

# レーザプロファイラデータを用いた 河川空間の3次元モデル構築手法に関する研究

川野 浩平<sup>1,a)</sup> 田中 成典<sup>2</sup> 今井 龍一<sup>3,4</sup> 中村 健二<sup>5</sup>

受付日 2014年9月20日, 採録日 2015年1月6日

**概要:** 情報通信技術の発展により, 国土空間モデルの利用が一般化されてきた. その1つとして公共構造物の維持管理がある. しかし, 河川事業に注目すると, これまでの3次元モデルの生成技術では, 河川管理の要件を満足する3次元の河川空間モデルを再現できない. そのため, 2次元の平面図および縦横断面図を用いて河川空間を管理しているため, 面的・立体的な形状の管理が困難である. そこで, 精緻な3次元モデルを生成する方法が求められている. こうした背景の中, 著者らは, Mobile Mapping System (MMS) を用いて計測した点群データ (MMS データ) から, 河川管理で重要な管理部位の1つである堤防の平坦頂部 (天端面) と斜面の境界線 (ブレイクライン) を再現した3次元モデルの生成技術の開発 (MMS 手法) に取り組んできた. しかし, MMS データが再現できるのは, MMS が計測できる天端面周辺に限定される. 一方, 航空レーザ測量で計測した Laser Profiler (LP) の点群データ (LP データ) は, MMS より点密度は低いが, 河川空間全体を計測している. 本研究では, 前述の MMS 手法を用いて, LP データから3次元モデルを生成することを試みた. しかし, MMS データと LP データの点密度などの特性の違いにより満足な結果を得られなかった. そのため, 新たな生成技術として, LP データから3次元モデルを生成する手法 (LP 手法) を考案し, 天端面と小段で評価実験を実施した. 最終的に, 天端面には MMS データ, 天端面以外の平坦部には LP データという異なる特性の点群データの特長を活かした相互補完による河川空間3次元モデルの構築の可能性を検討した.

キーワード: 河川事業, 3次元モデル, ブレイクライン, レーザプロファイラ, モービルマッピングシステム

## Research Concerning Technologies for Generating 3D Model of River Space Using Laser Profiler Data

KOUHEI KAWANO<sup>1,a)</sup> SHIGENORI TANAKA<sup>2</sup> RYUICHI IMAI<sup>3,4</sup> KENJI NAKAMURA<sup>5</sup>

Received: September 20, 2014, Accepted: January 6, 2015

**Abstract:** Utilization of national spatial data infrastructure has been generalized by the advancement of information and communication technology. One of the utilizations is for maintaining public buildings. However, when focusing on a river project, the reproducibility for river spatial model would not be accurately high with a generation technology of 3D model so far. Since river space is managed by using a 2D drawing due to the above-described reason, it is difficult to maintain the exhaustive management of dimensional shape. Therefore, it is required to obtain a method to generate a sophisticated 3D model. In such background, the authors have been working on a generation method proposal for 3D model (MMS method) which could reproduce an embankment's flat top portion (top end face) as one of the important management portions in river management and a slope boundary line (break line) by point cloud data (MMS data) measured with Mobile Mapping System (MMS). However, with MMS, it would be limited to a modeling only for surrounding of top end face as a measurement vehicle could run. Therefore, we attempted to generate a 3D model by point cloud data (LP data) of Laser Profiler (LP) as having been measured with a flat portion (banquette) other than top end face through aerial survey. In this study, we attempted to generate a 3D model from LP data with using the above-mentioned MMS method. However, we could not acquire the satisfactory result due to a characteristic difference between MMS data and LP data. For that reason, we have developed a new generating technology, proposed a generating method for a 3D model with LP data, and then conducted an evaluation experiment with top end face and banquette. Conclusively, we examined the feasibility of construct a 3D model for river space by using a generating technology subjecting for MMS data at top end face and LP data at flat portion other than top end face.

**Keywords:** river project, 3D model, breakline, Laser Profiler, Mobile Mapping System

## 1. はじめに

情報通信技術 (Information and Communication Technology) の発展により, 国土空間の 3 次元モデル (以下, 「国土空間モデル」という) を生成する技術 [1], [2] が開発されてきた. 現在では, 国土空間モデルを俯瞰する環境が充実してきており, 誰でも街並みを直感的に把握 [3] できる. 国土空間モデルの利用法の 1 つとして, 国土空間内に点在する公共構造物の維持管理がある. その中で河川空間に着目すると, 低水路, 護岸, 高水敷や堤防などの維持管理では, 2 次元図面, 台帳や監視カメラなどが用いられている. この図面には, 平面図, 河道に平行した縦断図および河道に対して垂直な横断図 (以下, 「河川横断図」という) などがある. 河川延長は, 一級河川 (全 109 水系) だけでも約 8 万 8 千キロメートルもあることから, 河川横断図は, 現地測量費の制約もふまえて, 200 メートル間隔で作成されている. 河川横断図の生成されていない箇所の洗堀 (波浪などにより堤防表面の土が削り取られる状態) などの変状は, 近接する河川横断図を代用して把握している. 一方, 災害時のような被害の大きい場合は, 近接する河川横断図の代用が難しく, 機動的な復旧対策の阻害要因となっている. また, 河川管理で重要な流出解析, 流下能力の把握, 河道掘削計画や氾濫シミュレーションは, 本来ならば河川空間を精緻に再現した 3 次元のモデルを利用すべきであるが, 2 次元図面を利用せざるをえない現状にある. こうした現状の解決の一案として, 河川空間を面的・立体的に形状を把握可能かつ精緻な 3 次元の河川空間モデル (以下, 「河川空間モデル」という) の生成手法が求められている. しかし, 既存の 3 次元モデルの生成技術では, 河川管理の要件を満足する再現精度 [4] を確保できない. 河川空間モデルに求められる再現精度の具体例として, 河川横断測量では, 平地における河川堤防の幅が約 50 m の場合, 標高の許容誤差は約 27 cm となる. このような精緻な河川空間モデルを生成するには, 車両搭載型レーザスキャナを利用した Mobile Mapping System (以下, 「MMS」という) [5], [6] を用いて計測した点群データ (以下, 「MMS

データ」という) や航空レーザ測量 [7], [8], [9] で計測した Laser Profiler (以下, 「LP」という) の点群データ (以下, 「LP データ」という) などの利用が一方策となる. しかし, レーザスキャナを用いて広範囲を高密度に計測した膨大な点群データは, 一般の CAD や GIS ソフトでは利用できないという問題 [10] がある. そのため, 現状は, オペレータが膨大な数の点群データから必要な座標を判読して CAD や GIS に手動で転記し, 2 次元の図面や地図を作成している. この複雑な作業の省力化を目的として, 点群データから広範囲の 3 次元モデルを自動的に作成する手法が研究されている. 具体的には, 点群データから建物を判別して市街地モデルを作成する研究 [11], [12], [13], [14], [15], [16] や, 航空写真や LP データから地形の起伏を再現して 3 次元モデルを自動作成する研究 [16] がある. 前者の既往研究 [11], [12], [13], [14], [15] では, 建物の屋根と地面との間にできる極端な標高差や, 航空写真から画像処理で判別できる建物とその他との境界線などを用いて, 人工物の特徴を再現した 3 次元モデルを生成している. 後者の既往研究 [16] では, 航空写真から山岳地形の陰影に基づいて広範囲な地形の傾きを推定して, 地形の特徴を再現した 3 次元モデルを生成している. これらの既往研究は, 都市空間や山岳地形などを対象としたシステマティックなアプローチによる 3 次元モデルの生成手法である. 一方, 河川空間の場合, 河川堤防などの人工物と草木などの自然物とが混在するため, ヒューリスティックなアプローチにより 3 次元モデルを生成する手法が研究されている. 具体的には, LP データから生成した数値標高モデルから, 面と面の境界線 (以下, 「ブレイクライン」という) を自動抽出する手法 [17], [18], [19], [20] や, 地形の位相関係を記録したデータベースに基づいてブレイクラインを抽出する手法 [21] が研究されている. 前者の手法では, 数値標高モデルから算出した面と面の角度や標高差に基づいてブレイクラインを取得している. しかし, この手法では, 抽出されるブレイクラインの精度は, 数値標高モデルの精度に依存するという問題がある. そのため, 細かなブレイクラインを大量に抽出, 平坦部と法面との間に生じるブレイクラインを正確に抽出できないという課題がある. 後者の手法では, 地形の幾何位相関係を記録した地形データベースに基づいて点の集合を作成し, 集合間のブレイクラインを取得している. しかし, この手法では, あらかじめ地形データベースの用意が必要であるという問題がある. こうした背景の中, 著者らは, 河川空間を計測した MMS データを用いて, 点群データの分布から堤防の平坦頂部 (以下, 「天端面」という) のブレイクラインを再現した 3 次元モデルを生成する技術 (以下, 「MMS 手法」という) の開発 [22], [23] に取り組んできた. これにより, 河川空間を計測した MMS データから河川管理に利用できる 3 次元モデルの自動生成の実現に寄与してきた. 本技術の応用として, 東日本大震災の

<sup>1</sup> 関西大学大学院総合情報学研究科  
Graduate School of Informatics, Kansai University,  
Takatsuki, Osaka 569-1095, Japan

<sup>2</sup> 関西大学総合情報学部  
Faculty of Informatics, Kansai University, Takatsuki, Osaka  
569-1095, Japan

<sup>3</sup> 国土交通省国土技術政策総合研究所  
National Institute for Land and Infrastructure Management,  
MLIT, Tsukuba, Ibaraki 305-0804, Japan

<sup>4</sup> 関西大学大学院総合情報学研究科連携大学院  
Cooperative Graduate School of Informatics, Kansai University,  
Tsukuba, Ibaraki 305-0804, Japan

<sup>5</sup> 大阪経済大学情報社会学部  
Faculty of Information Technology and Social Sciences,  
Osaka University of Economics, Higashiyodogawa, Osaka  
533-8533, Japan

a) kawano@kansai-labo.co.jp

事例を対象とした震災前後の被害箇所を自動検出する研究 [24] がある。この研究では、河川堤防のブレイクラインに注目して、震災による変状の度合いを明らかにした。しかし、MMS では、天端面の周辺に計測範囲が限定されるため、堤防の中腹に設けられた平坦部（以下、「小段」という）などの特徴を再現した 3 次元モデルの生成が困難である。そこで、本研究の目的は、LP データから天端面と小段の形状的な特徴を現した河川空間モデルを自動生成する手法（以下、「LP 手法」という）の提案とした。本論文では、まず、2 章で MMS データと LP データのそれぞれの特性を説明し、3 章で LP データに MMS 手法を適用した場合の課題を明らかにする。次に、4 章で、3 章で明らかになった課題を解消する LP 手法を提案し、5 章および 6 章で LP 手法の詳細を説明する。そして、7 章で LP 手法の再現精度の評価実験を実施する。最後に、8 章で MMS 手法と LP 手法を用いた河川空間の 3 次元モデル構築の可能性を評価し、9 章で本研究を総括する。

## 2. 河川空間における MMS データと LP データの特性

本章では、MMS 手法を用いた 3 次元モデルの生成に LP データの特性がどのように影響するかを確認するため、MMS データと LP データの特性を明らかにする。まず、MMS データと LP データの概要を説明する。次に、河川堤防を計測した MMS データと LP データの特性を比較する。

### 2.1 MMS データ

MMS データは、車両に搭載したレーザ測距装置を用いて、道路周辺の地形・地物などを計測した平面直角座標系や緯度経度の計測結果である（図 1）。そのため、車両からの距離に応じて計測密度が下がるという特徴を持つ。平面直角座標系とは、日本全国を 19 の座標系に区分し、各区分の基準点から北方向と東方向に進んだ距離で座標を表現する平面直角座標系である。MMS データは、道路台帳附图の更新業務など、道路とその周辺に関する業務に用いられている。

### 2.2 LP データ

LP データは、航空機に搭載したレーザ測距装置を用いて、地表面の標高を計測した平面直角座標系や緯度経度の計測結果である（図 2）。そのため、上空から鳥瞰可能な対象を広範囲に計測できるという特徴を持つ。なお、計測データの点検調整を行ったものをオリジナルデータ、オリジナルデータから交通施設（道路、鉄道）や植生（樹木、竹林）などの地表遮蔽物を除去したものをグラウンドデータ [25] と呼ぶ。一般的な地表遮蔽物の除去処理では、まず、点群データ処理の専用ソフトウェアを用いてオリジナルデータから自動的に地表面を推定し、地表面以外

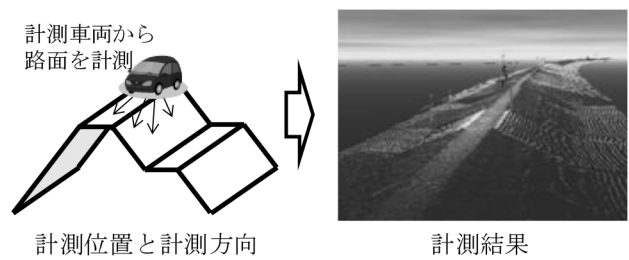


図 1 MMS による計測方法とデータの一例

Fig. 1 Measurement method and sample data using MMS.

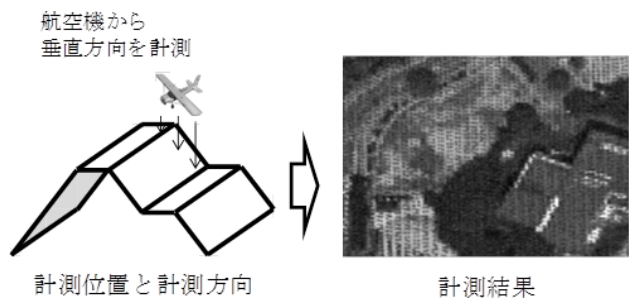


図 2 LP による計測方法とデータの一例

【出典】国土地理院

Fig. 2 Measurement method and sample data using LP

【Source】Geographical Survey Institute Maps.

の点群データを一括除去する。次に、目視で自動処理の結果を確認して、地表面推定の適切さを確認し、人手で調整している。専用ソフトウェアの詳細は民間の測量会社で各社各様であるため、本研究では、国土交通省国土地理院の定めた公共測量の作業規程 [26] に従って作成されたグラウンドデータを対象とする。

### 2.3 MMS データと LP データの特性分析

#### 2.3.1 MMS データと LP データの計測範囲の特性

一級水系である淀川の河川堤防を計測した MMS データと LP データを計測地点の河川横断面と重ね合わせた例を図 3、図 4 に示す。図 3、図 4 を確認すると、LP データは、法面や小段、高水敷など天端面以外の平坦部を含むことが分かる。これは、MMS 計測では車両から前方または後方の路面に向けてレーザを照射するのに対して、航空レーザ測量では、天頂方向から地表面に向けてレーザを照射するためである。これらのことから、LP データは、鳥瞰可能な平坦部の形状的な特徴の把握に適していることが分かる。

#### 2.3.2 MMS データと LP データの密度分布の特性

図 3 と図 4 に示す河川横断面図の天端面と小段の計測点の密度を表 1 に示す。表 1 を確認すると、MMS データは、計測位置である天端面の密度と比較して、小段の密度が低いことが分かる。これに対して、LP データの点群密度は、天端面と小段で一樣な密度であることが分かる。また、LP データと比較して MMS データの密度が高いこと



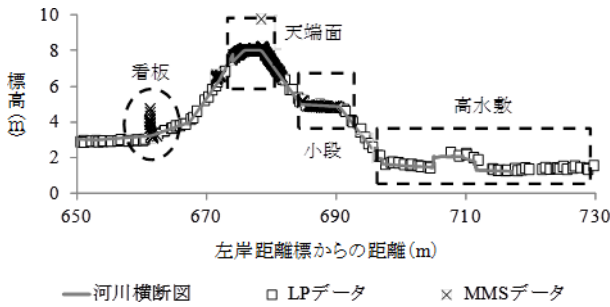


図 3 淀川下流域の河川横断面図と点群データの重ね合わせ

Fig. 3 Example of overlaid point cloud data on the cross-sectional survey data in downstream of Yodo's river.

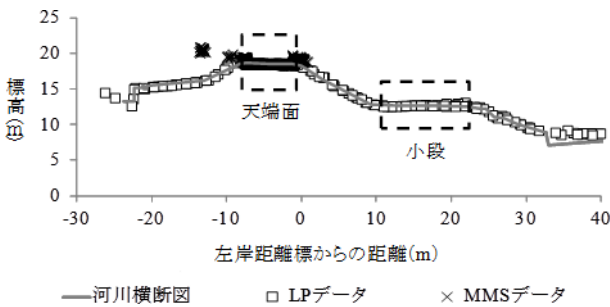


図 4 淀川上流域の河川横断面図と点群データの重ね合わせ

Fig. 4 Example of overlaid point cloud data on the cross-sectional survey data in upstream of Yodo's river.

表 1 点群データの密度分布

Table 1 Density distribution of point cloud data.

		MMS データ (点/m <sup>2</sup> )	LP データ (点/m <sup>2</sup> )
淀川下流の例	天端面	185.747	1.810
	小 段	27.649	1.656
淀川上流の例	天端面	172.309	2.184
	小 段	-	2.257

が分かる。これらのことから、MMS データは、天端面の形状的な特徴の把握に適していることが分かる。

### 3. LP データを用いた MMS 手法による 3 次元モデル生成の課題分析

本章では、MMS データと LP データの特性の違いをふまえて、LP データに MMS 手法を適用した場合の解決すべき課題を明らかにする。具体的には、まず、MMS 手法の概要について説明する。次に、MMS 手法を用いて LP データから生成した 3 次元モデルを検証し、MMS 手法を LP データに適用する場合に解消すべき課題を分析する。

#### 3.1 MMS 手法の概要

MMS 手法は、河川空間を計測した MMS データからブレイクラインを再現した 3 次元モデルを自動生成する技術である。具体的には、まず、計測車両が走行した平坦部の形状を推定し、ブレイクライン候補線を自動生成する。次

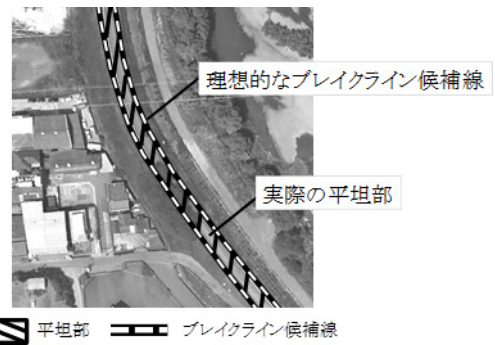


図 5 河川堤防における平坦部とブレイクライン候補線の関係【出典】 Google MAP

Fig. 5 Relationship between planation part and breakline in embankment【Source】 Google Map.

に、推定したブレイクライン候補線を基に平坦部のブレイクラインを抽出する。そして、ブレイクラインを考慮した格子状のフィルタを用いて膨大な MMS データを間引く。間引いた点群データを使って河川空間モデルを作る。

### 3.2 LP データを用いた 3 次元モデル生成実験

#### 3.2.1 実験概要

本節では、LP データに MMS 手法を適用した場合の技術的な課題を分析するため、ブレイクライン候補線の生成実験とブレイクラインの抽出実験との 2 つの実験を実施する。ブレイクライン候補線の生成実験では、MMS 手法を用いて LP データからブレイクライン候補線を正しく生成できるかを確認する。ブレイクラインの抽出実験では、正しくブレイクライン候補線を入力した場合に MMS データと同様にブレイクラインを抽出できるかを確認する。ブレイクラインの抽出実験には、ブレイクライン候補線が正しく抽出できた前提が必要である。そのため、手作業で作成したブレイクライン候補線を用いてブレイクラインを抽出する。

#### 3.2.2 ブレイクライン候補線およびブレイクラインと実際の平坦部の関係

本項では、提案手法によって抽出したブレイクライン候補線やブレイクラインが実際の平坦部や法面と比較してどのような関係であるかを説明する。実際の河川堤防の平坦部とブレイクライン候補線の関係を図 5 に示す。ブレイクライン候補線は、ブレイクラインを抽出するための目印となる線である。そのため、航空写真を判読して得た実際の平坦部と重ねた場合、平坦部の外形線と相似の関係となる。ブレイクラインは、実際の平坦部と法面の断面が変化する点を縦断方向につないだ線である。そのため、航空写真を判読して得た平坦部と重ねた場合、平坦部の境界線上に重なる関係となる。

本実験では、平坦部およびブレイクラインの正解データを LP データから人手で作成した。正解データは、LP デー

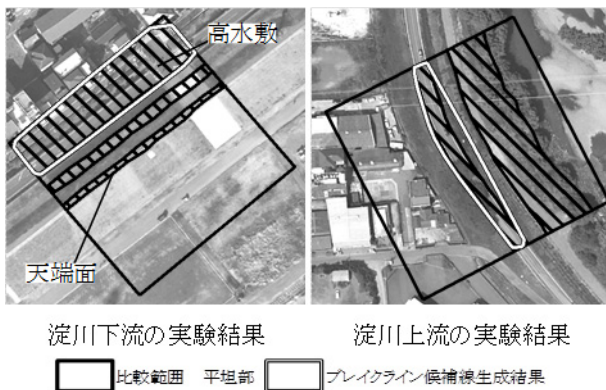


図 6 LP データを用いたブレイクライン候補線の生成  
【出典】 Google MAP

Fig. 6 Potential breakline generated from LP data  
【Source】 Google Map.



図 7 LP データを用いたブレイクラインの抽出  
【出典】 Google MAP

Fig. 7 Breakline extracted from LP data  
【Source】 Google Map.

タから任意の間隔で横断図を作成し、その横断図内で断面変化点を目視で確認しながら作成した。断面変化点の判断基準は、文献 [23] を参照されたい。

### 3.2.3 実験結果

#### (1) ブレイクライン候補線の生成実験

MMS 手法を用いて LP データから生成したブレイクライン候補線と評価基準となる平坦部との重ね合わせ結果を図 6 に示す。図 6 を確認すると、淀川上流の実験結果では、天端面からブレイクライン候補線を生成していることが分かる。しかし、淀川下流の実験結果では、高水敷のブレイクライン候補線を生成していることが分かる。また、MMS 手法は、LP データに含まれる複数の平坦部からブレイクライン候補線を 1 つだけ生成していることが分かる。これは、計測位置の密度が最も高いという MMS データの密度分布の特性を用いて、計測車両が走行した平坦部のブレイクライン候補線を生成しているためである。これらのことから、LP データに MMS 手法を適用した場合に「ブレイクライン候補線を正しく生成できない課題」が明らかとなった。

#### (2) ブレイクラインの抽出実験

MMS 手法を用いて LP データから抽出したブレイクラインと正解データとの重ね合わせ結果を図 7 に示す。図 7 を確認すると、淀川上流では問題なくブレイクラインを抽出できているが、淀川下流では小段を示すブレイクライン候補線から天端面のブレイクラインを誤抽出していることが分かる。その理由について、実験に用いた淀川下流地点を詳細に調査したところ、MMS データと LP データの計測範囲の特性の違いが原因であることが分かった。MMS 手法は、ブレイクライン候補線の近傍にある平坦部から高さの違いを区別せずにブレイクラインを抽出する。しかし、LP データは、天端面や小段など複数の平坦部が含まれる計測結果である。そのため、図 8 に示すように、「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出されると

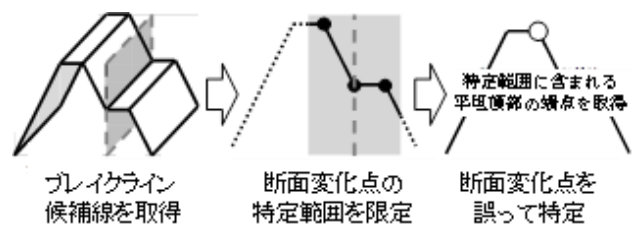


図 8 MMS 手法のブレイクライン抽出手法  
Fig. 8 Method for extracting breakline using MMS.

いう課題」が明らかとなった。

## 4. LP 手法の提案

### 4.1 MMS 手法を LP データに適用する場合の課題への対応方針

本研究では、「ブレイクライン候補線を正しく生成できないという課題」と「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出されるという課題」の 2 つの課題をふまえて、LP データから河川空間全体の平坦部をそれぞれ特定し、ブレイクラインを抽出する手法を新たに提案する。

#### 4.1.1 ブレイクライン候補線を正しく生成できないという課題への対応方針

ブレイクライン候補線の抽出は、点群データから平坦部の領域を抽出する技術で対応する。本研究で用いる領域抽出技術を選定するため、点群データから領域を抽出する代表的な技術 [27] である領域成長法、RANSAC 法、MMS 手法で用いた DBSCAN 法の改良手法を比較する。

領域成長法は、任意に指定したシード領域に含まれる点群データから平面式を算出し、平面上に存在する点群データの領域を抽出する。RANSAC 法は、点群データから繰り返し平面領域を探索し、最も多くの点群データを含む平面領域を抽出する。MMS 手法で用いた手法は、まず、一定の標高ごとの点群データから、それぞれ距離や密度が閾値以下の点群データの領域を抽出し、その中から最も平坦部らしい集合を取得する。これらの技術を用いて河川周

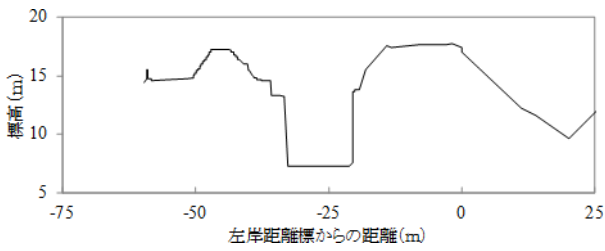


図 9 淀川 34.6km 地点 (左岸)

Fig. 9 Cross-sectional survey data at 34.6 km point of Yodo's river (Left side bank).

辺環境の LP データからの平坦部抽出を実施したところ、次のことが分かった。領域成長法では、開始時に設定したシード領域から算出した平面式を基準として領域を抽出する。しかし、河川堤防の平坦部は緩やかな傾斜やクラックなどがあり複数の平面で構成されるため、平面式が異なり、平坦部を正しく抽出できないという課題が見られた。RANSAC 法では、法面と一部の広範囲な平坦部の領域を抽出できたが、天端面や小段などの平坦部は抽出できなかった。RANSAC 法は、異常値が少なく、最も多くの点群データを含む領域を抽出するため、幅の狭い小段などの平坦部をノイズとして除外したためであると考えられる。MMS で用いた手法では、LP データの密度が一様であるため、LP データの点と点との距離に基づいて平坦部を抽出する。河川堤防は、一定の標高ごとに領域を抽出すると、天端面を含む集合のみ点群データが 1 つの領域に集中し、その他の集合では、河川堤防の表側と裏側で 2 つ以上に領域が分散するという特徴があるため、MMS で用いた手法は、河川堤防の特徴に基づいて平坦部と平坦部から続く法面を含む領域を抽出できた。

このことから、本研究では、MMS 手法で用いた平坦部領域の抽出技術を改良してブレイクライン候補線を正しく生成できないという課題に対応する。しかし、河川堤防には、天端面以外にも小段などの平坦部が含まれている。また、実際の河川横断面図を整理したところ、図 9 に示すような用水路などの構造物を挟む複数の堤防形状が並ぶ事例が見られた。そこで、本研究では、平坦部を中心に点群データを河川堤防の表側と裏側に分割し、それぞれ繰り返し平坦部を抽出する処理を追加する。また、河川堤防を一定の標高ごとに分割すると、平坦部の集合は法面の集合と比べて横断方向に広い領域となるという特徴に基づいて小段などの平坦部を抽出する処理を新たに追加する。

#### 4.1.2 天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出されるという課題への対応方策

天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出されるという課題には、ブレイクライン候補線の高さを考慮してブレイクラインを抽出する処理で対応する。具体的には、ブレイクライン候補線が通る高さ周辺の LP データからブレイクラインを抽出する処理を新たに追加する。

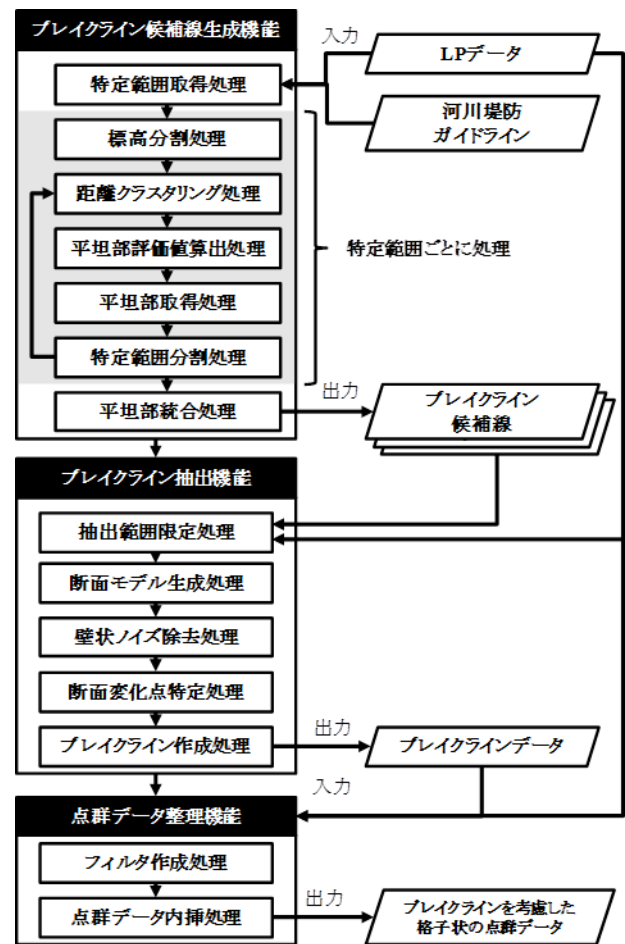


図 10 処理の流れ

Fig. 10 Processing flow.

## 4.2 処理の流れ

LP 手法の処理の流れを図 10 に示す。LP 手法は、ブレイクライン候補線生成機能およびブレイクライン抽出機能、点群データ整理機能の 3 つの機能で構成される。LP 手法は、LP データと河川堤防の範囲と方向を示す基準線（以下、「河川堤防ガイドライン」という）を入力して、3 つの機能を経てブレイクラインを考慮して整理した点群データを生成する。河川堤防ガイドラインは、河川の左右岸に設置された距離標を繋いだ距離標側線や、航空写真から判読した河川堤防の形状を参考に作成した河川の長手方向を示す折線などを用いる。

### 4.2.1 ブレイクライン候補線生成機能

本機能は、「ブレイクライン候補線を正しく生成できないという課題」に対応するため、LP データから平坦部を繰り返し特定する処理と、平坦部を統合してブレイクライン候補線を生成する処理を MMS 手法に加えた 7 つの処理を経て、複数の平坦部からそれぞれブレイクライン候補線を生成する。特定範囲取得処理は、河川空間周辺の処理範囲から LP データを取得する。標高分割処理は、標高の値を用いて LP データを複数のレイヤに分割する。距離クラスタリング処理は、レイヤに含まれる LP データを距離に



基づいてクラスタリングする。平坦部評価値算出処理は、平坦部である度合いを示す平坦部評価値をレイヤごとに算出する。平坦部取得処理は、平坦部評価値と平坦部の幅の閾値とに基づき平坦部を取得する。なお、平坦部の幅が閾値未満の場合は、特定範囲分割処理を省略し、平坦部統合処理に遷移する。特定範囲分割処理は、まず、平坦部を基準に処理範囲を分割する。次に、再び距離クラスタリング結果分割処理に遷移し、処理を継続する。平坦部統合処理は、複数の平坦部を1つに統合し、ブレイクライン候補線を生成する。なお、各処理の詳細は5章で詳述する。

#### 4.2.2 ブレイクライン抽出機能

本機能は、「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出されるという課題」に対応するため、ブレイクライン候補線の高さを考慮した処理をMMS手法に加えた5つの処理を経て、ブレイクライン候補線の高さを考慮したブレイクラインを抽出する。抽出範囲限定処理は、ブレイクライン候補線を用いて標高を考慮した断面変化の抽出範囲を限定する。断面モデル生成処理は、各抽出範囲の点群データを用いて断面モデルを作成する。壁状ノイズ除去処理は、断面モデルを用いて天端面よりも高い標高の点群データを除去した断面モデルを作成する。断面変化点特定処理は、断面モデルから天端面と法面の交点を断面変化点として取得する。ブレイクライン作成処理は、断面変化点をつないでブレイクラインを作成する。なお、各処理の詳細は6章で詳述する。

#### 4.2.3 点群データ整理機能

本機能は、2つの処理を経てLPデータを整理した点群データを生成する。フィルタ作成処理は、ブレイクラインの抽出結果と格子状のフィルタを重ねたブレイクラインフィルタを作成する。点群データ内挿処理は、ブレイクラインフィルタを用いて点群データの内挿処理を行い、ブレイクラインを考慮した格子状の点群データにLPデータを整理する。なお、各処理の詳細は、文献[23]を参照されたい。

### 5. ブレイクライン候補線生成アルゴリズム

本研究では、MMS手法のブレイクライン候補線生成機能を拡張して、LPデータに含まれる天端面や小段などの平坦部から、それぞれブレイクライン候補線を生成する手法を提案する。本機能のアルゴリズムの流れを次に示す。ここで、LPの点群データをPとする。なお、本章では、河川に対する横断方向をX軸、縦断方向をY軸、高さ方向をZ軸として図示する。

**Step1.** 特定範囲取得処理は、広範囲なLPデータから平坦部を特定する処理範囲（以下、「特定範囲」という）を複数取得する。

**Step2.** 特定範囲取得処理で取得した特定範囲ごとにStep3~Step8の処理を繰り返し実行する。

**Step3.** 標高分割処理は、特定範囲の点群データを一定の標高間隔で複数のレイヤに分割する。

**Step4.** クラスタリング処理は、標高分割処理で複数のレイヤに分割された点群データを距離に基づきクラスタリングする。

**Step5.** 平坦部評価値算出処理では、各レイヤのクラスタの領域外形線およびレイヤの領域面積に基づき、平坦部評価値をレイヤ単位に算出する。

**Step6.** 平坦部取得処理では、算出した平坦部評価値と、平坦部の幅の閾値とに基づき平坦部を取得する。

**Step7.** 平坦部が存在しない場合はStep9.へ遷移する。

**Step8.** 特定範囲分割処理は、平坦部取得処理で取得した平坦部の中央線を用いて特定範囲を2つに分割し、Step3.へ遷移する。

**Step9.** 平坦部統合処理では、特定範囲取得処理で取得した特定範囲間で重複する平坦部を1つに統合し、ブレイクライン候補線を生成する。

#### 5.1 特定範囲取得処理

本処理は、広範囲なLPデータから河川堤防の平坦部を判別する前処理として、LPデータから特定範囲を取得する。特定範囲取得処理の方法を図11に示す。本処理では、まず、河川堤防ガイドラインに沿って縦断方向  $v_{candidate}$ 、横断方向  $c_{candidate}$  の矩形領域を作成する。このとき、矩形領域は、縦断方向に  $v_{candidate}$  の半分だけ重ねて作成する。次に、作成した領域の範囲内から点群データを抽出する。この処理から得た特定範囲の集合を  $R = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_i\}$ 、特定範囲  $r_i$  の点群データを  $P_i = \{p(i,1), p(i,2), p(i,3), \dots, p(i,a)\}$  とする。なお、本機能では、特定範囲  $r_i$  ごとに標高分割処理から特定範囲分割処理までの5つの処理をそれぞれ実施する。そのため、本章で説明する各変数の添え字  $i$  は、特定範囲を示す値とする。

#### 5.2 標高分割処理

本処理は、特定範囲  $r_i$  から平坦部の領域を特定する前処理として、点群データ  $P_i$  を一定の標高間隔で複数のレイヤに分割する。標高分割処理は、図12に示すとおり、特定

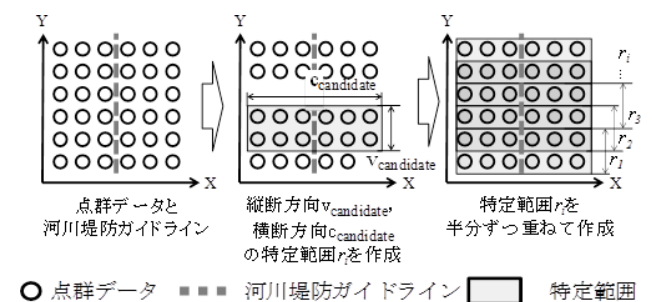


図 11 特定範囲の取得処理

Fig. 11 Extration process of identify range.

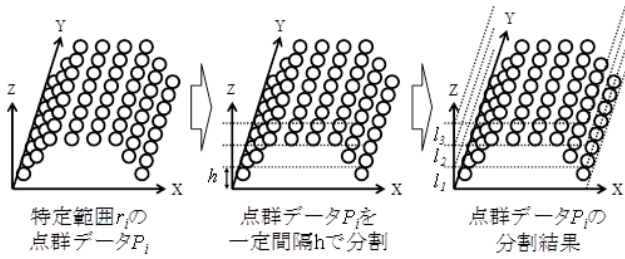


図 12 標高の分割処理

Fig. 12 Segmentation process of elevation.

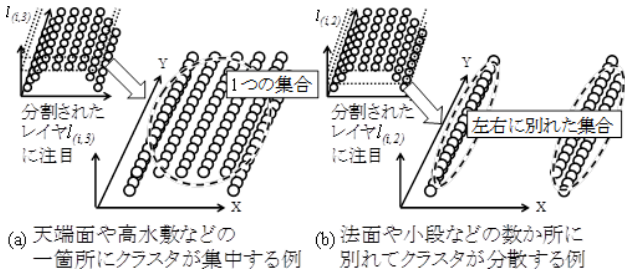


図 13 平坦部とその他に分類されたクラスター

Fig. 13 Planation cluster and other clusters.

範囲  $r_i$  の点群データ  $P_i$  を高さ  $h$  ごとの領域 (以下、「レイヤ」という)  $L_i = \{l_{(i,1)}, l_{(i,2)}, l_{(i,3)}, \dots, l_{(i,j)}\}$  に分類する.

### 5.3 距離クラスタリング処理

本処理は、レイヤ内の点群データに対して計測点間の距離に基づくクラスタリングを行い、点群データをクラスター単位に分割する。各レイヤ単位で距離に基づくクラスタリングを実行した場合、図 13 に示すように、点群データが 1 か所に集中した平坦部のレイヤと、その他のレイヤに分類できる。具体的には、天端面や高水敷などの 1 か所にクラスターが集中するレイヤと、法面や小段などの数か所に分かれてクラスターが分散するレイヤとに分類される。クラスタリング対象の各点の距離に基づくクラスタリング手法として、データマイニングの一手法である DBSCAN 法 [29] がある。ただし、LP データの点群密度は一様であるため、本処理でのクラスターの所属の有無は、点間の相対的な距離のみと距離の閾値  $Eps$  を用いる。点間の相対的な距離と距離の閾値  $Eps$  に基づくクラスタリング処理の方法を図 14 に示す。まず、任意のレイヤ  $l_{(i,j)}$  に含まれる点群データ  $PL_{(i,j)} = \{pl_{(i,j,1)}, pl_{(i,j,2)}, pl_{(i,j,3)}, \dots, pl_{(i,j,m)}\}$  をクラスタリングする。具体的には、まず、点群データ  $PL_{(i,j)}$  から任意の点  $pl_{(i,j,m)}$  を取得する。次に、任意の点  $pl_{(i,j,m)}$  から距離  $Eps$  内の近傍点  $pl_{(i,j,m+1)}$  を同クラスターの点群として取得する。そして、クラスターに属する点群データ  $pl_{(i,j,m+1)}$  から距離  $Eps$  内の近傍点を繰り返し取得する。この処理を新たな点が取得できなくなるまで続ける。この処理から得た任意のレイヤ  $l_{(i,j)}$  のクラスター集合を  $Cl_{(i,j)} = \{cl_{(i,j,1)}, cl_{(i,j,2)}, cl_{(i,j,3)}, \dots, cl_{(i,j,k)}\}$  とする。

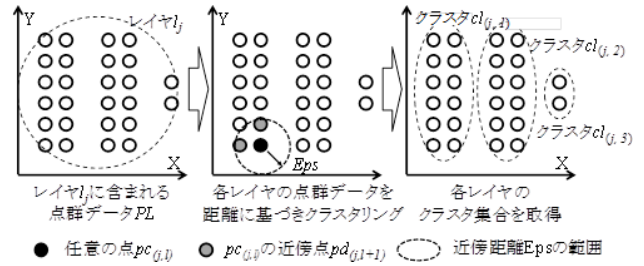


図 14 距離によるクラスタリング処理

Fig. 14 Clustering process by distance.

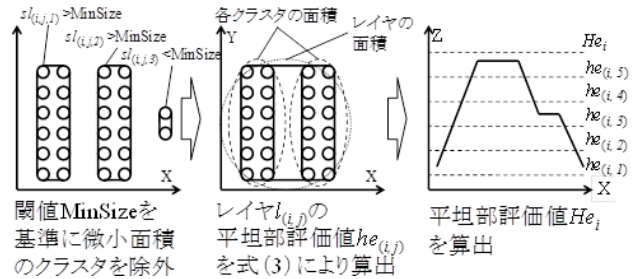
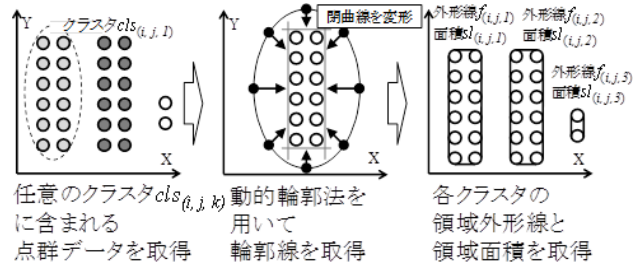


図 15 平坦部の評価値算出処理

Fig. 15 Process for calculating score in planation surface.

### 5.4 平坦部評価値算出処理

本処理は、点群データの中から天端面や小段などの平坦部を特定するため、各レイヤの領域面積とレイヤに属するクラスターの領域面積との割合を用いて各レイヤの平坦部評価値を算出する。点群データは計測点間に間隙があるため、明確な領域境界を持たない。そのため、本処理では、各レイヤに含まれる点群データの領域面積を求める手法として、動的輪郭法 [28] によって取得した輪郭線から面積を算出する。動的輪郭法とは、対象を内包する閉曲線が移動と変形を繰り返して対象の輪郭をとらえる手法である。

動的輪郭法によって取得した輪郭線の面積に対する平坦部候補取得処理の方法を図 15 に示す。まず、クラスター集合  $Cl_{(i,j)}$  の各クラスターに含まれる点群データから、動的輪郭法を用いて領域外形線を取得し、領域外形線の面積を算出する。ここで、領域外形線の構成点を  $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_o\}$  とし、クラスター集合  $Cl_{(i,j)}$  の各領域面積を  $Sl_{(i,j)} = \{sl_{(i,j,1)}, sl_{(i,j,2)}, sl_{(i,j,3)}, \dots, sl_{(i,j,k)}\}$  とする。各クラスターの領域面積  $sl_{(i,j,k)}$  は、式 (1) により算出する。

$$sl_{(i,j,k)} = \left| \frac{1}{2} \sum_{o=1}^{|F|} (x_o y_{o+1} - x_{o+1} y_o) \right| \quad (1)$$



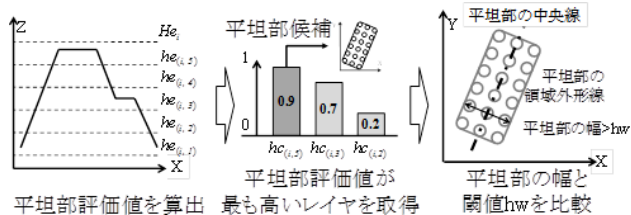


図 16 平坦部の取得処理  
 Fig. 16 Process for identifying planation surface.

式 (1) の  $x_o, y_o$  は、領域外形線  $F$  の頂点  $f_o$  の  $x, y$  座標である。また、 $x_{o+1}, y_{o+1}$  は頂点  $f_o$  と隣り合う点  $f_{o+1}$  の  $x, y$  座標である。次に、レイヤ集合  $L$  の各レイヤ  $l_{(i,j)}$  に含まれる点群データから、前述したクラスタと同様にレイヤの領域面積  $s_{(i,j)}$  を算出する。このとき、レイヤ  $l_{(i,j)}$  に含まれるクラスタの領域面積  $sl_{(i,j,k)}$  が閾値 Min-Size 以下であった場合、微小面積のクラスタ  $cl_{(i,j,k)}$  を除去したレイヤ  $l_{(i,j)}$  の点群データを用いてレイヤの領域面積を算出する。そして、レイヤの領域面積とレイヤに含まれるクラスタの領域面積とを用いて、平坦部評価値  $He_i = \{he_{(i,1)}, he_{(i,2)}, he_{(i,3)}, \dots, he_{(i,j)}\}$  を式 (2) により算出する。

$$he_{(i,j)} = \frac{\sum_{k=1}^{|S_{(i,j)}|} (x_o y_{o+1} - x_{o+1} y_o)}{s_{(i,j)}} \quad (2)$$

5.5 平坦部取得処理

本処理は、河川堤防を一定の標高ごとの集合に分割すると、天端面を含む集合のみ点群データが1つに集中する特徴と、平坦部の集合や法面の集合と比べて横断方向に広い領域となるという特徴に基づいて平坦部のレイヤを特定する。具体的には、各レイヤの平坦部評価値  $he_{(i,j)}$  と平坦部の幅を用いて平坦部のレイヤを特定する。平坦部の幅は、領域の中央線の長さで領域面積を除算して算出する。なお、領域の中央線は、領域外形線の構成点を最小自乗法でフィットした直線とする。平坦部評価値  $he_{(i,j)}$  と平坦部の幅とを用いて平坦部を特定する方法を図 16 に示す。まず、各レイヤの領域外形線から最も平坦部評価値が高いレイヤを平坦部候補となるレイヤ（以下、「平坦部候補レイヤ」という）として取得する。なお、複数のレイヤを取得した場合は、最も標高の高い位置のレイヤを平坦部候補レイヤとして取得する。次に、平坦部候補レイヤに含まれる点群データから、動的輪郭法 [28] を用いて領域外形線  $F$  を取得する。そして、平坦部候補レイヤの幅を算出するため、式 (3), (4) を用いて平坦部候補レイヤの領域外形線から平坦部の中央線  $y = ax + b$  のパラメータを算出する。

$$a = \frac{\sum_{o=1}^{|F|} (x_o - t)(y_o - u)}{\sum_{o=1}^{|F|} (x_o - t)^2} \quad (3)$$

$$b = u - at \quad (4)$$

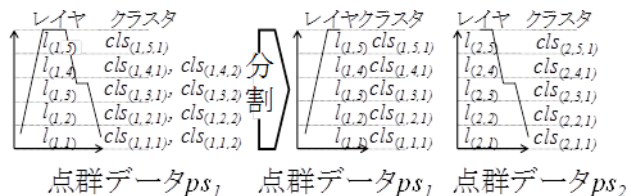


図 17 特定範囲の分割処理  
 Fig. 17 Segmentation process of identify range.

式 (3) の  $x_o, y_o$  は、領域外形線  $F$  の座標の集合  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_o\}, Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_o\}$  内の座標値である。また、 $t$  は  $X$  の平均値、 $u$  は  $Y$  の平均値である。そして、中央線と平坦部候補レイヤの領域外形線の 2 交点間の距離を平坦部の長さとして算出する。最後に、平坦部候補レイヤの領域面積と平坦部の長さを用いて算出した平坦部の領域幅が閾値  $hw$  以上ならば、平坦部候補レイヤを平坦部として取得する。

5.6 特定範囲分割処理

本処理では、河川堤防の天端面と小段、高水敷などの平坦部をそれぞれ特定するため、平坦部取得処理で取得した平坦部のレイヤに含まれる点群データを取り除き、特定範囲を分割する。本処理によって特定範囲を分割することで、河川空間に存在する天端面以外の平坦部を特定できるようにする。特定範囲の分割イメージを図 17 に示す。まず、 $P_i$  から平坦部に含まれる点群データを取り除く。次に、平坦部取得処理で算出した平坦部の中央線を用いて点群データを左右に分割する。ここで、左右に分割された点群データの集合を  $Ps_i = \{ps_{(i,1)}, ps_{(i,2)}, ps_{(i,3)}, \dots, ps_{(i,q)}\}$  とする。なお、 $q$  は繰り返し分割した総数を示す。

5.7 平坦部統合処理

点群データから特定した複数の平坦部を1つに統合してブレイクライン候補線を取得するため、特定した平坦部の領域外形線を統合する。これにより、標高分割処理によって緩やかな傾斜の平坦部が複数のレイヤに分割された場合でも、1つの平坦部として統合することができる。平坦部統合処理の流れを図 18 に示す。本処理では、まず、領域  $r_i$  と隣接する領域  $r_{i+1}$  で重複する平坦部を取得する。図 18 に示すとおり、領域外形線は、始点と終点が一致する閉じた折線である。そのため、平坦部の重複は、平坦部の領域外形線の交差により判定する。次に、領域外形線が交差する2つの平坦部を1つに統合する。この処理を交差する領域外形線がなくなるまで繰り返す。そして、統合された平坦部の領域外形線をブレイクライン候補線  $BL_{candidate}$  として取得する。

6. ブレイクライン抽出アルゴリズム

本研究では、MMS 手法のブレイクライン抽出機能を拡

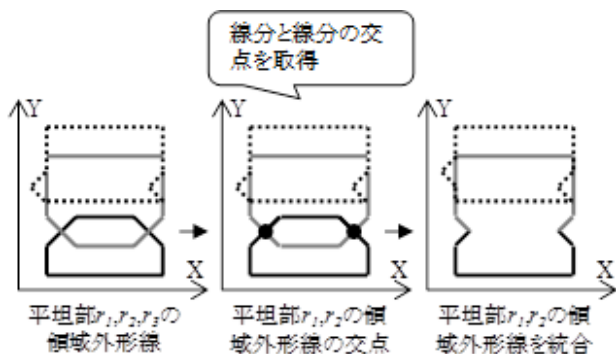


図 18 平坦部の統合処理

Fig. 18 Integration process of planation surfaces.

張して、LP データに含まれる天端面や小段などのブレイクライン候補線から、それぞれブレイクラインを抽出する手法を提案する。本機能のアルゴリズムの流れを次に示す。

- Step1.** 抽出範囲限定処理では、ブレイクライン候補線を中心に抽出範囲を複数取得する。
- Step2.** 抽出範囲限定処理で取得した抽出範囲ごとに Step3~Step4 の処理を繰り返し実行する。
- Step3.** 断面モデル生成処理および壁状ノイズ除去処理では、抽出範囲の点群データから壁状ノイズを除去した断面モデルを生成する。
- Step4.** 断面変化点特定処理では、Step3 で生成した断面モデルから平坦部の断面変化点を特定する。
- Step5.** ブレイクライン生成処理では、断面変化点特定処理で取得した複数の断面変化点を 1 つに統合し、ブレイクラインを生成する。

### 6.1 抽出範囲限定処理

本処理では、「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出されるという課題」に対応するため、ブレイクライン候補線を中心とする直方体領域から抽出した点群データを用いてブレイクラインを抽出する。これにより、高さの異なる平坦部のブレイクラインが誤抽出されることを防ぐ。抽出範囲の限定イメージを図 19 に示す。まず、ブレイクライン候補線の始点からブレイクラインに沿って、縦断方向  $v_{breakline}$  および横断方向  $c_{breakline}$ 、鉛直方向  $h$  の直方体領域を連続して作成する。次に、作成した

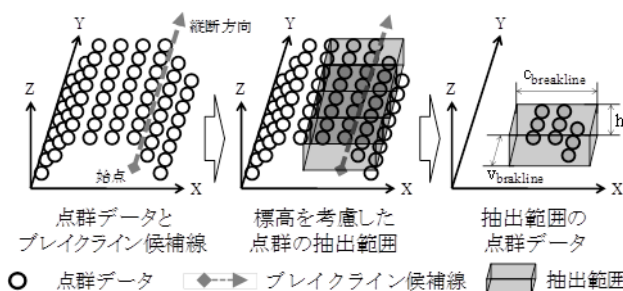


図 19 抽出範囲の決定処理

Fig. 19 Limitation process of extraction range.

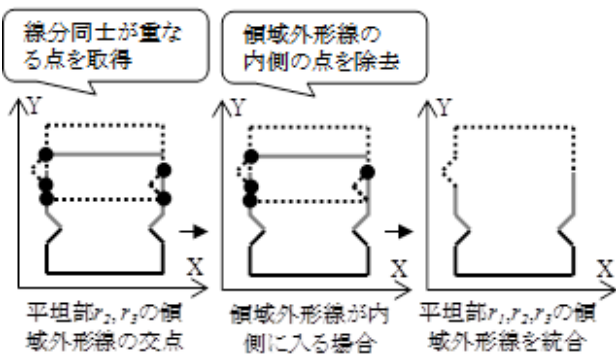


図 18 平坦部の統合処理

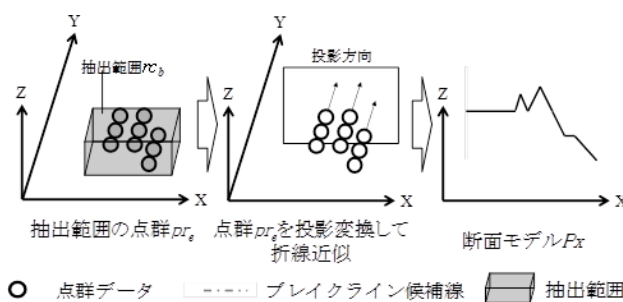


図 20 断面モデルの生成処理

Fig. 20 Generation process of cross-section model.

各領域から点群データを抽出する。この処理で得た領域を  $RC = \{rc_1, rc_2, rc_3, \dots, rc_b\}$  とし、 $rc_b$  に含まれる点群データを  $Pr = \{pr_1, pr_2, pr_3, \dots, pr_e\}$  とする。ここで、縦断方向  $v_{breakline}$  の値は、河川堤防の縦断勾配の影響を受けない範囲を適用する。

### 6.2 断面モデル生成処理

本処理では、抽出範囲限定処理によって限定した各領域  $rc_b$  の断面形状を明らかにするため、抽出した点群データ  $pr_e$  から断面変モデルを生成する。断面モデルの生成イメージを図 20 に示す。まず、抽出範囲限定処理で抽出した点群データ  $pr_e$  を縦断方向に投影変換した 2 次元の点群データ  $Pr' = \{pr'_1, pr'_2, pr'_3, \dots, pr'_e\}$  を作成する。次に、2 次元の点群データ  $Pr'$  を折線近似して断面モデルを生成する。この処理で得た断面モデルの構成点を  $Px = \{px_1, px_2, px_3, \dots, px_g\}$  とする。

### 6.3 壁状ノイズ除去処理

本処理では、断面モデル生成処理によって生成した断面モデルを利用して、平坦部よりも高い位置に存在する点群データを壁状ノイズとして取り除く。また、内挿処理によって壁状ノイズで隠れていた天端面を補間する。壁状ノイズの除去イメージを図 21 に示す。まず、壁状ノイズに覆われた平坦部を推定するため、断面モデル  $Px$  から、水平との角度が閾値  $\beta$  以内の線分を探索する。そして、その中から最も高い位置に存在する線分を平坦部として取得する。そして、平坦部を延長し、既存の断面モデルとの交点の中か

ら、最も平坦部との距離が離れた交点を断面モデルに追加する。最後に、平坦部より高い点群データを断面モデルの中からノイズとして除去する。この処理で得た壁状ノイズを除去した断面モデルを  $Pm = \{pm_1, pm_2, pm_3, \dots, pm_n\}$  とする。

#### 6.4 断面変化点特定処理

本処理では、断面モデル生成処理および壁状ノイズ除去処理で生成した断面モデルから、平坦部の断面変化点を特定する。断面変化点の特定イメージを図 22 に示す。まず、断面モデル  $Pm$  から、水平との角度差が閾値  $\beta$  以内の線分を平坦部として抽出する。次に、平坦部から連続する水平幅が鉛直幅を上回る面を平坦部の延長として抽出する。そして、これらの抽出した面の端点の中から、最もブレイクライン候補線と距離に近い点を断面変化点として取得する。これにより、植生や風化などの影響による平坦部の変形を考慮した断面変化点が取得できる。そして、この処理から得た断面変化点を  $pc_b$  とし、各領域の断面変化点の集合を  $Pc = \{pc_1, pc_2, pc_3, \dots, pc_b\}$  とする。

#### 6.5 ブレイクライン作成処理

本処理では、断面変化点  $Pc$  からブレイクラインを作成する。具体的には、断面変化点  $Pc$  の各点を結んで折れ線を作成する。次に、各領域のブレイクライン候補線の始点からの距離を横軸、ブレイクライン候補線に対する各点の垂線の長さを縦軸としてメディアンフィルタによって平滑化する。そして、平滑化された断面変化点の点列  $Pc$  を各

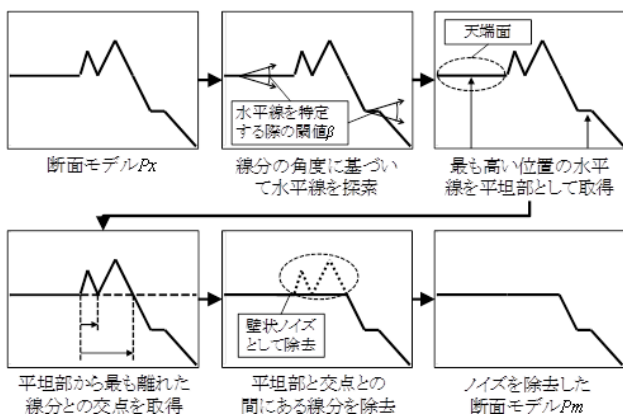


図 21 壁状ノイズの除去処理

Fig. 21 Process for removing wall-shaped noise.

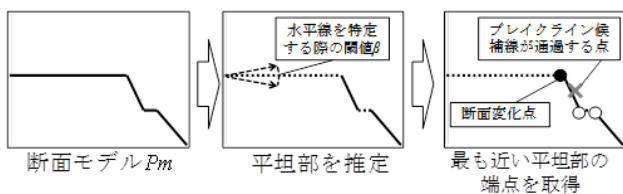


図 22 断面変化点の特定処理

Fig. 22 Process for identifying cross-sectional change points.

頂点とするブレイクライン  $BL_{breakline}$  を作成する。

## 7. 実証実験

### 7.1 実験概要

本実験では、MMS 手法における「ブレイクライン候補線を正しく生成できないという課題」と「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出されるという課題」の 2 つの課題が、LP 手法で解消できているかを確認するため、MMS 手法と LP 手法とで生成した 3 次元モデルの再現精度を比較して評価する。また、LP 手法の大規模な点群データへの適用可能性を評価するため、点群データ数と 3 次元モデル生成時間の関係性を評価する。3 次元モデルの再現精度は、3 次元モデルから生成した横断面図を用いた比較と 3 次元モデルの可視化による比較との 2 つの指標を用いて評価する。横断面図を用いた比較では、各手法で生成した 3 次元モデルの横断面図と実際の河川管理で用いられている河川横断面図とを比較して評価する。可視化による比較では、各手法で生成した 3 次元モデルを AutoCAD Civil3D 2012 で可視化し、天端面や小段などの各平坦部を再現した 3 次元モデルが生成されているかを確認する。3 次元モデル生成時間の評価では、点群データ数ごとの 3 次元モデルの生成時間を記録し、大規模な点群データを対象とした場合の適用可能性を確認する。

### 7.2 実験条件

#### 7.2.1 実験環境と実験データ

本実験で用いた実験環境を表 2、実験データを表 3 に示す。また、評価対象の河川横断面図の計測地点 10 カ所を図 23 に示す。計測地点は、平成 22 年度に淀川水系本川で測量された河川横断面図 186 枚の左右岸から、次の 2 つの条件に該当する 10 カ所を選定した。

表 2 実験環境

Table 2 Experimental environment.

項目			仕様
C	P	U	Intel® Core™2 Duo 3.50Ghz
メモリ			16.0GB
開発環境			Visual Studio 2010
開発言語			Visual C#.NET

表 3 実験で用いた点群データの詳細

Table 3 Details of experimental data.

項目	MMS データ	LP データ
計測時期	平成 21 年度	平成 22 年度
計測範囲	走行距離 100m 分	100m <sup>2</sup> 範囲
計測点数	約 30 万点	約 8 千点
水平方向の計測誤差	±15cm	±25~30cm
鉛直方向の計測誤差	±10cm	±25cm



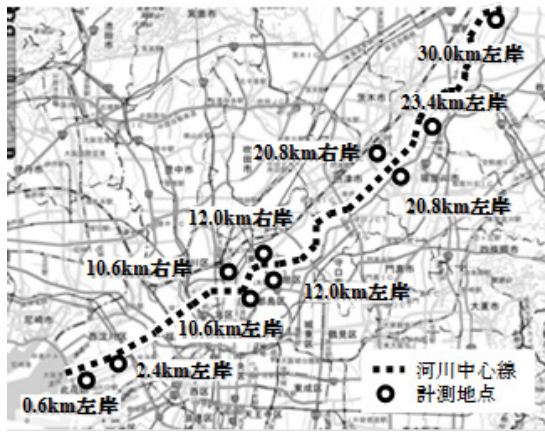


図 23 実験データの計測地点

【出典】国土地理院

Fig. 23 Measurement points for experiment

【Source】Geographical Survey Institute Maps.

1. 河川横断図の左右岸から河川堤防が築堤されており、天端面と小段を確認できる典型的な凸型形状の地点を選定する。
2. 河川堤防における河川横断図と LP データの標高差の平均が、本研究で用いた LP データの鉛直方向の計測誤差である 25 cm 以内に収まっている断面を選定する。

河川ガイドラインは、河川の左右岸に設置された河川距離標を結んだ折線を用いる。

### 7.2.2 パラメータの設定

本項では、LP 手法で用いる 8 つのパラメータ  $v_{candidate}$ ,  $c_{candidate}$ ,  $hw$ ,  $Eps$ ,  $v_{breakline}$ ,  $c_{breakline}$ ,  $h$ ,  $\beta$  を実験条件として設定する。パラメータ  $v_{candidate}$  と  $c_{candidate}$  は、ブレイクライン候補線生成機能の特定範囲取得処理で特定範囲を設定する際の値で、パラメータ  $v_{candidate}$  は特定範囲の縦断方向、パラメータ  $c_{candidate}$  は特定範囲の横断方向の値である。パラメータ  $hw$  は、ブレイクライン候補線生成機能の平坦部取得処理で、平坦部と判定するための閾値である。パラメータ  $Eps$  は、ブレイクライン候補線生成機能のクラスタリング処理で、任意の点をクラスタに含めるかどうかを判定するための閾値である。パラメータ  $v_{breakline}$  と  $c_{breakline}$  は、MMS 手法と同様にブレイクライン抽出機能で抽出範囲を設定する値である。そのため、パラメータ  $v_{breakline}$  と  $c_{breakline}$  は、文献 [23] と同様に  $v_{breakline} = 1.0\text{m}$ ,  $c_{breakline} = 3.0\text{m}$  とする。パラメータ  $h$  は、ブレイクライン抽出機能の抽出範囲限定処理で、点群データから処理範囲の標高を制限する値である。また、ブレイクライン候補線生成機能の標高分割処理で、点群データを一定間隔の標高で分割する値である。そのため、パラメータ  $h$  は文献 [23] と同様に  $h = 0.3\text{m}$  とする。パラメータ  $\beta$  は、MMS 手法と同様に断面モデルの線分の傾きから平坦部を特定する値である。そのため、パラメータ  $\beta$  は、

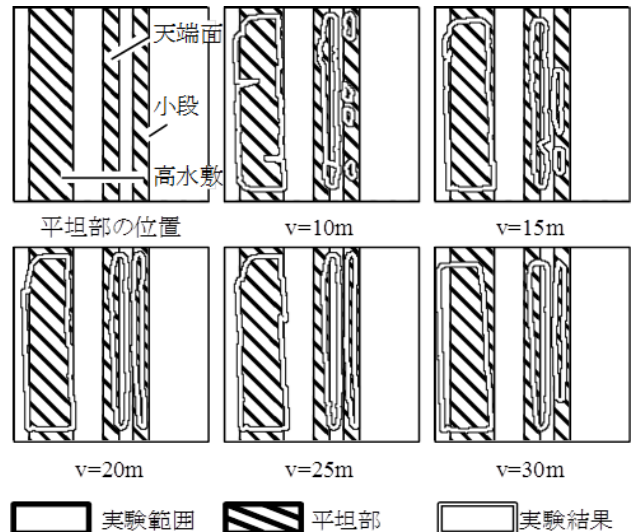


図 24 パラメータ  $v$  の予備実験結果

Fig. 24 Preliminary experiment for parameter  $v$ .

文献 [23] と同様に  $\beta = 5\%$  (2.9 度) とする。予備実験は、本実験と同様に典型的な凸型の堤防形状の LP データを用いた。なお、ブレイクライン抽出機能で用いるパラメータの値は、文献 [23] を参照されたい。

#### (1) パラメータ $c_{candidate}$ , $v_{candidate}$

パラメータ  $c_{candidate}$  は、LP データから河川空間の平坦部を特定する処理範囲を取得する際の横断方向の値である。そのため、本実験では、河川空間を含む十分な範囲として河川法の第四節で定められている河川保全区域 (河川空間を保全するため、河川管理者の指定によって一定の行為が制限される区域) の基準値である 50m の範囲を片幅の値として、 $c_{candidate} = 100\text{m}$  を設定する。

予備実験では、パラメータ  $c_{candidate}$  の値を固定して、 $v_{candidate}$  の値を 10m から 30m まで、5m 間隔で変化させ、ブレイクライン候補線の生成を行った。ブレイクライン候補線の生成結果と、手作業で作成した平坦部を重ね合わせた結果を図 24 に示す。図 24 を確認すると、 $v_{candidate} = 10\text{m}$ ,  $v_{candidate} = 15\text{m}$  の場合、天端面や小段のブレイクライン候補線が途切れているのに対して、 $v_{candidate} = 20\text{m}$  以上の場合、天端面と小段の連続したブレイクライン候補線を生成できたことが分かる。それに対し、 $v_{candidate} = 30\text{m}$  の場合、各平坦部のブレイクライン候補線を網羅的に生成できないことが分かる。また、 $v_{candidate} = 20\text{m}$ ,  $v_{candidate} = 25\text{m}$  の天端面と小段におけるブレイクライン候補線で囲われた領域と平坦部が重なった領域の面積を比較すると、 $v_{candidate} = 20\text{m}$  が約 74%,  $v_{candidate} = 25\text{m}$  が約 68% となり、 $v_{candidate} = 20\text{m}$  の方が良い結果となった。このことから、本実験では、 $v_{candidate} = 20\text{m}$  と設定する。

#### (2) パラメータ $Eps$

パラメータ  $Eps$  は、文献 [23] と同様、本実験で利用する点群データから、各点の最近傍点までの距離の平均値を算

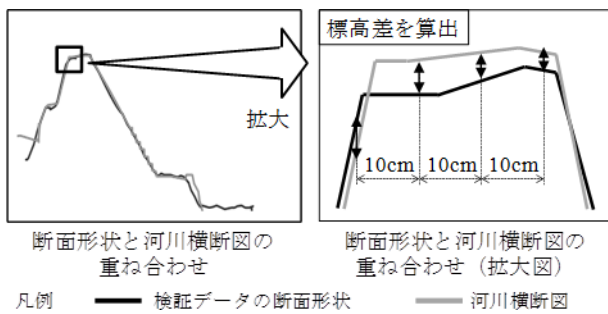


図 25 MMS 手法モデルと LP 手法モデルの評価

Fig. 25 Evaluation of method models of MMS and LP.

出して利用する。そのため、各地点の点群データからそれぞれ算出した値の平均値として、 $Eps = 1.59\text{ m}$ を採用する。

(3) パラメータ  $hw$

パラメータ  $hw$  は、ブレイクライン候補線生成機能の平坦部特定処理で、平坦部と判定する際の幅を設定する。小さな値を設定すると幅の狭い平坦部や傾斜の緩やかな法面からもブレイクライン候補線を生成し、ブレイクラインの誤抽出につながる恐れがある。一方、大きな値を設定すると、平坦部を特定できず、重要なブレイクラインを逃す可能性がある。本実験では、国土交通省の定める河川構造令 [30] の第二十三条で定められている小段幅の最小値を参照して、 $hw = 3\text{ m}$  とする。

7.3 実験の手順

本実験では、MMS 手法を用いて作成した 3 次元モデル (以下、MMS 手法モデル) および LP 手法を用いて作成した 3 次元モデル (以下、LP 手法モデル) を用意し、その再現精度を比較・評価する。MMS 手法モデルと LP 手法モデルの再現精度は、河川横断面図を用いて次の手順により評価する。

- Step1. MMS 手法モデルと LP 手法モデルから、河川横断面図と同じ位置の断面形状を取得する。
- Step2. Step 1 で取得した断面形状と河川横断面図を重ね合わせる
- Step3. 図 25 に示すとおり、河川横断面図上に 10cm 間隔で評価点を設定した。そして、その評価点ごとに断面形状との標高差を算出する。
- Step4. Step3 で算出した標高差を天端面および小段ごとに集計する。なお、集計の評価方法は、文献 [23] の評価方式を参考に表 4 のとおり設定した。
- Step5. MMS 手法モデルと LP 手法モデルの生成に必要なとした時間を機能ごとに記録する。

本実験で、MMS 手法モデルと LP 手法モデルとを比較・評価することで、「ブレイクライン候補線を正しく生成できないという課題」が解決できているかを確認する。また、LP 手法モデルを可視化して評価することで、「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出されるという課

表 4 評価方法

Table 4 Evaluation method.

評価レベル	標高差の範囲
A 評価	0cm~15cm 未満
B 評価	15cm~30cm 未満
C 評価	30cm 以上

題」が解決できているかを確認する。

7.4 結果と考察

7.4.1 河川横断面図を用いた評価

MMS 手法モデルと LP 手法モデルの評価結果を表 5 および表 6 に示す。各表の A 評価の中で、最も高精度な値を強調している。表 5 と表 6 の小段の区間を確認すると、LP 手法モデルが、MMS 手法モデルと比較してより高精度に小段を再現できていることが分かった。具体的には、LP 手法モデルは、5つの地点で MMS 手法モデルの小段の再現精度を上回った。そのため、表 5 と表 6 が示す MMS 手法と LP 手法の再現精度の差が、統計的に有意差であるかを確認するため、天端面と小段の標高差を用いてそれぞれ t 検定を実施した。まず、MMS 手法と LP 手法の標高差の分布は天端面と小段のどちらも等分散であったため、スチューデントの方法による t 検定を実施した結果、天端面において  $t(9922) = 1.96, p > 0.05$ 、小段において  $t(10524) = 1.96, p < 0.05$  となった。このことから、小段における MMS 手法と LP 手法とは有意差があり、LP 手法の有効性が明らかとなった。

7.4.2 3次元モデルの可視化による評価

表 5 と表 6 で小段の A 評価が向上した中から、特徴的な 2 地点 (0.6 km 地点の左岸, 10.6 km 地点の右岸) の MMS モデルおよび LP モデルを AutoCAD Civil 3D を用いて可視化した。MMS 手法モデルを図 26, LP 手法モデルを図 27 に示す。なお、各図の中で、天端面および小段のブレイクライン抽出結果のみ強調して可視化している。0.6 km 地点の左岸は、3.2 節の実験で用いた淀川下流と同様、ブレイクライン抽出処理の際に天端面と小段が処理範囲に入る典型的な堤防形状の地点である。10.6 km 地点の左岸は、3.2 節の実験で用いた淀川上流と同様、天端面と小段の位置が離れた堤防形状である。

図 26 と図 27 を比較すると、MMS 手法では天端面のブレイクライン候補線のみを再現しているのに対して、LP 手法では、天端面や小段のブレイクライン候補線をそれぞれ再現していることが分かる。また、10.6 km 地点 (右岸) を比較することで、LP 手法では、緩やかな曲線を描く天端面が再現できていることが分かる。このことから、LP 手法のブレイクライン候補線生成機能によって、天端面や小段など複数の平坦部からブレイクラインがそれぞれ抽出できており、「ブレイクライン候補線を正しく生成できな



表 5 河川横断面図と MMS 手法の横断面図との標高差の結果

Table 5 Results of difference of elevation between cross-sectional survey data and MMS's method model.

	0.6km地点 (左岸)		2.4km地点 (左岸)		10.6km地点 (左岸)		10.6km地点 (右岸)		12.0km地点 (左岸)		12.0km地点 (右岸)		20.8km地点 (左岸)		20.8km地点 (右岸)		23.4km地点 (左岸)		30.0km左岸 (右岸)		
	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	
天端面	A評価	761	1.00	727	1.00	524	1.00	319	1.00	416	1.00	350	0.90	387	0.93	455	1.00	451	0.97	363	1.00
	B評価	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	38	0.10	28	0.07	0	0.00	15	0.03	0	0.00
	C評価	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
小段	A評価	384	0.97	310	0.76	346	1.00	1,422	0.96	367	1.00	354	1.00	158	0.31	449	0.90	271	0.49	328	0.99
	B評価	13	0.03	85	0.21	0	0.00	40	0.03	0	0.00	0	0.00	345	0.69	52	0.10	287	0.51	2	0.01
	C評価	0	0.00	13	0.03	0	0.00	20	0.01	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
全体	A評価	7,006	0.81	5,306	0.69	7,394	0.88	5,337	0.65	7,824	0.79	4,022	0.43	4,662	0.51	6,518	0.78	4,361	0.49	6,599	0.75
	B評価	732	0.09	727	0.10	939	0.11	1,513	0.19	1,891	0.19	1,660	0.18	1,213	0.13	1,458	0.17	1,399	0.16	1,450	0.17
	C評価	860	0.10	1,611	0.21	107	0.01	1,303	0.16	241	0.02	3,679	0.39	3,282	0.36	389	0.05	3,213	0.36	706	0.08

表 6 河川横断面図と LP 手法の横断面図との標高差の結果

Table 6 Results of difference of elevation between cross-sectional survey data and LP's method model.

	0.6km地点 (左岸)		2.4km地点 (左岸)		10.6km地点 (左岸)		10.6km地点 (右岸)		12.0km地点 (左岸)		12.0km地点 (右岸)		20.8km地点 (左岸)		20.8km地点 (右岸)		23.4km地点 (左岸)		30.0km左岸 (右岸)		
	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	
天端面	A評価	761	1.00	727	1.00	524	1.00	319	1.00	416	1.00	350	0.90	387	0.93	455	1.00	451	0.97	363	1.00
	B評価	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	38	0.10	28	0.07	0	0.00	15	0.03	0	0.00
	C評価	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
小段	A評価	397	1.00	310	0.76	346	1.00	1,465	0.99	367	1.00	354	1.00	182	0.36	501	1.00	280	0.50	328	0.99
	B評価	0	0.00	85	0.21	0	0.00	17	0.01	0	0.00	0	0.00	321	0.64	0	0.00	278	0.50	2	0.01
	C評価	0	0.00	13	0.03	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
全体	A評価	7,023	0.82	5,225	0.69	7,394	0.88	5,489	0.67	7,824	0.79	4,056	0.43	4,676	0.51	6,518	0.78	4,372	0.49	6,663	0.76
	B評価	727	0.08	808	0.10	939	0.11	1,494	0.18	1,891	0.19	1,621	0.17	1,199	0.13	1,458	0.17	1,390	0.15	1,386	0.16
	C評価	848	0.10	1,611	0.21	107	0.01	1,170	0.14	241	0.02	3,675	0.39	3,282	0.36	389	0.05	3,213	0.36	706	0.08

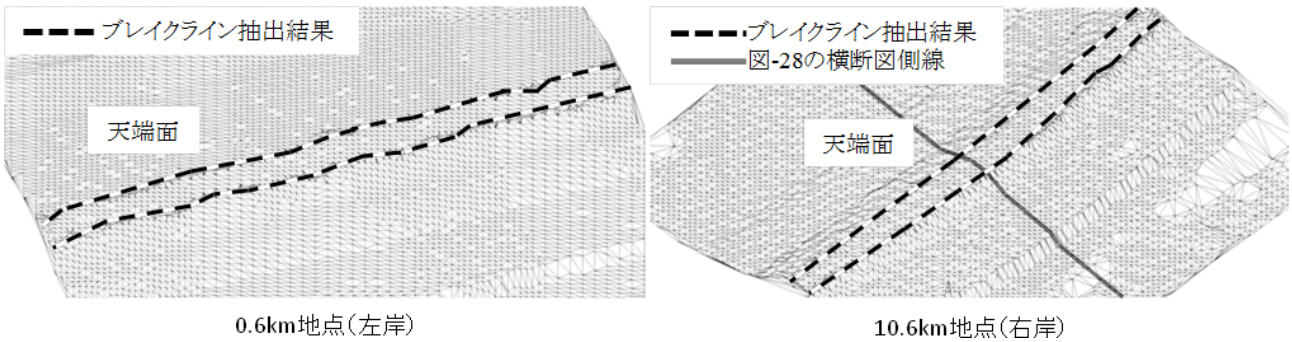


図 26 MMS 手法モデルの可視化結果  
Fig. 26 Visualization results of MMS's method model.

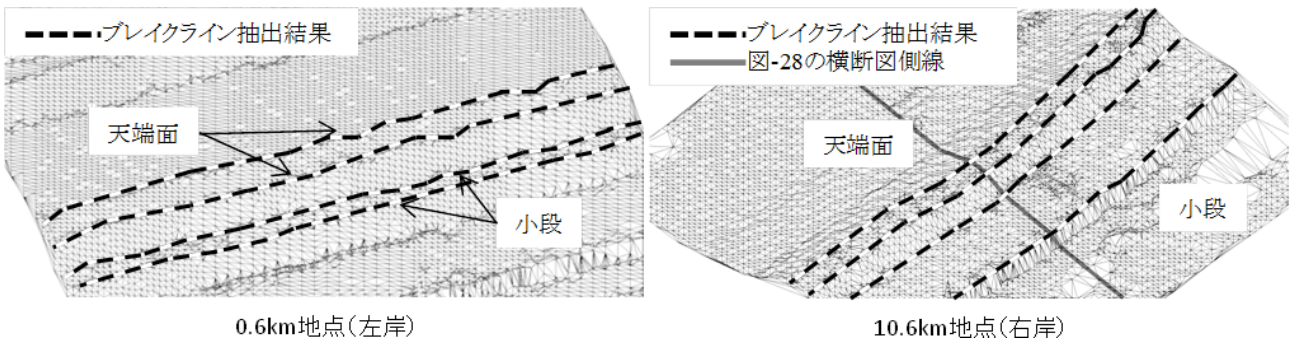


図 27 LP 手法モデルの可視化結果  
Fig. 27 Visualization results of LP's method model.

という課題」を解決できていることが明らかとなった。  
図 27 を確認すると、小段のブレイクラインが天端面のブレイクラインとして誤抽出されることなく、河川堤防の

ブレイクラインがそれぞれ正しく抽出できていることが分かる。また、天端面の法肩・法尻および小段の法肩・法尻のブレイクラインがそれぞれ再現されており、典型的な凸



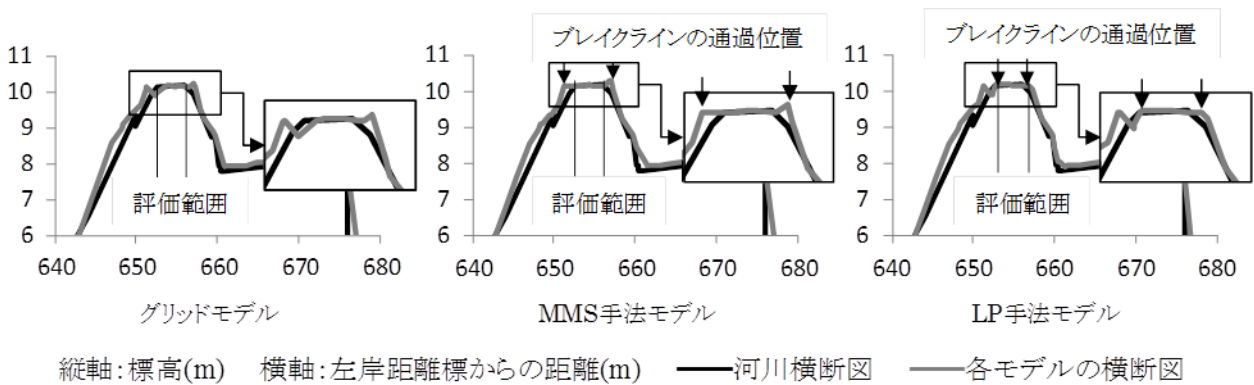


図 28 10.6km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果  
 Fig. 28 Visualization results of cross-sectional model at 10.6 km point of Yodo's river (Right side bank).

型形状の河川堤防を正しく再現できていることが分かる。しかし、10.6 km 地点 (右岸) において図 26 と図 27 では天端面の幅が異なるが、表 5 と表 6 の集計結果では、同様の有意な差が見られない結果となった。そこで、図 27 の 10.6 km 地点 (右岸) に示す側線から、MMS 手法モデル、LP 手法モデルおよびブレイクラインを用いない 3 次元モデル (以下、グリッドモデル) の横断面図を生成し、河川横断面図と重ね合わせて可視化した。可視化結果を図 28 に示す。グリッドモデルの横断面図を確認すると、天端面の評価範囲内で断面形状が変化していることが分かる。これに対して、MMS 手法モデルと LP 手法モデルの横断面図を確認すると、MS 手法モデルでは、河川横断面図の断面変化点と異なる位置のブレイクラインを抽出している。LP 手法モデルの横断面図は、河川横断面図と同様の断面変化点を通るブレイクラインを抽出している。しかし、天端面の評価範囲では河川横断面図と断面形状が一致していることが分かった。また、グリッドモデルと河川横断面図を比較すると、グリッドモデルでは、天端面左の法面上に植生などの点が存在することが分かる。これらのことから、LP 手法のブレイクライン抽出機能によって、天端面と小段面のブレイクラインがそれぞれ抽出できており、「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出されるという課題」を解決できていることが明らかとなった。

### 7.4.3 3次元モデル生成時間の評価

MMS 手法や LP 手法を用いた 3 次元モデルの生成では、点群データの読み込み、ブレイクライン候補線の生成、ブレイクラインの抽出、点群データの整理の 4 つのステップでかかるトータルの処理時間を計測した。MMS 手法モデルと LP 手法モデル生成の処理時間を表 7 に示す。MMS 手法モデルと LP 手法モデル生成の処理時間は、図 23 に示す河川横断面図の計測位置 10 カ所の 3 次元モデル生成の処理時間の平均を計測した。表 7 を確認すると、約 8 千点の LP データから、MMS 手法モデルは平均 3.69 秒、LP 手法モデルは平均 7.61 秒で生成できることが分かる。

計測範囲を 100 m<sup>2</sup> から 1000 m<sup>2</sup> まで河川の長手方向に

表 7 処理時間

Table 7 Processing time.

	MMS 手法(秒)	LP 手法(秒)
点群データの読み込み	0.22	
ブレイクライン候補線の生成	1.41	4.58
ブレイクラインの抽出	0.11	0.11
点群データの整理	1.95	2.71
合計	3.69	7.61

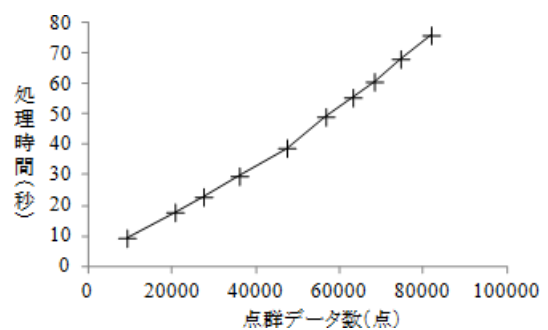


図 29 点群データ数と処理時間の関係

Fig. 29 Relationship between numbers of data and processing time.

100 m<sup>2</sup> ずつ延長した場合の点群データ数と処理時間の関係を図 29 に示す。図 29 を確認すると、点群データ数と 3 次元モデル生成の処理時間は、線形的に増加する傾向であることが分かる。また、1 分以内に処理可能な点群データの最大数は、河川の長手方向 800 m<sup>2</sup> に延伸した約 7 万点であることが分かる。これらの結果から、淀川水系本川の距離標区間 37.2 km を対象とした場合は、約 47 分で淀川水系本川を 3 次元モデル化できると考えられる。

## 8. 異なる特性の点群データの特長を活かした河川空間モデル構築の可能性の評価

MMS データと LP データには、2 章で整理したとおり、それぞれ異なる特性がある。MMS データは点群密度が高

く計測誤差が少ないが、計測可能な範囲が限定的である。一方、LP データは、点群密度が低く、計測誤差は大きい。計測可能な範囲が広範囲である。

本章では、これらの特性の異なる点群データをどのように活用すれば高精度な河川空間モデルを構築できるかを明らかにする。そのため、「MMS 手法を用いて MMS データから生成した 3 次元モデル (以下、「MMS 手法モデル」という)」と「LP 手法を用いた LP データから生成した 3 次元モデル (以下、「LP 手法モデル」という)」とを比較し、河川空間モデルの構築における各手法の強みを明らかにする。

### 8.1 比較方法

本比較では、6 章と同様の手順で、MMS 手法モデルと LP 手法モデルを生成し、その再現精度を比較・評価する。なお、実験データは、MMS 手法のブレイクライン候補線生成機能と比較するため、7.4 km 地点および 48.4 km 地点を用いた。実験データで用いた LP データと MMS データの計測時期および計測誤差の詳細は、表 3 を参照されたい。また、MMS データの計測範囲は天端面の周辺に限定されるため、評価対象を天端面のみを対象とした。

### 8.2 結果と考察

MMS 手法モデルと LP 手法モデルの評価結果を表 8 に示す。評価結果を確認すると、7.4 km 地点では、MMS 手法モデルの再現精度は、LP 手法モデルとほぼ同程度であった。この原因を究明するため、7.4 km 地点の MMS データを詳細に確認すると、天端面は植生に覆われており、点群データに強いノイズが含まれていることが分かった。一方、48.4 km 地点では、MMS 手法モデルでは A 評価の割合が 1.00 であるのに対して、LP 手法モデルでは 0.79 であり、天端面では、MMS 手法モデルの再現精度が高いことが分かった。詳細に分析するため、A 評価の内訳を 5 cm 間隔で再集計した結果を表 9 に示す。再集計の結果を見ると、MMS 手法モデルと河川横断図の標高差が 10 cm 以内の割合が 0.85 であった。本実験で用いた MMS データの計測誤差が ±10 cm であることを考慮すると、MMS 手法モデルの天端面は、MMS の性能限界に近い精度で再現できていると考えられる。

河川空間モデルの構築において、MMS 手法と LP 手法および MMS データと LP データのそれぞれの点群データを用いた場合、次の 2 つの知見が明らかになった (表 10)。

- LP 手法は、LP データを用いて、河川空間全体を高精度に再現した 3 次元モデルを生成できる。
- MMS 手法は、MMS データを用いて、河川堤防の周辺を LP 手法よりも高精度に再現した 3 次元モデルを生成できる。

これらのことから、天端面では MMS データを用いた MMS 手法、天端面以外の平坦部では LP データを用いた LP 手

表 8 MMS 手法と LP 手法の比較結果

Table 8 Comparison result of methods between MMS and LP.

	7.4km地点(右岸)				48.4km地点(左岸)				
	MMS手法		LP手法		MMS手法		LP手法		
	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	
天端面	A評価	422	0.95	438	0.99	704	1.00	559	0.79
	B評価	20	0.05	4	0.01	0	0.00	146	0.21
	C評価	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00

表 9 MMS 手法と LP 手法の詳細な比較結果

Table 9 Detailed comparison result of methods between MMS and LP.

	7.4km地点(右岸)				48.4km地点(左岸)				
	MMS手法		LP手法		MMS手法		LP手法		
	点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合	
天端面	~ 5cm	352	0.80	357	0.81	60	0.09	71	0.10
	5cm~10cm	48	0.11	45	0.10	538	0.76	147	0.21
	10cm~15cm	22	0.05	36	0.08	106	0.15	341	0.48
	15cm~	20	0.05	4	0.01	0	0.00	146	0.21

表 10 3次元モデル生成における各手法の評価

Table 10 Evaluation of each method for generating 3D model.

手法	点群データ	部位	評価
MMS 手法	MMS データ	天端面	○
		小段	×
MMS 手法	LP データ	天端面	×
		小段	×
LP 手法	LP データ	天端面	△
		小段	○

- ：高精度に再現できる
- △：再現できる
- ×：再現できない

法をそれぞれ使い、異なる特性の点群データの特長を活かした河川空間モデルを構築することで、測量機器の性能限界に近い精度で河川空間の 3 次元モデルを生成できると考えられる。

## 9. おわりに

本研究では、LP データから河川空間の 3 次元モデルを生成する LP 手法を提案した。LP 手法では、LP データから天端面や小段、高水敷など河川空間の平坦部をそれぞれ特定して複数のブレイクライン候補線を取得した。さらに、取得したブレイクライン候補線の標高を考慮して、河川空間から高精度にブレイクラインを抽出した。実験結果から、LP データから 3 次元モデルを生成する際に考慮すべき「ブレイクライン候補線を正しく生成できないという課題」と「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出されるという課題」の 2 つの課題を解消した。すなわち、LP データに適した河川空間の 3 次元モデルを生成する技術の開発に成功した。具体的には、点群データを取り

扱う次の技術を開発した。

- 河川堤防の典型的な形状に着目し、LP データから河川空間の平坦部をそれぞれ特定する手法
- 平坦部の高さに着目し、ブレイクラインの誤抽出を抑える手法

これにより、河川空間を面的・立体的に形状を把握できる精緻な河川空間モデル生成の実現に寄与したといえる。

本研究では、河川堤防の一般的な形状を対象として、典型的な凸型形状に適用する手法を提案し、実証実験によって有用性を明らかにした。また、MMS データと LP データから生成した 3 次元モデルを比較し、それぞれ河川空間の 3 次元モデルの生成に有用な点群データであり、異なる特性の点群データを用いることの可能性を明らかにした。そのため、今後は、河川空間モデルを構築する技術の精度向上と、実際の維持管理への河川空間モデルの適用との 2 つに取り組んでいく予定である。また、本研究で用いた河川横断面を用いた評価手法では、河川横断面が用意された箇所のみしか定量的な評価が行えず、有意な変化が見られなかった地点が見られた。そのため、今後は河川横断面に依存しない、全数的な評価方法についても取り組んでいく。河川空間モデルを構築する技術の精度向上では、スロープや河川構造物を含む一般的でない河川堤防へと LP 手法を適用した場合に生成される 3 次元モデルの評価と生成技術の提案と、異なる特性の点群データから 1 つの 3 次元モデルを生成する技術の実現に向けて取り組んでいく。河川事業で推進されている ICT を用いた高度な施工管理の 1 つとして、Total Station を用いた出来形管理（以下、「TS 出来形管理」という）がある。また、この TS 出来形管理に関する支援策として、3 次元 CAD データを用いた省力化の取り組み [31] がある。そこで、実際の維持管理への河川空間モデルの適用では、特長を活かした河川空間モデルを用いた TS 出来形管理の支援策の実現に向けて取り組んでいく。

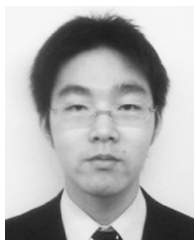
## 参考文献

- [1] 田中成典, 秋山孝正, 伊藤俊秀, 辻 光宏, 小林孝史, 今井龍一, 楠見晴重, 平田 岳: バーチャルリアリティを用いた観光都市・大阪の新たな空間創出と魅力向上に関する研究, 土木情報利用技術講演集, Vol.36, pp.21-24, 土木学会 (2011).
- [2] 矢吹信喜, 川口貴之, 福田知弘: 積集合演算による BIM データからの景観検討用 3D モデル作成手法, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol.37, pp.129-130, 土木学会 (2012).
- [3] グーグル: Google Earth, 入手先 (<http://www.google.co.jp/intl/ja/earth/>) (参照 2015).
- [4] 国土交通省: 河川定期縦横断面測量業務実施要領・同解説 (1997).
- [5] 小林一郎, 宮下征士, 坂口将人, 上田 誠: MMS データを用いた視距改良設計, 土木情報利用技術論文集, Vol.18, pp.1-8, 土木学会 (2009).
- [6] 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 (<http://www.mitsubishielectric.co.jp/mms/>) (参照 2014).
- [7] 国土技術政策総合研究所: 航空レーザ測量を活用した治水安全度評価, 入手先 (<http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/seika.files/lp/>) (参照 2015).
- [8] 国土地理院: 航空レーザ測量, 入手先 (<http://www1.gsi.go.jp/geowww/LaserHP/>) (参照 2015).
- [9] 国土地理院: 航空レーザ測量による数値標高モデル (DEM) 作成マニュアル (案) (2006).
- [10] 増田 宏: 3 次元計測に基づく大規模点群処理の課題と技術動向, 精密工学会誌, Vol.79, No.5, pp.384-387, 精密工学会 (2013).
- [11] Sampath, A. and Shan, J.: Segmentation and Reconstruction of Polyhedral Building Roofs from Aerial Lidar Point Clouds, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Vol.48, No.3, pp.1554-1567, IEEE (2010).
- [12] Shaohui, S. and Salvaggio, C.: Aerial 3D Building Detection and Modeling From Airborne LiDAR Point Clouds, *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol.6, pp.1440-1449, IEEE (2013).
- [13] Khattak, S.R., Buckstein, D.S. and Hogue, A.: Reconstructing 3D Buildings from LIDAR Using Level Set Methods, *Computer and Robot Vision*, pp.151-158, IEEE (2013).
- [14] Susaki, J.: Modeling of Buildings in Dense Urban Areas from Airborne LiDAR and Aerial Photograph, *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp.6701-6704, IEEE (2012).
- [15] Zheng, Y. and Cao, Z.: Classification Method for Aerial LiDAR Data Based on Markov Random Field, *Electronics Letters 4th*, Vol.47, No.16, Institute of Electrical Engineers (2011).
- [16] Bretar, F. and Chehata, N.: Terrain Modeling from Lidar Range Data in Natural Landscapes; A Predictive and Bayesian Framework, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Vol.48, No.3, pp.1568-1578, IEEE (2010).
- [17] Martin, T., Bernhard, H. and Korbinian, K.: Accuracy of Automatically Extracted Geomorphological Breaklines from Airborne Lidar Curvature images, *Geografiska Annaler: Series A*, Vol.94, No.1, pp.33-42, Physical Geography (2012).
- [18] Baruch, A. and Filin, S.: Detection of Subtle Ridge Lines from Laser Scanning Data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.37, No.B3/A, pp.111-118, ISPRS (2008).
- [19] Brugelmann, R.: Automatic Breakline Detection from Airborne Laser Range Data, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.33, No.B3, pp.109-116, ISPRS (2000).
- [20] Rutzinger, M, Hofle, B., Vetter, M. and Pfeifer, N.: Digital Terrain Models from Airborne Laser Scanning for the Automatic Extraction of Natural and Anthropogenic Linear Structures, *Geomorphological Mapping: Methods and Applications*, pp.473-486, Elsevier Amsterdam (2011).
- [21] Briese, C.: Three-Dimensional Modelling of Break Lines from Airborne Laser Scanner Data, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.35, No.B3, pp.1097-1102, ISPRS (2004).
- [22] 田中成典, 今井龍一, 中村健二, 川野浩平: 点群座標データを用いた 3 次元モデルの生成に関する研究, 土木情報利用技術論文集, Vol.19, pp.165-174, 土木学会 (2010).
- [23] 田中成典, 今井龍一, 中村健二, 川野浩平: 点群座標データを用いた 3 次元モデルの自動生成に関する研究, 知能



と情報, Vol.23, No.4, pp.572-590, 日本知能情報ファジィ学会 (2011).

- [24] 田中成典, 今井龍一, 中村健二, 川野浩平: LP データを用いた震災前後の被害箇所の自動検出結果の可視化に関する研究, 土木学会論文誌 F3 分冊, Vol.68, No.2, pp.197-205, 土木学会 (2013).
- [25] 国土地理院国土地理院: 航空レーザ測量による数値標高モデル (DEM) 作成マニュアル (案) (2006).
- [26] 国土交通省: 作業規程の準則 (2010).
- [27] 増田 宏: レーザ計測データに基づく形状再構成技術, 日本船舶海洋工学学会誌, Vol.40, pp.29-34 (2012).
- [28] Kass, M., Witkin, A. and Terzopoulos, D.: Snakes: Active Contour Models, *Proc. 1st International Conference on Computer Vision*, pp.259-268, IEEE (1987).
- [29] Ester, M., Kriegel, H.P., Kriegel, S., Sander, J. and Xu, X.: A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, *Proc. 2nd Int'l Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp.226-231, AAAI (1996).
- [30] 国土交通省: 河川管理施設等構造令 (2013).
- [31] 田中成典, 今井龍一, 中村健二, 川野浩平: 3次元 CAD データを用いた出来形管理支援システムの開発, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J96D, No.10, pp.2426-2439, 電子情報通信学会 (2013).



川野 浩平

2009年関西大学総合情報学部卒業。2011年関西大学大学院総合情報学研究科知識情報学専攻博士課程前期課程修了。現在、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在学中。修士(情報)。2013年

(一財)日本地図センターに入社, 現在に至る。2007~2013年(株)関西総合情報研究所にて活動。画像処理, 3次元モデルの生成, VR空間の生成, 3次元CADデータの利用等の研究開発に従事。土木学会会員。



田中 成典 (正会員)

1986年関西大学工学部土木工学科卒業, 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。同年(株)東洋情報システム(現在, TIS)に入社。人工知能に関する研究受託開発業務に従事。1994年関

西大学総合情報学部専任講師として着任, 1997年助教授, 2004年教授, 2006年から学生センター副所長, 現在に至る。2002年8月から1年間, カナダのUBCにて客員助教授。博士(工学)。専門は知識工学と社会基盤情報学。CAD/CG, GIS/GPS, 画像処理およびWebソリューションビジネスに関する研究に従事。2000年(株)関西総合情報研究所を起業, 設立当初から現在まで取締役会長。2006~2012年(株)フォーラムエイトの顧問。主に, ISOに準拠したCAD製図基準とCADデータ交換基盤の開発に従事。



今井 龍一 (正会員)

1998年関西大学工学部土木工学科卒業。2000年関西大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年日本工営(株)入社。公共事業へのICT導入のコンサルティングや研究開発に従事。2004~2010年9月東京大学空間

情報科学研究センター協力研究員。2009年博士(工学)東京大学。2010年10月~現在, 東京大学空間情報科学研究センター客員研究員。2012年7月~2013年3月, 関西大学先端科学技術推進機構客員研究員。2010年8月~現在, 国土交通省国土技術政策総合研究所防災・メンテナンス基盤研究センターメンテナンス情報基盤研究室研究官, 2013年4月~現在, 関西大学大学院総合情報学研究科連携大学院客員教授, 現在に至る。道路基盤地図情報(GIS), 地理空間情報, 交通工学, 動線解析, 位置参照方式, CAD, 業務分析等に関する研究に従事。土木学会情報利用技術委員会常任委員。土木学会, 地理情報システム学会, 経営情報学会各会員。



中村 健二 (正会員)

2004年関西大学総合情報学部卒業。2006年関西大学大学院総合情報学研究科知識情報学専攻博士前期課程修了。2009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後期課程修了。2009年関西大学ポスト・ドク

トラル・フェロー。2010年立命館大学情報理工学部情報システム学科助手。2012年大阪経済大学情報社会学部准教授, 現在に至る。博士(情報学)。知識情報処理, テキストマイニング, Webマイニング, CAD/CG等の研究に従事。2002年(株)関西総合情報研究所にて活動, 現在に至る。システム設計, データモデル設計等の研究開発に従事。電子情報通信学会, 土木学会, 日本データベース学会各会員。

(担当編集委員 比戸 将平)