷試験結果 — 高さ2mm以上の欠陥検出性能があることを確認した。

Results of flaw inspection of simulated defects in U-ribs

3.3 橋梁鋼床版検査UIソフトウェアの開発

自走ロボットに搭載した2種類のアレイプローブによる探傷検査を同時並行にリアルタイム表示及び保存できる専用UIソフトウェアを開発した。UIソフトウェアは次の基本機能を持つ。

- (1) デッキ面及びリブ面を1台のMatrixeye™で同時に処理及び表示することが可能
- (2) 探傷条件生成や、探傷条件のタスク管理、探傷実行、探傷データのオフライン表示など、橋梁探傷に必要な機能を一体化
- (3) 機能と仕様
 - ・ 受信ch: 1 ~ 64 ch
 - ・ ゲイン設定範囲: 0 ~ 80 dB
 - ・ サンプリング周波数: 10, 20, 40, 及び80 MHz
 - ・ フィルタ機能: ローパス, ハイパス, バンドパス, 及びデジタルフィルタ
 - ・ 表示機能: デッキ及びリブ同時C-scope (平面) 表示, 並びにC-scope表示クリックによる当該断面表示
 - ・ データ保存: 探傷データの保存及び再表示機能

図7に示した欠陥模擬試験体を用いて、今回試作した自走ロボットとUIソフトウェアを組み合わせた構成で、鋼床版のデッキ面とリブ面を同時探傷した性能評価試験結果を図11に示す。鋼床版のデッキ面とリブ面の2か所において、それぞれの模擬欠陥のC-scope表示とB-scope (走行方向断面) 表示を自走ロボットの動きに応じてリアルタイムで同時計測できる。また、自動保存した3D画像をオフラインで再表示し、任意の走行位置でのS-scope (素子並び方向の断面) 表示で詳細観察や欠陥のサイジング評価を行うこともできる。

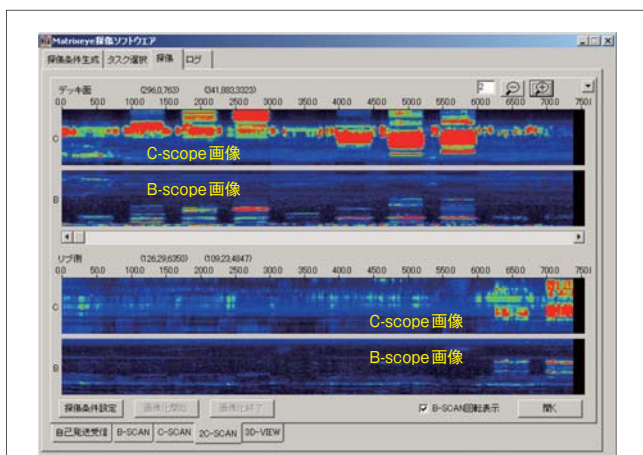


図11. 自走ロボットとUIソフトウェアの組合せ性能試験結果 — 鋼床版のデッキ面とリブ面の2か所において、それぞれの模擬欠陥のC-scope表示とB-scope表示を自走ロボットの動きに応じてリアルタイムで同時計測する。

Result of combined performance test of self-propelled robot with user interface (UI) software

4 あとがき

物体の内部状況を直接3D画像として可視化できるポータブル3D-SAFTアレイ検査装置Matrixeye™と、自走ロボット技術を組み合わせた橋梁鋼床版検査用UTシステムの開発成果について述べた。開発した装置は、現在も改良を進めており、更に高性能で効率的な非破壊検査を可能にすることで、橋梁鋼床版の検査だけでなく、各種の鋼製インフラ構造物やプラント機器などの信頼性・安全性向上への貢献を目指す。

文 献

- (1) Karasawa, H. et al. Development of Under-sodium Three-dimensional Visual Inspection Technique Using Matrix-arrayed Ultrasonic Transducer. Journal of Nuclear Science and Technology. 37, 9, 2000, p.769-779.
- (2) 阿部素久 他. ポータブルタイプ3D 超音波検査装置Matrixeye™. 東芝レビュー. 60, 4, 2005, p.48-51.
- (3) 唐沢博一 他. 特集 フェイズドアレイ超音波技術の最近の展開: 3次元開口合成 (3D-SAFT) アレイと適用事例. 非破壊検査. 56, 10, 2007, p.520-524.
- (4) Karasawa, H. et al. "3D-SAFT Ultrasonic Inspection Equipment "Matrixeye™". Proceedings of the 7th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. Yokohama, Japan, 2009-05, European Commission Joint Research Centre. 2009, p.669-683.

・ Intel. Intel Atomは、米国又はその他の国におけるIntel Corporationの商標。
・ Ethernetは、富士ゼロックス(株)の商標。



唐沢 博一 KARASAWA Hirokazu

東芝電力検査サービス(株) 検査装置部主幹。
3D超音波検査装置の技術開発に従事。
Toshiba Power Systems Inspection Services Co., Ltd.



池田 賢弘 IKEDA Takahiro

研究開発統括部 マーケティング戦略室参事。
非破壊検査の新規事業開発を経て、2014年5月からインフラヘルスマonitoringプロジェクトに従事。
Marketing Strategic Office



村野 益巳 MURANO Masumi

一般財団法人 首都高速道路技術センター 構造技術部課長。
鋼構造物の疲労損傷対策及び非破壊検査手法・装置の研究・開発に従事。
Highway Technology Research Center



山崎 文敬 YAMASAKI Fuminori

(株)イクスリサーチ代表取締役。
ロボット開発に従事。日本ロボット学会代議員, 日本ロボット学会実用化技術賞選考小委員会委員。
iXs Research Corp.