

# 点群データを用いた 橋梁パラメトリックモデルの生成に関する研究

窪田 諭<sup>1,a)</sup> 塚田 義典<sup>2</sup> 梅原 喜政<sup>3</sup> 田中 成典<sup>4</sup>

受付日 2020年8月14日, 採録日 2021年2月2日

**概要:** 国土交通省では、橋梁の維持管理の効率化および高度化を図ることを目的として、3次元モデルの作成仕様や表記標準を策定している。維持管理の主体は既設橋梁であり、紙図面等から仕様に基づいた3次元モデルを生成することは容易ではない。そのため、既研究では、地上型レーザスキャナやカメラ搭載UAVにより取得した点群データをもとに構造物の縁や面を推定して3次元モデルを生成する手法が提案されてきた。しかし、橋梁をつねに全方向から計測できるとは限らないため、既研究の適用場面は限定的である。こうした背景の下、著者らは、産官学の連携体制を構築し、維持管理を基軸とした橋梁パラメトリックモデリングの在り方について検討を進めてきた。本研究では、組合せ最適化アルゴリズムを用いた点群データとパラメトリックモデルの適合手法を提案し実験した。これにより、構造物を限なく計測できない場合でも、点群データから地物の概形を保持した3次元モデルの生成が可能となることを示した。

**キーワード:** 橋梁, 維持管理, 点群データ, 組合せ最適化, パラメトリックモデル

## Research for Generating Parametric Model of Bridge Using Point Cloud Data

SATOSHI KUBOTA<sup>1,a)</sup> YOSHINORI TSUKADA<sup>2</sup> YOSHIMASA UMEHARA<sup>3</sup> SHIGENORI TANAKA<sup>4</sup>

Received: August 14, 2020, Accepted: February 2, 2021

**Abstract:** The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) has developed specifications and description standards for the creation of 3D models in order to maintain and manage bridges efficiently. The main target of maintenance is the existing bridges. It is not easy to generate a 3D model using a paper drawing. Existing studies have proposed methods to generate 3D models by estimating the edges and surfaces of structures from point cloud data using TLS and UAV. However, it is not always possible to measure a bridge from all directions, so the application of existing research is limited. The authors have established a partnership between industry, government and academia to investigate parametric modeling of bridges for maintenance. In this research, we propose a method of fitting point clouds to parametric models using an optimizing method. This is able to generate a 3D model that preserves the general shape using point cloud data, even in places where structures cannot be measured from all directions.

**Keywords:** bridge, maintenance, point cloud data, combinatorial optimization, parametric model

<sup>1</sup> 関西大学環境都市工学部  
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

<sup>2</sup> 摂南大学経営学部  
Faculty of Business Administration, Setsunan University, Neyagawa, Osaka 572-8508, Japan

<sup>3</sup> 関西大学先端科学技術推進機構  
Organization for Research and Development of Innovative Science and Technology, Kansai University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

## 1. はじめに

道路、港湾、鉄道、電力、ガス等の社会基盤施設においては、公共事業投資の減少と熟練技術者の不足という制約の中

<sup>4</sup> 関西大学総合情報学部  
Faculty of Informatics, Kansai University, Takatsuki, Osaka 569-1095, Japan

a) skubota@kansai-u.ac.jp

で、高度経済成長期に整備された施設が更新期を迎え、限られた予算で増大する維持管理需要を賄いつつ、公共サービスの水準を維持するという厳しい課題に直面している。これらの解決のために、建設事業の生産性向上を目指して、国土交通省は、Building Information Modeling (BIM) [1] の概念に基づく Construction Information Modeling (CIM) [2] の導入を提唱し、設計段階で生成される 3 次元データを用いて施工・維持管理の高度化と効率化を目指している。BIM は、建築物の 3 次元データをコンピュータ上に作成し、それにコストや仕上げ、管理情報等の属性情報を追加したデータベースを設計、施工、維持管理の工程で活用するものである。CIM は、BIM の対象を社会基盤施設に拡大し、建設生産プロセスの高度化を図ろうとするものである。さらに、国土交通省は、i-Construction [3] を推進し、情報通信技術の全面的な活用、全体最適の導入、施工時期の平準化を施行している。

本研究では、社会基盤施設のうち、橋梁を対象とする。わが国には、橋梁が約 70 万橋あり、そのうち橋長 15 m 以上の橋梁は約 15 万橋ある。CIM や i-Construction を有効に実現するために、設計・施工段階だけでなく、膨大な橋梁の維持管理に向けて 3 次元データの流通基盤の重要性が高まっている。

橋梁の維持管理においては、その形状を正確に把握する必要がある。道路橋示方書では、維持管理に必要な設計図の記録や情報を保存することが規定されているが、1970 年代前後に建設された道路橋の図面は紙媒体であることが多く、工事請負契約の履行期間を経過した後に廃棄される。設計図面が存在しない場合には、現地での再測量が必須である。しかし、橋梁の約 7 割が市区町村管轄であることを考えると、すべての橋梁を再測量することはコスト面でも人的資源の面でも困難である。そこで、Mobile Mapping System (MMS) や地上型レーザスキャナ (Terrestrial Laser Scanner : TLS) のレーザ計測機器と、無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) による空中写真測量で用いられるデジタルカメラを用いて橋梁の 3 次元形状を計測することが考えられる [4]。MMS は、デジタルカメラと 3 次元レーザスキャナを搭載した専用車両を用いて道路周辺の点群データを計測するシステムである。TLS は、固定設置した位置からレーザを照射して対象までの距離を計測し、実環境のオブジェクトを点群データで取得できる。写真測量技術を用いる場合は、UAV にデジタルカメラを搭載し、上空から撮影した画像から対象物の幾何形状を 3 次元で把握できる点群データを生成する。一方、これらの手法で取得した点群データは膨大であり、レーザ光の乱反射や画像対応点の誤検出等ともなう計測誤差を含むことがつねである。そのため、既研究では、点群データから構造物の端点を手動で選択し、3 次元 CAD データや数値解析が可能な FEM モデルを生成する手法 [5], [6] が提

案されている。これらの研究では、点群処理や CAD 等の複数のソフトウェアを駆使し、点群データの間引き、エッジ検出、モデル生成、数値解析等の一連の作業を行うため、手間がかかる。そこで、点群データから半自動的に道路橋の 3 次元モデルを生成する手法 [7], [8], [9], [10] や規格部材を自動抽出する手法 [11], [12], [13], [14] が提案されている。既存研究 [7], [8] では、路面の横断形状と断面が変化する点を推定し、隣接する横断面を接続することにより 3 次元モデルを生成する。また、既存研究 [11], [12], [13], [14] では、点群データから部材ごとの領域境界点と平面領域を推定し、それらをグループ化することにより、3 次元モデルを生成する。これらの手法は、いずれも膨大な点から対象部位のモデル化に必要な点を選択する方針といえる。しかし、現場では、橋梁を全方向から隈なく計測できるとは限らない。特に、交通量の多い高架道路橋や植栽の繁茂する山間部の人道橋等では、1 方向からの計測に限定され、構造物の角の点群データを取得できない場合がある。既存研究では、このような未計測箇所を含む点群データを想定していないという課題がある。

そこで、本研究では、あらかじめ定義されたテンプレートに対応する寸法値を入力して 3 次元モデルを構築するパラメトリックモデリングに着眼し、点群データに最も合致するパラメータを組合せ最適化アルゴリズム [15] によって導出するモデリング手法を提案する。これにより、対象を隈なく計測できていない点群データであっても、地物の概形を保持した 3 次元モデルをより精確に生成できることを検証する。

本論文では、2 章で、点群データの計測手法と特性を整理し、提案手法の必要性について述べる。3 章では、産官学連携により検討を進めている維持管理を基軸とした橋梁パラメトリックモデルの仕様について述べる。4 章では、点群データから仕様に準拠した橋梁パラメトリックモデルを生成する手法について述べる。5 章では、実証実験より、提案手法の有用性について考察する。最後に、6 章で本論文を総括する。

## 2. 点群データの計測手法と特性の分析

### 2.1 計測に用いられる機器

橋梁の点群データを取得するためには、MMS, TLS およびカメラ搭載 UAV による計測が行われる。これらの機器は、社会基盤施設を対象とする土木、建築、測量の分野に限らず、プラント、造船等の分野における大規模設備の設計、施工、検査、保守等においても導入されている。これらの機器を単独または複数で利用し、対象の構造物や状況に適した計測技術を組み合わせることにより、屋内外の様々な場面において 3 次元データを取得することができる。複数の計測機器を組み合わせることで橋梁の 3 次元データを取得し活用するためには、計測機器の特性を理解して計測

するとともに、その特性に基づき計測データの取舍選択やデータ融合を行うことが必要である。

点群データは、xyz座標を持つ点の集合である。点群データには、座標  $(x, y, z)$  に加え、反射強度のRGBカラーが付加されることもある。各計測機器には、設置場所の制約や測距距離、社会基盤施設を計測する際の点群データの密度、植生や移動体等によるノイズ等により取得できる点群データが異なるという特性がある。

## 2.2 計測機器の特性

### (1) Mobile Mapping System (MMS)

MMSは、車両上部に自己位置と姿勢を計測するGNSS (Global Navigation Satellite System) 受信機、慣性計測装置、車速・走行距離計および対象物を計測するためのセンサを搭載して、移動しながら道路や河川等の構造物を計測する技術である。計測センサとして、レーザ計測装置が主に用いられ、対象物を高精度かつ高密度に計測し、点群データを取得することができる。また、デジタルカメラに加えて、全周囲カメラ、熱赤外線カメラやハイパースペクトルカメラ等が搭載され、目的に応じて様々なデータが取得される。MMSは、高精度に点群データを計測できるが、レーザスキャナを車両上部に搭載するため、車両が進入できない災害現場等での活用には不向きであり、整備された道路表面や道路周辺施設を計測することが主な利用用途となる。

### (2) 地上型レーザスキャナ (TLS)

TLSによる計測 (図1) では、地面に三脚を立ててスキャナを設置し、放射状にレーザを照射して、それを受光するまでの時間と光の速度から対象物までの距離を計測して周囲の点群データを取得する。そのため、対象物を俯瞰できる場所に機器を設置することが望ましい。

### (3) カメラ搭載 UAV

デジタルカメラ等を搭載した UAV (図2) による空中



図1 地上型レーザスキャナ (FARO Focus3D)

Fig. 1 Terrestrial laser scanner (FARO Focus3D).

写真測量では、航空法を遵守したうえで、UAVの飛行によって得る映像また画像データから写真測量技術の原理による SfM (Structure from Motion) 処理により点群データ (図3) を得る。SfMは、対象とする物体をカメラの視点を変えながら撮影した複数の画像から対象物の3次元データを構築する技術である。SfMによる3次元データの構築には、写実性が高く、現場を理解しやすいという利点がある。一方、写真がもとであるため植生が再現され、対象構造物や地形を正確に表現できないことや、天候や時間により刻々と変化する状況のある時点を表現するデータとなることに留意する必要がある。

### 2.3 点群データの特性

計測機器によって取得した点群データには、次の特性がある。

- 計測機器には可視および不可視領域があり、計測現場の影響を受けるため、1つの機器のみで、対象構造物を隈なく計測することが難しい。
- 点群データには、地表面、植生や移動体等のノイズが含まれる。
- 点群データの精度は、個々の計測機器に係わる要因と計測機器の設置位置等に係わる要因の影響を受ける。MMS、TLSとカメラ搭載 UAV のデータは点密度が高く、オブジェクトの形状を鮮明にとらえることができる。ただし、カメラ搭載 UAV のデータではエッジ部分 (縁や角) が曖昧になる。また、1方向からの計測では、対象物を隈なく表現できる点群データを取得できない。



図2 カメラ搭載 UAV (DJI Inspire2)

Fig. 2 Camera mounted on unmanned aerial vehicle (DJI Inspire 2).

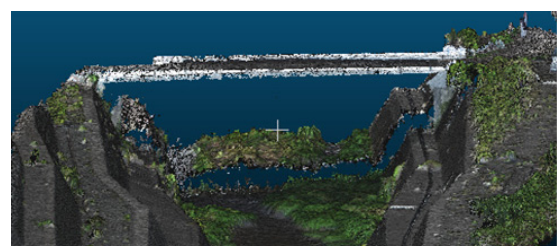


図3 カメラ搭載 UAV による点群データ

Fig. 3 Point cloud data generated by camera mounted on UAV.

表 1 計測機器の特性

Table 1 Characteristics of measurement instruments.

計測機器 比較項目	Mobile Mapping System (MMS)	地上型レーザスキャナ (TLS)	カメラ搭載 UAV
計測の特徴	走行するだけで周囲の3次元データを計測できる	一地点から高精度に計測できる。広域を計測する場合には、移動・設置・計測を繰り返す必要がある	点群データを生成するまでの画像処理に時間を要する
計測条件	GNSS 計測可能なエリア	どこでも	夜間飛行不可，真暗環境ではデータ生成不可
事前申請	不要（現場許可のみ）	道路使用許可申請必要	飛行申請必要
可視領域	走行可能エリア周辺	設置可能エリア周辺	飛行可能エリア周辺
不可視領域	構造物の上面や道路下の斜面等のレーザ光が当たらない箇所は計測できない。走行困難な狭い路地等は計測できない	構造物の上面等の設置位置からレーザ光が当たらないエリアは計測できない	オーバーハング箇所や構造物の側面は計測できない
計測精度 (参考値)	誤差：±5～10cm	誤差：±1～2cm	誤差：±5～10cm
点密度	数 cm (走行速度依存)	数 mm～cm (計測パラメータ依存)	数 cm (ソフトウェアとパラメータ依存)
測距点の分布	非一様	非一様	非一様 (ソフトウェア依存)
エッジ (角) の計測	明瞭	明瞭	不明瞭 (ソフトウェア依存)
点群データの座標系	平面直角座標系 (精度担保のために標定点の設置・計測が必要)	機械位置を基準とするローカル座標系	平面直角座標系 (対空標識の設置と測量が必要)
主な利用場面	地図生成，道路点検	起工測量，出来形管理，屋内外の構造物計測	起工測量，出来形管理

以上の計測機器の特性を表 1 に整理する。表では、計測の特徴、計測条件、事前申請、計測範囲（可視領域、不可視領域）、計測精度、点密度、測距点の分布、エッジ（縁や角）の計測、座標系、主な利用場面で整理した。いずれの計測機器も一長一短であるため、これらの特性に基づいて機器を適切に組み合わせて利用することにより、高精度な 3次元データを構築することができる。たとえば、橋梁計測では、上部工の路面等の計測には、MMS や TLS が適している。床版の計測では、桁下から見上げるように計測する必要があるため、TLS が適している。下部工は、現場周辺の走行または機器設置が困難な場合は、カメラによる計測が適している。このように、地物の表層を隈なく計測するためには、複数の計測手段を併用する必要がある、手間がかかる。加えて、植生がレーザ光を遮蔽する場合や接近計測が困難な場合、電線が接近しており UAV の飛行に危険がともなう場合等、現場ごとの制約条件が生じる。したがって、橋梁全体を隈なく計測することは困難であり、このような状況下で取得した点群データからでも、用途に即した 3次元モデルを生成できる技術が必要である。

### 3. 橋梁のパラメトリックモデル

著者らは、2019 年 8 月に一般財団法人日本建設情報総合センター (JACIC) の社会基盤情報標準化委員会より採択を受け、維持管理を基軸とした橋梁のパラメトリックモデリングの標準化検討小委員会 [16] を設立した。この小委員会では、既設橋梁を MMS, TLS や UAV 等で計測した点群データからパラメトリックモデリングによって 3次元モデルを構築し、プロダクトモデルの標準規格である ISO10303 (STEP: Standard for the Exchange of Product Model Data) に準拠して表現するための指針を検討している。現在、橋梁の維持管理に有用な詳細度の 3次元モデルの在り方について、橋梁プロダクトモデルである IFC (Industry Foundation Classes) [17], CIM モデル [18], [19], [20], プロダクトモデル [21] 等の関連仕様との整合を図りつつ、協議を重ねている。

#### 3.1 パラメトリックモデルの概要

パラメトリックモデルは、寸法値や角度等の複数のパラ

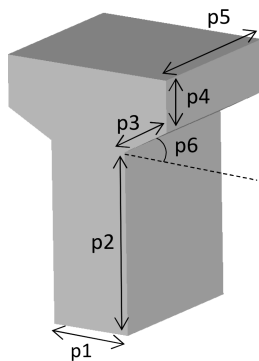


図 4 T 型橋脚のパラメトリックモデル

Fig. 4 Parametric model of T-shaped pier.

表 2 T 型橋脚の各種パラメータと拘束条件

Table 2 Parameters and constraint condition of T-shaped pier.

パラメータ	パラ	寸法値 (単位 : m)
パラメータ	p1	寸法値 (単位 : m)
	p2	寸法値 (単位 : m)
	p3	寸法値 (単位 : m)
	p4	寸法値 (単位 : m)
	p5	寸法値 (単位 : m)
	p6	角度 (単位 : 度)
制約条件	p1とp2, p4とp5は垂直であること	
	p2とp4は平行であること	
	p6は0度より大きく90度未満であること	
スケッチ	p1からp4, p6で構成される平面とする	
操作履歴	p5による押し出しとする	

メータを組み合わせることで構造物の概形を定義したものである。橋梁は現地地形に合わせて様々な形状を有しており、パラメトリックモデリングを採用することにより、寸法等のパラメータを適宜変更して、既設橋梁の3次元モデルをより正確に生成する。

一例として、橋梁下部工のT型橋脚のパラメトリックモデル(図4と表2)は、6つのパラメータと3つの制約条件を保持する。各種パラメータの値は、構造物ごとに異なるため定めない。ただし、概形を維持するために、パラメータ間の平行や垂直等の幾何的特徴と、パラメータ間の大小関係等の制約条件を持つ。

### 3.2 パラメトリックモデルのデータ構造

パラメトリックモデルのデータ構造は、CADにおけるパラメトリックモデリングとの連携を図るため、図5に示すとおり、ISO10303 (STEP) に準拠する。具体的には、2次元のスケッチ平面上で対象構造物の横断または縦断形状を作成し、それを押し出したりスweep操作によって3次元の幾何形状を構築[22]する。スケッチは、線分や折線等の幾何フィーチャを用いて地物の2次元形状を定義したものである。幾何フィーチャは、互いに平行や直角等の拘



図 5 ISO10303 (STEP) に準拠したデータ構造

Fig. 5 Data structure based on ISO 10303 (STEP).

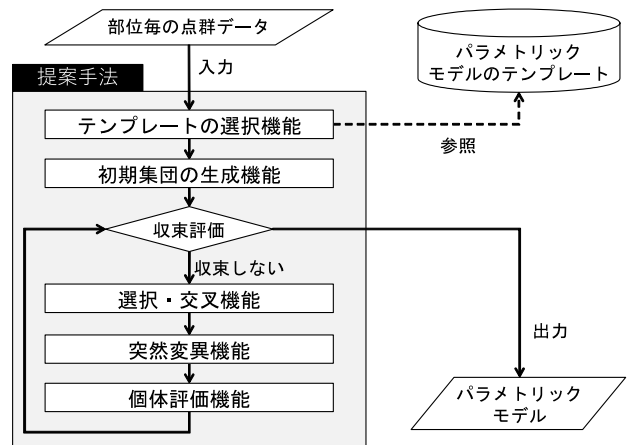


図 6 処理の流れ

Fig. 6 Processing flow of the proposed method.

束条件を保持する。これにより、任意の寸法値を変更すると、位相を保持した状態でモデルが再生成される。前述のT型橋脚(図4)では、スケッチはp1からp4, p6で構成される平面であり、p5の寸法値だけ押し出して作成する。

## 4. 提案手法

本研究では、MMSやTLS等を用いて取得した現況橋梁の点群データをパラメトリックモデルのテンプレートに重ね合わせ、最もフィッティングする寸法値を組合せ最適化アルゴリズムによって導出する。提案手法は、点群データからエッジや平面を抽出して3次元モデルを作成する既存手法[7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]と異なり、計測対象を限らず計測できていない点群データからも、維持管理に有用な詳細度の3次元モデルを生成する。

処理の流れを図6に示す。提案手法における入力データは部位ごとに分割済みの点群データとし、出力は各種パラメータが決定済みのパラメトリックモデルとする。なお、計測成果の点群データを部位ごとに分割する処理は、点群編集アプリケーションを用いて手動で行うか、AI等の機械学習による自動識別手法[23]の利用を想定している。組合せ最適化には、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms, 以下GAという)[15]を使用する。GAは、生物が交叉、突然変異、淘汰を繰り返して環境に適合する進化の過程を模したアルゴリズムである。提案手法は、テンプレートの選

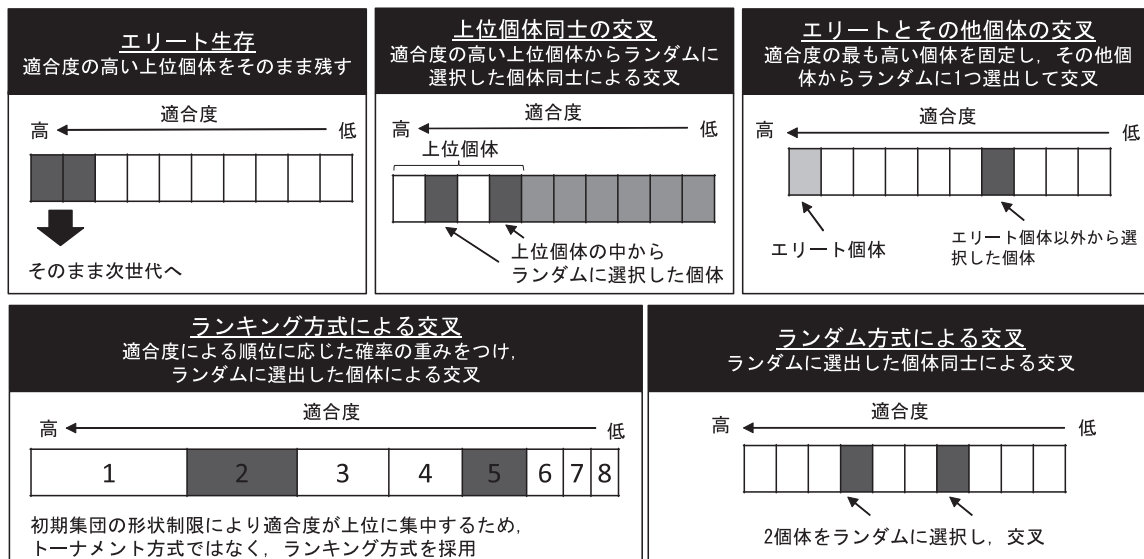


図 7 提案手法の選択・交叉

Fig. 7 Selection and crossover of the proposed method.

択機能，初期集団の生成機能，選択・交叉機能，突然変異機能，個体評価機能で構成される。

#### 4.1 テンプレートの選択機能

本機能では，入力データの部位に応じて，あらかじめ定義したパラメトリックモデルのテンプレートから1つを選択する。橋梁下部工の橋脚の場合，T型橋脚，一柱式橋脚，二柱式橋脚，ラーメン橋脚等がある。

#### 4.2 初期集団の生成機能

本機能では，テンプレートの各パラメータ（表2）の最適解をGAで導出するため，パラメータを遺伝子配列に置換して初期集団を生成する。まず，パラメータの探索範囲と探索ステップ数を設定し，各パラメータを2進数で表現するために必要なビット数を整理する。次に，設定した探索範囲内からランダムな数値を算出し，仮モデルを1つ生成する。ただし，入力点群データを内包するバウンディングボックスと生成した仮モデルのバウンディングボックスが許容値外の場合は，あらためて仮モデルを生成し直す。これを許容値内になるまで繰り返し，生成された仮モデルの重心を点群データの重心に一致するように平行移動させ，座標系を統一する。最後に，平行移動量（X, Y, Z）と回転角（roll, pitch, yaw）の探索範囲と探索ステップ数を設定し，テンプレートの各パラメータとあわせて2進数の遺伝子配列を定義する。T型橋脚を対象とした遺伝子設計の例を表3に示す。全パラメータのパターン数を乗算すると，約140兆を超えるため，総当りでは現実的な時間で解が得られない。そのため，パラメータを上述の手法により遺伝子配列に変換し，GAにより最適解を探索する。

表 3 T型橋脚を対象とした遺伝子設計の例

Table 3 Example of genetic design for T-shaped pier.

パラメータ	探索ステップ	探索範囲	パターン数	必要ビット数
X	0.5m	0.0~7.0m	16	4bit
Y	0.5m	0.0~7.0m	16	4bit
Z	0.5m	0.0~7.0m	16	4bit
Roll	10.0度	0.0~150.0度	16	4bit
Pitch	10.0度	0.0~150.0度	16	4bit
Yaw	10.0度	0.0~150.0度	16	4bit
p1	0.5m	0.5~8.0m	16	4bit
p2	0.5m	3.0~18.0m	32	5bit
p3	0.5m	0.5~8.0m	16	4bit
p4	0.5m	0.5~8.0m	16	4bit
p5	0.5m	0.5~4.0m	8	3bit
p6	10.0度	10.0~80.0度	8	3bit

#### 4.3 選択・交叉機能

本機能では，図7に示すとおり，多様な個体生成を実現するため，任意世代の全個体を対象に，エリート生存，上位個体どうしの交叉，エリートとその他個体の交叉，ランキング方式による交叉，ランダム方式による交叉を適用する。エリート生存は，適合度の高い上位個体をそのまま次世代に残すことである。上位個体どうしの交叉は，適合度の高い上位個体から無作為に2個体を選択して交叉することである。エリートとその他個体の交叉は，適合度が最も高い1個体とその他いずれかの1個体で交叉することである。ランキング方式による交叉は，適合度が高いほど選択確率を高くなるように設定し，任意の2個体を選択して交叉することである。ランダム方式による交叉は，適合度

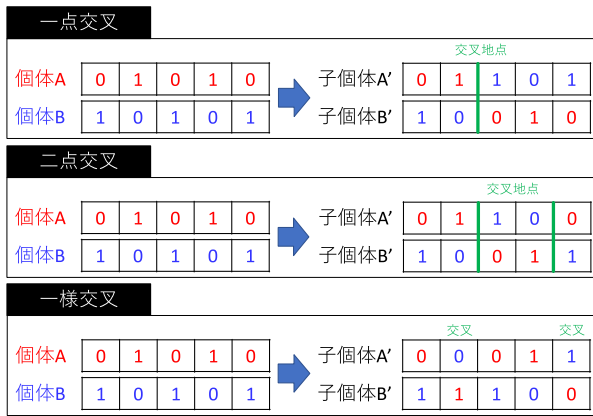


図 8 交叉方法  
Fig. 8 Crossover method.

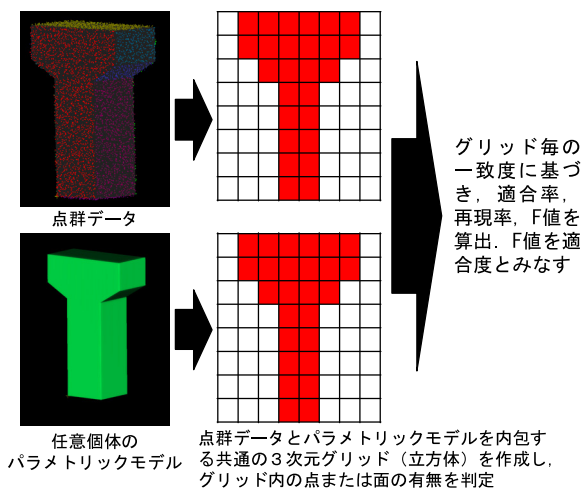


図 9 適合度の算出方法  
Fig. 9 Calculation method of precision.

に関係なく、ランダムに 2 個体を選択して交叉することである。

交叉方法は、図 8 に示すとおり、GA の代表的手法として、一点交叉、二点交叉、一様交叉があげられる。一点交叉は、遺伝子配列からランダムに設定した 1 地点を基準に、他の親個体の遺伝子配列と交換する。二点交叉は、これを 2 地点で行う。一様交叉は、すべての遺伝子に対して、一定確率で親個体の遺伝子と交換する。

上述の交叉対象個体の選択と交叉方法は、事前のパラメトリック解析により最適なものを選定する。

#### 4.4 突然変異機能

本機能では、局所解への収束を避けるため、一定確率で遺伝子の値を変換する。提案手法では、遺伝子は 2 進数表現のため、一定確率で 0 と 1 の数値を変換する。

#### 4.5 個体評価機能

本機能では、GA を用いて生成したパラメトリックモデルと点群データの適合度を算出する。適合度は、図 9 に

示すとおり、まず点群データと生成したパラメトリックモデルを内包する共通の 3 次元グリッド（立方体）を作成する。次に、すべてのグリッドに対して、グリッド内の点または面の有無を確認する。この処理は、点群データと生成したパラメトリックモデルでそれぞれ個別に実行する。そして、算出結果の適合率、再現率と F 値を算出する。本研究における適合率とは、パラメトリックモデルから算出した「面が存在するグリッド」のうち、点群データから算出した「点が存在するグリッド」がどの程度含まれているかを示す。再現率とは、点群データから算出した「点が存在するグリッド」のうち、パラメトリックモデルから算出した「面が存在するグリッド」がどの程度含まれているかを示す。F 値とは、適合率と再現率を組み合わせた調和平均である。すなわち、F 値が高いと、点群データとパラメトリックモデルが一致していると判断できる。したがって、提案手法では、F 値を生成個体の適合度と見なす。

### 5. 実証実験

本研究では、4 通りの実証実験により、提案手法の有用性を検証する。具体的には、疑似点群データを用いた提案手法の適用実験、未計測箇所を含む疑似点群データを用いた提案手法の適用実験、異なるモデルテンプレートを用いた提案手法の適用実験、および、計測点群データを用いた提案手法の適用実験である。各種パラメータは、事前のパラメトリック解析により導出した最適解（表 4）を使用する。対象部位（図 10）は、橋梁上部工が床版 1 種類（箱桁）、下部工が橋脚 4 種類（T 型橋脚、一柱式橋脚、二柱式橋脚、ラーメン橋脚）とする。実験に使用するテンプレートの各パラメータは、表 5 に示すとおりとした。

#### 5.1 疑似点群データを用いた実証実験

##### 5.1.1 実験方法

本実験では、まず任意のパラメータを与えて T 型橋脚とラーメン橋脚を生成する。次に、その各面上に点を生成する。このとき、一定範囲の乱数を発生させ、点の座標値を調整する。これにより、疑似的に対象部位を計測した点群データを生成（図 11）する。そして、疑似点群データとモデルテンプレートから、任意に設定したパラメータを推定できることを確認する。

MMS で取得した点群データの相対精度は、計測機器の進歩により高精度化している。一例として、三菱電機社の MMS の相対精度は、2012 年の文献 [24] で平均 0.05 m (RMS 値)、2016 年公表の MMS-K320 [25] のカタログスペックで 0.01 m 以内 (RMS 値) である。本実験では、直近 5 年程度の計測成果に対して本技術が適用できることを目指して、正解平面から  $\pm 0.025$  m となるように疑似点群を生成した。

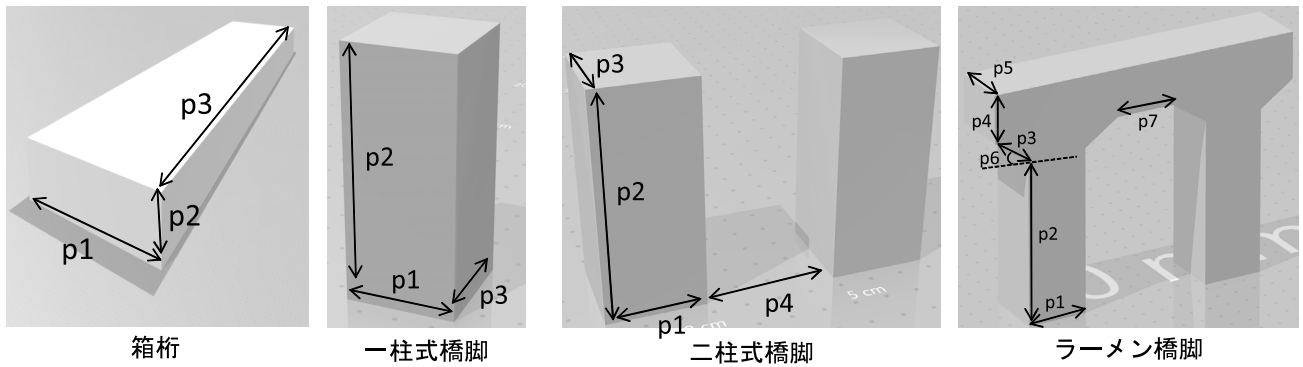


図 10 実験に使用するモデルのテンプレート  
Fig. 10 Model template for experiments.

表 4 提案手法のパラメータと設定値

Table 4 Parameters and set values of the proposed method.

提案手法のパラメータ	設定値
初期集団の生成条件	バウンディングボックスの大きさが許容値0.10m以内
初期集団の生成個体数	100
収束条件 (最大世代数)	100
収束条件 (適合度)	適合度の最大値が50世代変わらない場合は収束と判断
突然変異確率	25%
交叉方法	一様交叉
エリート生存個体数	適合度の上位2個体
エリート個体同士の交叉時の対象条件	適合度の高い順から10個体
エリート個体同士の交叉個体数	8個体
エリートとその他個体の交叉個体数	40個体
ランキング方式の交叉個体数	30個体
ランダム方式による交叉個体数	20個体
適合度算出のグリッドサイズ	0.10m

5.1.2 実験結果と考察

提案手法の適用結果を図 12 に示す. 図中の最終適合度とは, 提案手法を用いて生成した個体のうち, 最も高い適合度を示す. また, 正解適合度とは, 疑似点群データ生成時に設定したパラメータに基づき算出した適合度を示す.

T 型橋脚は 5 世代目, ラーメン橋脚は 34 世代目で最大適合度の個体を生成できた. そして, この個体のパラメータは, 疑似点群データ生成時のパラメータと一致した. 適合度は, ともに 0.98 であった. 以上より, 提案手法を用いて, 点群データから 3 次元モデルを生成できることが分かった.

表 5 実験に使用するテンプレートのパラメータ

Table 5 Parameters of model template for experiments.

部位	パラメータ	探索ステップ	探索範囲	パターン	必要ビット
箱桁	p1	0.10m	2.00~8.40m	64	6bit
	p2	0.10m	0.10~1.60m	16	4bit
	p3	0.10m	18.00~24.40m	64	6bit
T 型橋脚	p1	0.25m	0.50~4.50m	16	4bit
	p2	0.25m	2.00~10.00m	32	5bit
	p3	0.25m	2.00~10.00m	32	5bit
	p4	0.25m	0.50~4.50m	16	4bit
	p5	0.25m	1.00~5.00m	16	4bit
	p6	5.00 度	10.00~90.00 度	16	4bit
一柱式橋脚	p1	0.50m	0.50~8.00m	16	4bit
	p2	0.50m	3.00~18.00m	32	5bit
	p3	0.50m	0.50~4.00m	8	3bit
二柱式橋脚	p1	0.50m	0.50~8.00m	16	4bit
	p2	0.50m	3.00~18.00m	32	5bit
	p3	0.50m	0.50~4.00m	8	3bit
	p4	0.50m	0.50~8.00m	16	4bit
ラーメン橋脚	p1	0.50m	0.50~8.00m	16	4bit
	p2	0.50m	3.00~18.00m	32	5bit
	p3	0.50m	0.50~8.00m	16	4bit
	p4	0.50m	0.50~8.00m	16	4bit
	p5	0.50m	0.50~4.00m	8	3bit
	p6	10.00 度	10.00~80.00 度	8	3bit
	P7	0.50m	0.50~8.00m	16	4bit

5.2 未計測箇所を含む点群データを用いた実証実験

5.2.1 実験方法

本実験では, まず前述の実験と同様の手法を用いて, T 型橋脚, 一柱式橋脚, 二柱式橋脚とラーメン橋脚の疑似点群データを生成する. 次に, 計測不可箇所の上面と下面の点を削除する. 最後に, 1 方向からの計測を想定し, 図 13



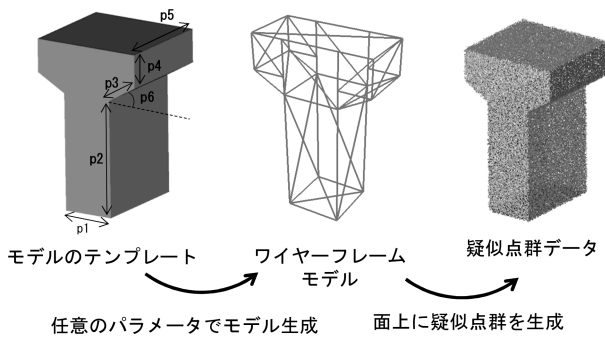


図 11 疑似点群データの生成方法

Fig. 11 Generating method of pseudo point cloud data.

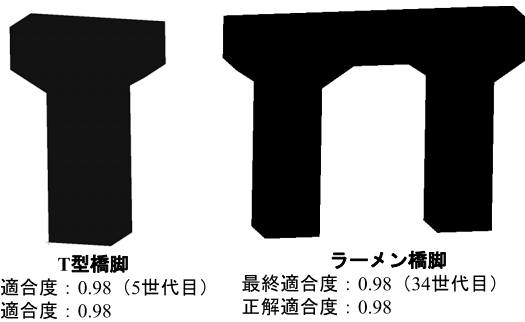


図 12 T 型橋脚とラーメン橋脚の疑似点群データを用いた提案手法の適用結果

Fig. 12 Application results of the proposed method for T-shaped pier and rigid framed pier.

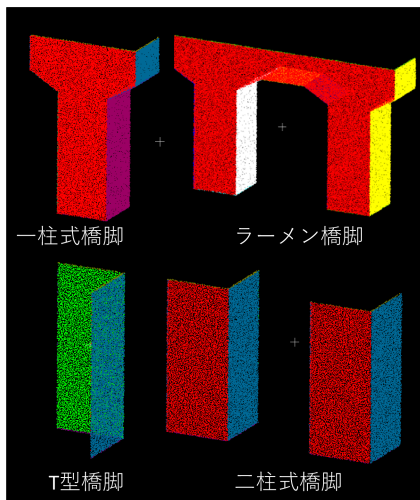


図 13 1 方向からの計測を想定した疑似点群データ

Fig. 13 Pseudo point cloud data measured by one direction.

に示すとおり片側の点をすべて削除する。これらの疑似点群データに対する提案手法の有用性を確認する。

### 5.2.2 実験結果と考察

提案手法の適用結果を図 14 に示す。一柱式橋脚と二柱式橋脚は 1 世代目、T 型橋脚は 8 世代目、ラーメン橋脚は 10 世代目に最も高い適合度の個体を生成した。このうち、一柱式橋脚と二柱式橋脚は、疑似点群データ生成時のパラメータを推定できた。一方、T 型橋脚とラーメン橋脚は、

【凡例】 黒色：提案手法で生成したモデル，灰色：正解モデル

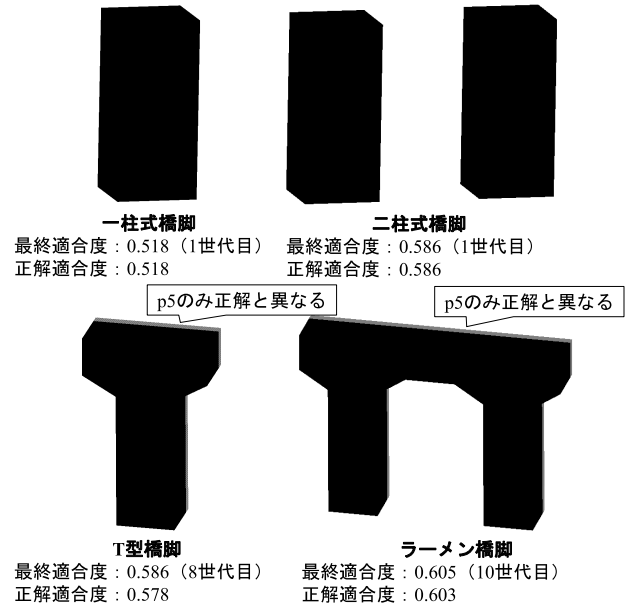


図 14 1 方向からの計測を想定した疑似点群データを用いた提案手法の適用結果

Fig. 14 Application results of the proposed method using pseudo point cloud data measured by one direction.

いずれもパラメータ  $p_5$  のみ、疑似点群生成時のパラメータと比べて 0.50 m 短い結果となった。また、個体の適合度は、両方とも正解適合度よりも高くなった。この要因としては、適合度の算出基準となる 3 次元グリッドの区切り位置と、疑似点群データ生成時の乱数による点の揺れに起因すると考えられる。本実験結果のように、疑似点群データの分布次第では、正解の寸法値よりも小さいモデルの方が、F 値が高くなるケースが見られた。この課題は、テンプレートの探索ステップを細かく設定することで改善できると考えられる。

以上より、探索ステップや範囲の設定方法には議論の余地が残るものの、提案手法を用いて 1 方向からの計測を想定した疑似点群データであっても、3 次元モデルを生成できることを確認できた。

## 5.3 異なるモデルテンプレートを用いた実証実験

### 5.3.1 実験方法

本実験では、T 型橋脚、一柱式橋脚、二柱式橋脚とラーメン橋脚のテンプレートを使用して生成した疑似点群データに対して、他の部位のテンプレートを適用した場合の適合度を確認する。これより、適合度の算出手法の妥当性と、テンプレート選択の自動化の可否を確認する。

### 5.3.2 実験結果と考察

実験結果を表 6 に示す。表中の「—」は、初期集団生成条件を満たす個体が生成できなかったことを示す。まず T 型橋脚のテンプレートを使用して生成した疑似点群データに対して、同一のテンプレートを用いた場合の提案手法の

表 6 異なるテンプレートへの提案手法の適用結果

Table 6 Application results of the proposed method for different model templates.

疑似点群 モデル	T型	一柱式	二柱式	ラーメン
T型橋脚	0.97	—	—	—
一柱式橋脚	0.76	0.99	—	—
二柱式橋脚	0.57	0.74	0.99	0.73
ラーメン橋脚	—	—	—	0.97

適合度は0.97、一柱式橋脚の場合は0.76、二柱式橋脚の場合は0.57、ラーメン橋脚の場合は解なしであった。一柱式橋脚では、同一テンプレートを用いた場合の適合度が0.99、二柱式橋脚の適合度が0.74、T型橋脚とラーメン橋脚は解なしであった。二柱式橋脚では、同一テンプレートを用いた場合の適合度が0.99、その他はすべて解なしとなった。ラーメン橋脚では、同一テンプレートを用いた場合の適合度が0.97、二柱式橋脚のテンプレートを用いた場合の適合度が0.73、T型橋脚と一柱式橋脚では解なしとなった。これらより、同一のテンプレートを用いる場合に、適合度が高くなることを確認できた。したがって、適合度の算出手法が適当であることと、テンプレートを明示的に指定せず、総当りによる自動選択が可能ながことが分かった。

5.4 計測点群データを用いた実証実験

5.4.1 実験内容

本実験では、TLSを用いて取得した橋梁上部工の箱桁と、MMSを用いて取得した高架道路橋の橋脚の点群データを対象に、提案手法の有用性を確認する。TLSにはFARO社のFocus3D X330、MMSには三菱電機社のMMS-K320 [25]を用いた。

箱桁は、大阪府泉南市信達童子畑地区にある童子畑橋とする。図15左に示すとおり、TLSを用いて5地点から計測したため、橋台および路面との接触箇所以外は、限なく点群データを計測できている。高架道路橋の橋脚は、阪神高速11号池田線高架橋下とする。図15右に示すとおり、隣接道路を走行しながらMMSで計測したため、1方向からの計測に限定され、未計測箇所が多い状態である。正解パラメータは、点群データから目視判読により手動で設定した。

5.4.2 実験結果と考察

実験結果を図16に示す。箱桁では、提案手法により、第5世代目に適合度0.68の個体が生成された。これは、正解パラメータと同一であった。そのため、橋台および路面との接触箇所の点群が欠損している状態であっても、提案手法により正確な箱桁のパラメトリックモデルが生成できることを確認した。橋脚は、提案手法により、第12世代目に適合度0.55の個体が生成された。推定結果と正解パラメータを確認すると、p2が0.50m短く、p4が0.25m短

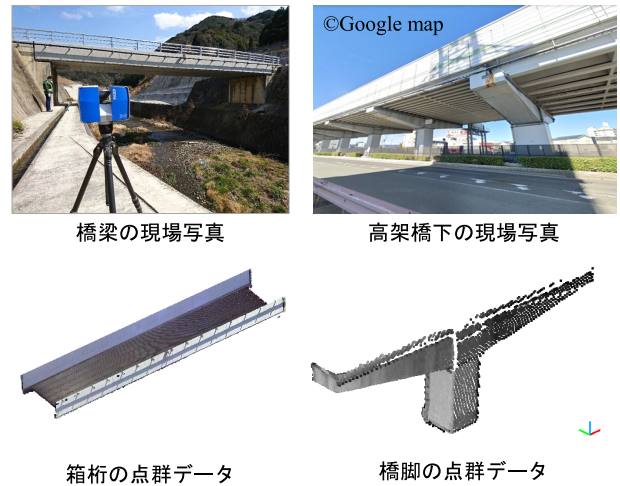


図 15 計測現場と点群データ  
Fig. 15 Measurement sites and point cloud data.

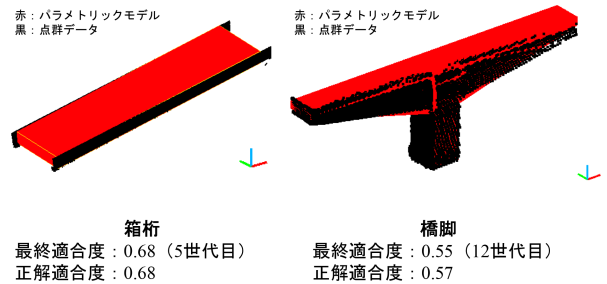


図 16 計測点群データを用いた提案手法の適用結果  
Fig. 16 Application results of the proposed method using measured point cloud data.

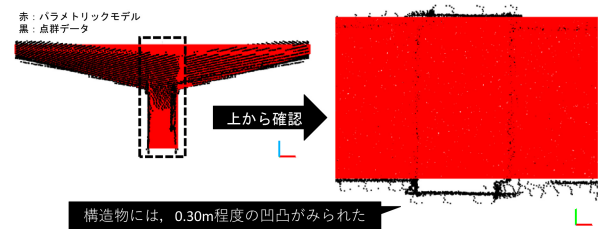


図 17 構造物の凹凸  
Fig. 17 Unevenness of structure.

く、p6が5度大きかった。対象構造物の現況と点群データを詳細に分析したところ、構造物を上から確認した図17に示すとおり、地面と設置する直方体部と、上部工を支える部位の大きさが約0.50m異なっていることが分かった。この部位は、T型橋脚のモデルパラメータp5に該当する。この課題は、T型橋脚のパラメータ定義を変更することによって、対応可能と考えられる。この誤差に関して、維持管理現場に詳しい建設コンサルタントと橋梁メーカーの技術者10名にヒアリングした結果、橋梁の維持管理業務上では、支障にならない誤差との見解を得ている。

以上より、提案手法は、TLSやMMS等の計測機器を用いて取得した点群データおよび未計測箇所を含む点群データに対しても適用可能であることが実証できた。

## 6. おわりに

本研究では、膨大なストックの維持管理が喫緊の課題である橋梁の3次元モデルを生成することを目的に、まず計測機器ごとの点群データの特性を整理し、橋梁計測において計測困難な部分や計測できない部分が存在するという課題を示した。そのうえで、産官学体制で検討を進めている維持管理に着眼した橋梁パラメトリックモデルの仕様を提言するとともに、その仕様に準拠したパラメトリックモデルを点群データから生成する手法を提案した。そして、実証実験より、提案手法の有用性を確認した。

提案手法は、既研究と異なり、対象構造物を限なく計測できていない点群データであっても、3次元モデルを生成できる。さらに、機器の計測誤差やレーザー光の乱反射等による外れ値を含む場合でも、構造物の端が明瞭な3次元モデルを生成できる。一方、構造物ごとに異なる細部の形状までを正確にモデル化することはできない。今後は、有識者らと協議を重ね、橋梁パラメトリックモデルの用途、テンプレート、制度設計等を仕様化するとともに、本提案手法の適用範囲の拡大を目指す予定である。

謝辞 本研究の一部は、一般財団法人日本建設情報総合センター社会基盤情報標準化委員会より活動支援を受けた橋梁パラメトリックモデル標準化検討小委員会により行った。また、本研究を遂行するにあたり、関西大学社会空間情報科学研究センターに参画されている研究者および企業からご協力を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- [1] EU BIM TASK GROUP: Handbook for the introduction of Building Information Modelling by the European Public Sector, available from ([http://www.eubim.eu/wp-content/uploads/2017/07/EUBIM\\_Handbook\\_Web\\_Optimized-1.pdf](http://www.eubim.eu/wp-content/uploads/2017/07/EUBIM_Handbook_Web_Optimized-1.pdf)) (accessed 2020-08-14).
- [2] 佐藤直良: CIM ノススメ, JACIC 情報, Vol.27, No.2, p.1 (2012).
- [3] 国土交通省 i-Construction 委員会: i-Construction—建設現場の生産性革命, 入手先 (<https://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>) (参照 2020-08-14).
- [4] 田中成典, 辻 光宏, 伊藤俊秀, 窪田 諭, 今井龍一, 中村健二: レーザスキャナと UAV 等の計測機器を用いた社会基盤施設の 3 次元データの計測と活用に関する研究, 情報処理学会研究報告, Vol.2017-IS-142, No.3, pp.1-5, 情報処理学会 (2017).
- [5] 山口浩平, 鈴木航作, 松田 浩, 伊勢田幹太, 合田寛基: 橋梁復元設計における 3D 計測の利活用について, 構造工学論文集 A, Vol.66A, pp.684-693, 土木学会 (2020).
- [6] 鈴木紗苗, 宮森保紀, 齊藤剛彦, 山崎智之, ムンフジャル ガルダンビーバルジル, 三上修一: 鋼構造部材の 3 次元点群モデル構築と FEM データへの自動変換に関する検討, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.75, No.2, 土木学会 (2019).
- [7] 塚田義典, 窪田 諭, 田中成典, 今井龍一, 中村健二, 山本雄平: 点群データを用いた橋梁上部工の 3 次元モデルの生成に関する研究, 日本知能情報ファジィ学会ファジィシステムシンポジウム講演論文集, Vol.33, pp.301-302, 日本知能情報ファジィ学会 (2017).
- [8] 塚田義典, 田中成典, 窪田 諭, 中村健二, 岡中秀騎: 点群データを用いた橋梁の 3 次元モデルの生成に関する研究, 知能と情報, Vol.27, No.5, pp.796-812, 日本知能情報ファジィ学会 (2015).
- [9] 日高業緒, 道川隆士, 矢吹信喜, 福田知弘, Ali Motamedi: スケルトンと断面を利用したモノレールのレール部点群のポリゴンモデル化手法の開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.72, No.2, pp.I.156-I.166, 土木学会 (2016).
- [10] 関 和彦, 岩佐宏一, 窪田 諭, 塚田義典, 安室喜弘, 今井龍一: 小規模橋梁の安全確認のための効率的点検技術の研究開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.75, No.2, pp.II.8-II.16, 土木学会 (2019).
- [11] 橋川元彰, 金井 理, 伊達宏昭: 鋼橋 レーザ計測点群からの規格部材の自動抽出 (第 2 報), 精密工学会春季大会 学術講演会講演論文集, pp.521-522, 精密工学会 (2017).
- [12] 橋川元彰, 金井 理, 伊達宏昭: 鋼橋 レーザ計測点群からの規格部材の自動抽出, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.581-582, 精密工学会 (2017).
- [13] 橋川元彰, 金井 理, 伊達宏昭: 鋼橋 レーザ計測点群からの規格部材の自動抽出—規格寸法判定処理の高精度化, 精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp.51-52, 精密工学会 (2017).
- [14] 橋川元彰, 金井 理, 伊達宏昭: 鋼橋 レーザ計測点群からの規格部材の自動抽出 (第 4 報)—様々な断面形状タイプをもつ規格部材の抽出, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.569-570, 精密工学会 (2018).
- [15] Holland, J.H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, University of Michigan Press (1975).
- [16] JACIC 社会基盤情報標準化委員会: 橋梁パラメトリックモデル標準化検討小委員会, 入手先 (<https://www.jacic.or.jp/hyojun/2019shouiinnkai-04.html>) (参照 2020-08-14).
- [17] 四月朔日勉, 矢吹信喜: 各種 DBMS による橋梁 3 次元プロダクトモデルの管理手法に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.71, No.2, pp.I.87-I.98, 土木学会 (2015).
- [18] 青山憲明, 川野浩平, 山岡大亮, 重高浩一: 橋梁の維持管理における CIM の利用と 3 次元モデルの作成, 土木技術資料, Vol.58, No.4, pp.20-23, 土木研究センター (2016).
- [19] 土田 諒, 田中文基, 小野里雅彦, 羽田芳朗, 中尾 学, 小林弘樹, 長谷川英司, 菅原登志也, 大山高輝: 橋梁点検・保守のための国際標準に基づく橋梁情報モデルとその web 配信システム (第 10 報): 2 次元損傷図から 3 次元変状情報の生成方法の提案, 精密工学会学術講演会講演論文集 Vol.2019S, pp.93-94, 精密工学会 (2019).
- [20] 藤澤泰雄, 矢吹信喜, 五十嵐善一, 吉野博之: 鉄道高架橋を対象とした三次元設計モデルの積算・施工への利用, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.67, No.2, pp.I.8-I.17, 土木学会 (2011).
- [21] 古田 均, 田中成典, トーマス・フロース, 山崎元也, 本郷廷悦, 草野成一, 物部寛太郎: 高速道路事業におけるプロダクトモデルの研究開発, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.8, pp.2802-2817, 情報処理学会 (2008).
- [22] 田中成典, 窪田 諭, 中村健二: 社会基盤施設を対象とした汎用 3 次元 CAD エンジンの開発と適用, 知能と情報, Vol.28, No.5, pp.775-790, 日本知能情報ファジィ学会 (2016).
- [23] 塚田義典, 窪田 諭, 田中成典, 梅原喜政, 中原匡哉, 中畑光貴: 橋梁の点群データを用いた深層学習による部位認識に関する研究, 知能と情報, Vol.32, No.1, pp.627-631, 日本知能情報ファジィ学会 (2020).
- [24] 間野耕司, 石井一徳, 平尾公孝, 橘 菊生, 吉村充則, Devrim Akca, Armin Gruen: 移動計測車両測量システム

ム (MMS) により取得される点群の精度評価, 写真測量とリモートセンシング, Vol.51, No.4, pp.186–200, 写真測量学会 (2012).

- [25] 三菱電機: 三菱モバイルマッピングシステム高精度 GPS 移動計測装置, 入手先 (<https://www.mitsubishielectric.co.jp/mms/pdf/mms.pdf>) (参照 2020-08-14).



窪田 諭 (正会員)

1975 年生. 2000 年関西大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了. 博士 (工学). 現在, 関西大学環境都市工学部都市システム工学科教授. 社会基盤情報学, 地理情報システムに関連する研究に従事. 2016 年

度文部科学大臣表彰科学技術賞「科学技術振興部門」受賞.



塚田 義典 (正会員)

1987 年生. 2015 年関西大学大学院総合情報学研究科総合情報学専攻博士課程後期課程修了. 博士 (情報学). 現在, 摂南大学経営学部講師. メディア情報処理, 知能情報処理, 土木情報学に関連する研究に従事. 2019 年度国

土交通省 i-Construction 大賞「優秀賞」受賞.



梅原 喜政 (正会員)

1989 年生. 2019 年関西大学大学院総合情報学研究科総合情報学専攻博士課程後期課程修了. 博士 (情報学). 現在, 関西大学先端科学技術推進機構特別任命助教. データサイエンス, 知識情報処理, コンピュータグラ

フィックスに関連する研究に従事. 2019 年度国土交通省 i-Construction 大賞「優秀賞」受賞.



田中 成典 (正会員)

1963 年生. 1988 年関西大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了. 博士 (工学). 現在, 関西大学総合情報学部教授および関西大学先端科学技術推進機構社会空間情報科学研究センター長. 2018 年 Intelligent

Style 株式会社取締役会長. 2016 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞「科学技術振興部門」受賞. 2019 年度国土交通省 i-Construction 大賞「優秀賞」受賞.