

I-19 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

Research on Generation of a 3D Model Using Point Cloud Data

田中成典¹・今井龍一²・中村健二³・川野浩平⁴

Shigenori TANAKA, Ryuichi IMAI, Kenji NAKAMURA and Kouhei KAWANO

抄録: 公共事業の効率化や品質の確保などを目的として、CALS/EC や情報化施工などの ICT を利用した環境整備が推進されている。こうした背景の中、著者らは、河川事業を対象にした3次元モデルの利用による情報化施工の実現を目指して近畿地方整備局内にデータ流通環境の構築に関する研究会を設置し共同研究に取り組んでいる。情報化施工では、現況地形を克明に再現した高精度な3次元モデルが必要である。しかし、3次元モデルの生成には、大量の点群座標データの読み込みの課題や、自然形状を対象とした場合にブレイクラインの誤抽出が発生する課題がある。本論文では、この問題の解決策として、点群座標データを用いて、断面変化点を考慮した3次元モデルを生成する手法を考案し、実証実験により有効性を検証した。

Abstract: For the purpose of promoting efficiency and assuring quality of public work projects, it is encouraged to arrange environment using ICT (Information and Communication Technology) such as CALS/EC and intelligent construction. In this context, the authors established a workshop about the establishment of data distribution environment in a collaborative way in Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport to perform joint research aiming to realize intelligent construction in river projects using 3D data. Intelligent construction requires 3D models with high precision that represent actual conditions of terrains faithfully. However, there are problems; a problem that arises in reading a large amount of point cloud data and a problem of causing fault extraction to break line in treating natural land forms. This paper solves these problems by proposing a method for generating a 3D model in consideration of cross-sectional change point using point cloud data. Then experiments are performed to compare with existing methods to prove validity of the proposed method.

キーワード: 点群座標データ, 3次元モデル, CAD, 情報化施工

Keywords: Point cloud data, 3D model, CAD, Intelligent construction

1. はじめに

国土交通省をはじめとした公共機関では、公共事業の透明性の確保、業務の効率化や品質の確保などを目的に CALS/EC や情報化施工など、ICT (Information and Communication Technology) を利用したデータ流通環境の構築に向けた施策に取り組んでいる¹⁾⁴⁾。これらの施策の推進により、道路中心線形データ交換標準⁵⁾の策定などプロダクトモデルへの利用を念頭にした取り組みや、情報化施工に対する先進的な取り組み⁶⁾¹¹⁾が公共機関の主導によって進められている。情報化施工に対する先進的な取り組みの事例として、TS (Total Station)・GNSS (Global Navigation Satellite System) を用いた出来形管理技術⁶⁾⁹⁾や、盛土工の締固め記録を用いた施工管理の事例¹⁰⁾がある。前者の事例では、TS を用いて道路面の幅や法面の長さ、基準高を計測して出来形を管理する手法⁶⁾⁸⁾や、盛土や切土によって

得られた土量を自動的に管理する手法⁹⁾を用いて施工管理を行っている。後者の事例では、大規模土工で現場設備の稼働状況や、掘削機械の位置を監視し、最適な機械配置を支援する手法¹⁰⁾を用いて施工管理を行っている。これらの事例に対して、現況地形に対して高い再現精度の3次元モデルが提供できると、施工管理のさらなる高度化に寄与すると考えられる。

こうした背景の中、著者らは、官学を基軸とした新技術開発の促進を目的として、国土交通省近畿地方整備局内に河川事業のデータ流通環境の構築に関する研究会を設置して共同で研究してきた¹¹⁾。具体的には、河川の現況地形に対して高い再現精度の3次元モデルを容易に生成し情報化施工に適用して作業の効率化や施工品質の向上を図ることを目指して研究を遂行している。

一方、現況地形を再現した3次元モデルを生成する手法は既往研究でも考案されている。その中でも有益

1: 正会員 工博 関西大学 教授 総合情報学部

(〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町二丁目一番一号, Tel: 072-690-2154, E-mail: tanaka@res.kutc.kansai-u.ac.jp)

2: 正会員 工博 日本工営株式会社 統合情報技術部 (〒102-0083 東京都千代田区麹町四丁目二番)

(現, 国土交通省国土技術政策総合研究所高度情報化研究センター情報基盤研究室)

3: 正会員 博士(情報学) 関西大学 ポスト・ドクトラル・フェロー 総合情報学部

(現, 立命館大学 助手 情報理工学部)

4: 学生会員 関西大学大学院 総合情報学研究科

な既往研究として、高い計測精度のレーザスキャナにより計測された点群座標データ¹²⁾から自動的に3次元モデルを生成する手法¹³⁾⁻¹⁷⁾がある。近年、レーザスキャナ等の点群座標データの計測に関する技術開発の動向は目覚ましく、情報化施工に導入することで様々な場面で効果が享受できる。しかし、レーザスキャナで取得した素の点群座標データを用いて、3次元モデルを生成し、施工管理に利用するには次に示す2つの課題が潜在している。

ひとつ目は、レーザスキャナで計測した点群座標データの数が膨大すぎて一般のCADソフトやCGソフトでは読み込むことができない課題である。点群座標データを読み込めるソフトウェアも市販されているが、広域を計測した膨大な量の点群座標データをそのまま読み込んで自動的に3次元モデルを生成することができない。そのため、既往研究では、レーザスキャナによって取得した点群座標データを自動的に間引いてメッシュデータを生成する手法¹³⁾、計測した点群座標データからブレイクラインなどの特徴的な情報のみを残し冗長的な点群座標データを間引いて3次元モデルを生成する手法¹⁴⁾⁻¹⁷⁾が考案されている。点群座標データを自動的に間引いてメッシュデータを生成する手法¹³⁾では、一定間隔の格子状のフィルタを用意し、格子の交点ごとにウインド法を用いて処理対象を絞込み、内挿処理して詳細な3次元モデルを生成する。その結果、不規則な間隔で計測された点群座標データが格子状に整理されるため、格子間隔を調整して対象物の特徴を正確に再現した直感的に理解しやすい3次元モデルが生成できる。この手法で生成する3次元モデルの再現度は格子の間隔に依存する。大規模工事のような計測範囲が広大になると、データ量を間引くために格子間隔を広げてCADソフトに読み込まなければならない。この条件の場合、3次元モデル上で面の境界の再現ができない懸念があり、情報化施工で重要な道路面や法面を認識できないことが想定される。

ふたつ目は、面の境界となるブレイクラインの誤抽出が発生する課題である。既往研究では、点群座標データの相対的な位置関係を用いる手法¹⁴⁾⁻¹⁶⁾や点群座標データに付与された色情報を用いる手法¹⁷⁾を考案し、ブレイクラインを抽出している。点群座標データの相対的な位置関係を用いる手法¹⁴⁾⁻¹⁶⁾では、メッシュの法線ベクトルを用いた手法¹⁴⁾、曲率を用いた手法¹⁵⁾、そして角度を用いた手法¹⁶⁾が研究されている。これらの手法は、境界面が明確な幾何形状の3次元モデルを生成する際に有効である。しかし、河川堤防では、道路面と法面の間に明確な境界線が存在しない場合があり、さらに砂利や植生などのノイズの影響からブレイクラインの誤抽出が発生する可能性がある。また、点群座標データに付与された色情報を用いる手法¹⁷⁾は、セン

サーラインや路側帯などの標識が存在する条件を対象にした3次元モデルの生成に有効である。しかし、路側帯などの面の境界を示す明確な識別子が無い条件では、色情報からの判別が困難になることが懸念される。

以上の課題を踏まえ、本研究では、レーザスキャナによって取得した点群座標データの相対的な位置関係から、河川堤防の各面の境界を正しく認識した3次元モデルを自動生成する手法を提案することを目的とする。

2. 研究の概要

(1) 研究の目標

本論文では、前章で論じた2つの課題を解決した点群座標データを用いた3次元モデルの自動生成手法を提案する。まず、入力された点群座標データからブレイクラインを抽出する。次に、ブレイクラインと格子状のフィルタとを重ねたブレイクラインフィルタを作成し、そのフィルタを用いて点群座標データの内挿処理を行う。そして、残された点群座標データを用いて3次元モデルを生成する。この時、本研究で提案する手法では、ブレイクラインを抽出する領域を指定することでブレイクラインの誤抽出を抑制する。本研究の成果により、市販の3次元CADソフトでも点群座標データを読み込めるようになり、そして面の境界を認識できる精緻な3次元モデルが生成できる。

(2) 処理の流れ

本研究の3次元モデルの生成処理は、**図-1**に示すとおり、ブレイクライン抽出機能と点群座標データ間

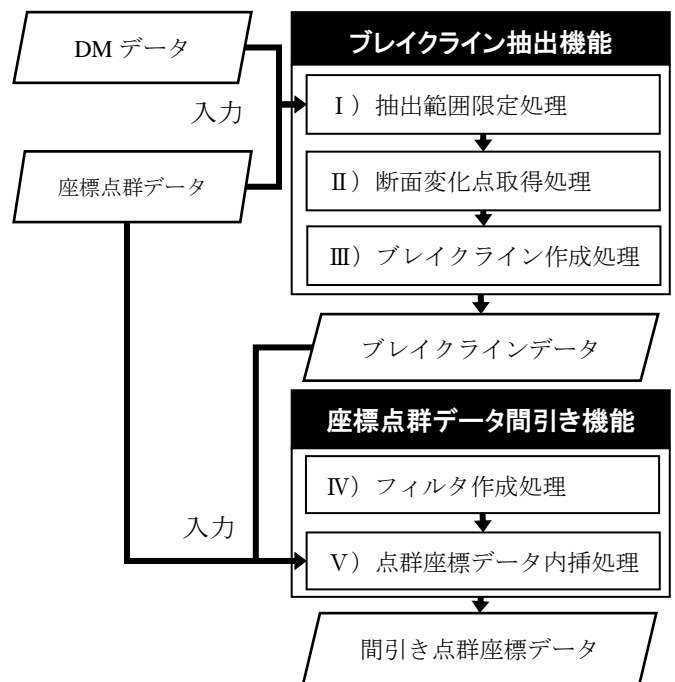
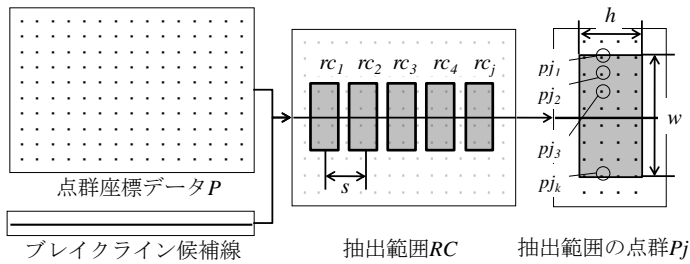
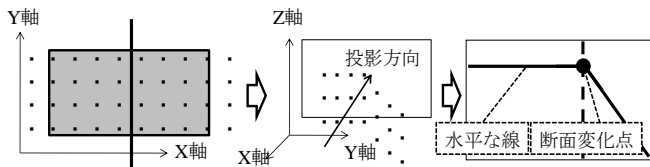


図-1 処理の流れ

I) 抽出範囲限定処理



II) 断面変化点取得処理



III) ブレイクライン作成処理

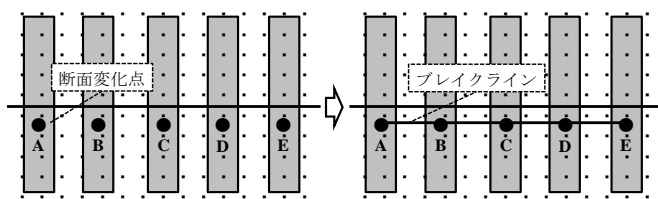
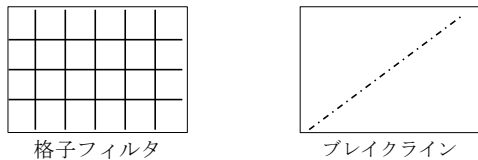


図-2 ブレイクライン抽出機能の概念

IV) フィルタ作成処理



V) 点群データ内挿処理

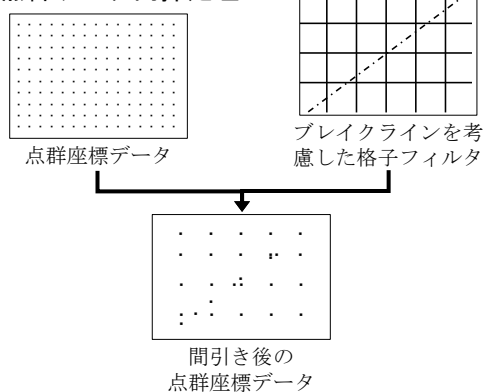


図-3 点群座標データ間引き機能の概念

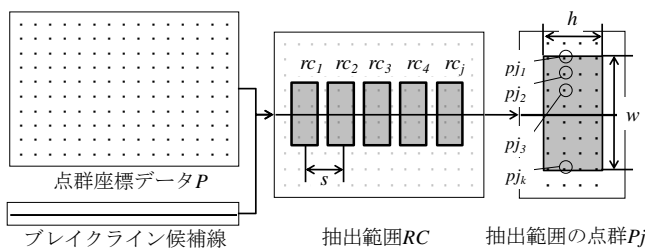


図-4 抽出範囲限定処理の概念

引き機能とで構成する。このふたつの機能を用いて出力した点群座標データは、レーザスキャナにより計測された高い計測精度の点群座標データの特徴を活かして3次元モデルを生成する手法を実現する。本研究で提案する各機能の処理手順を次に示す。

ブレイクライン抽出機能は図-2に示すとおり、抽出範囲限定処理、断面変化点取得処理とブレイクライン作成処理で構成される。「I) 抽出範囲限定処理」では、レーザスキャナによって取得した点群座標データとDM(Digital Mapping)データ¹⁸⁾⁻¹⁹⁾とを入力する。入力したDMデータから抽出したブレイクライン候補線を参考にしてブレイクラインの誤抽出を抑制する。

「II) 断面変化点取得処理」では、各領域の点群座標データを2次元空間に圧縮し、断面線の折れ線近似を行う。そして、断面線の水平な線と斜線との交点を断面変化点として領域ごとに取得する。「III) ブレイクライン作成処理」では、断面変化点取得処理で取得した断面変化点をつないでブレイクラインを作成する。

点群座標データ間引き機能は、図-3に示すとおり、フィルタ作成処理と点群座標データ内挿処理とで構成する。「IV) フィルタ作成処理」では、ブレイクラインと格子状のフィルタを合わせたブレイクラインフィルタを用意する。次に、「V) 点群座標データ内挿処理」では、ブレイクラインフィルタを用いて点群座標データの内挿処理を行う。この処理により、不規則な間隔で計測された点群座標データからブレイクラインを考慮した格子状の間引き点群座標データへ変換する。

3. ブレイクライン抽出機能

ブレイクライン抽出機能は、レーザスキャナによって取得した点群座標データとDMデータとを入力してブレイクラインを抽出する。ここで、レーザスキャナによって取得した点群座標データを $P=\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_i\}$ とする。本機能により、前述したブレイクラインの誤抽出の課題を解消する。

(1) 抽出範囲限定処理

抽出範囲限定処理の概念を図-4に示す。本処理では、まず、DMデータから道路線を取得し、ブレイクライン候補線として取得する。道路線には、実装規約や各種基準類¹⁹⁾⁻²⁰⁾に基づき、道路線を示す折れ線要素(実装規約¹⁹⁾で規定の要素番号2101および2106)を採用する。次に、ブレイクライン候補線の始点から距離 s ごとに幅 w 、高さ h の矩形領域を作成する。そして、作成した領域の範囲内から点群を抽出する。この処理から得た領域を $RC=\{rc_1, rc_2, rc_3, \dots, rc_j\}$ とし、 rc_j に含まれる点群座標データを $P_j=\{pj_1, pj_2, pj_3, \dots, pj_k\}$ とする。

(2) 断面変化点取得処理

断面変化点取得処理では、抽出範囲限定処理によって取得した領域 RC の各領域 rc_j から断面線を作成するため、点群座標データ P_j を各点 p_{jk} とブレイクライン候補線からの距離を利用して、2次元空間に圧縮する。具体的には、**図-5**に示すとおり、縦軸を標高、横軸をブレイクライン候補線と各点との垂直距離として3次元点群を投影変換する。次に、投影変換された P_j の中から横軸最小となる点を最初の候補点 p'_{j1} とし、 t 間隔ごとに候補点を取得する。この処理から得た候補点の集合を2次元点群座標データ $P'_{j1} = \{p'_{j1}, p'_{j2}, p'_{j3}, \dots, p'_{jn}\}$ とする。そして、2次元点群 p'_{ji} から断面線の近似化を行う。断面線の近似化では、**図-6**に示すとおり、2次元点群 p'_{ji} と $p'_{j,i+1}$ を結んで断面線を表す折れ線を作成する。この時、 p'_{ji} から等距離に複数存在する場合は、標高が高い点を $p_{j,i+1}$ として採用する。次に、折れ線の縦軸の値をメディアンフィルタ²²⁾によって平滑化する。メディアンフィルタとは、注目する値 p'_{ji} および前後の値 $p'_{j,i-1}, p'_{j,i+1}$ における値の中央値を有効な値として利用するノイズ除去手法である。そのため、メディアンフィルタによる平滑化は、相加平均による平滑化と異なり集合から突出した値をノイズとして除去した結果を取得できる。ここで、折れ線の頂点 p'_{ji} の角度 θ_i が閾値 α 以上ならば、頂点 p'_{ji} を含む2線を直線近似する。最後に、近似された各線分の中から、断面変化点を取得する。断面変化点の取得では、**図-7**に示すとおり、まず、近似された各断面線分の中から、水平からの角度が閾値 β 以内の断面線分を水平線として抽出する。次に、抽出された水平線の端点の中から、最もブレイクライン候補線と距離が近い点を断面変化点として取得する。そして、断面変化点取得処理を領域 rc_j ごとに適用する。この処理から得た断面変化点の集合を $P_x = \{px_1, px_2, px_3, \dots, px_j\}$ とする。

(3) ブレイクライン作成処理

本処理では、取得した断面変化点 P_x からブレイクラインを作成する。具体的に**図-8**に示すとおり、断面変化点 P_x の各点 px_j を結んで折れ線を作成する。次に、各点 px_j を取得した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。この処理により、砂利や植生などのノイズによって誤抽出された断面変化点を除去できる。そして、平滑化された断面変化点の点列 P_x を各頂点とするブレイクライン L を作成する。

4. 点群座標データ間引き機能

点群座標データ間引き機能では、レーザスキャナによって取得した点群座標データ P を間引く処理を行う。

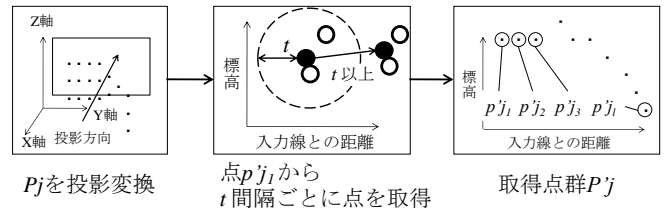


図-5 2次元空間への投影変換の概念

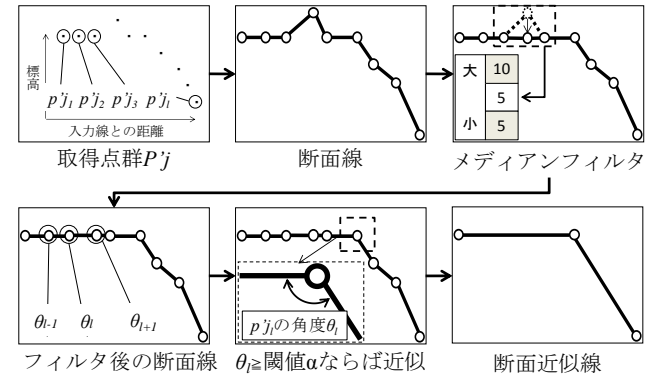


図-6 断面線近似の概念

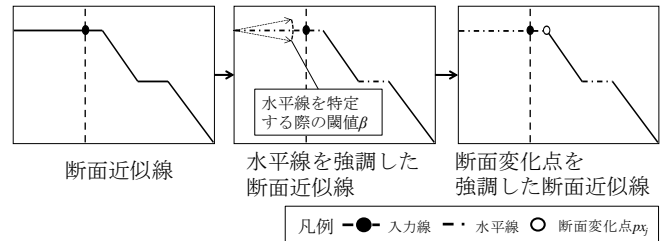


図-7 断面変化点取得の概念

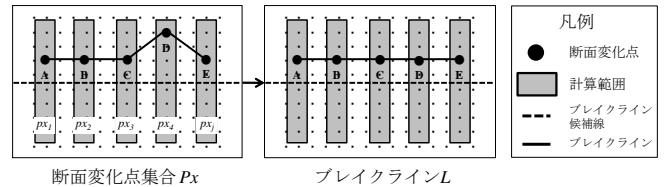


図-8 ブレイクライン作成処理の概念

(1) フィルタ作成処理

本処理では、入力された点群座標データ p_i を包括する間隔 g の格子状のフィルタを作成する。この処理で得た格子フィルタの各交点の集合を $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$ とする。そして、格子フィルタの各交点の集合 F とブレイクライン L を重ねあわせたブレイクラインフィルタ $BF = \{bf_1, bf_2, bf_3, \dots, bf_n\}$ を次の式(1)で算出する。

$$BF = F \cup L \quad (1)$$

(2) 点群座標データ内挿処理

本処理では、フィルタ作成処理によって得られたフィルタ BF に含まれる点 bf_o からウインド法²²⁾を用いて点群座標データ $P_w = \{pw_1, pw_2, pw_3, \dots, pw_q\}$ を抽出する。ウインド法とは、フィルタの交点 bf_o を中心とする一辺の長さ g の矩形領域に含まれる点群座標データ p_i を処理対象とする絞り込み手法である。

次に、点 bf_o における標高の値を点群座標データ Pw から重みづけ平均による内挿処理で取得する。重みづけ平均による内挿処理は、式 (2) と (3) にて算出する。まず、点 bf_o に対する点群座標データ Pw の各点に対する重みづけパラメータ $weight(Pw_q)$ を各点の x, y, z 座標 $bfx_o, bfy_o, bfz_o, pwx_q, pwy_q, pwz_q$ を用いて次の式 (2) で算出する。次に、式 (3) にて bf_o の標高 Z_{bf_o} を求める。

$$weight(Pw_q) = \frac{1}{\sqrt{(pwx_q - bfx_o)^2 + (pwy_q - bfy_o)^2}} \quad (2)$$

$$bfz_o = \frac{\sum weight(Pw_q) \cdot pwz_q}{\sum weight(Pw_q)} \quad (3)$$

ウインド法を用いた重みづけ平均による内挿計算の概要を図-9に示す。内挿計算とは、 r 個の3次元データ $Pa = \{pa_1, pa_2, pa_3, \dots, pa_r\}$ がある時、任意の点 pa_{r+1} の値を推定する計算手法である。本研究では、ウインド法によって対象となる点 bf_o を中心に一辺 g の矩形ウインドに含まれる $Count(Pw)$ 個のデータを対象として、重みづけ平均によって bf_o の標高を求める。重みづけ平均とは、一般的な相加平均と異なり各値の重みを考慮した平均の計算手法である。この時、各値に対する重みパラメータは任意の点 bf_o から各点 pw_q への水平距離とする。そして、各交点 bf_o に標高を与えた3次元の点群座標データ以外を除去することで、格子状に整理された間引き点群座標データへ変換する。

5. 3次元モデルの生成実験

本研究で考案した点群座標データを用いた3次元モデルの生成手法の有用性・有効性を検証するため、3次元モデルの生成実験を実施した。実験では、単純な形状を表現した人工データと、実際の河川堤防を対象に計測した点群座標データとを用いた。

(1) 実験環境

本実験で用いた機器の仕様を表-1に示す。本実験では、ブレイクラインを考慮する本研究の提案手法(以下、提案手法)と格子フィルタのみを用いる従来手法によって出力された2つの間引き点群座標データから3次元モデルを生成する。3次元モデルの生成には、点群座標データの読み込み機能および TIN (Triangulated Irregular Network) 生成機能を有する Autodesk 社の AutoCAD Civil3D 2010 と、フォーラムエイト社の UC-Win/Road ver3.04.12 とを使用する。なお、UC-Win/Road は、点群座標データ読み込み機能を新規に開発して本実験で利用した。

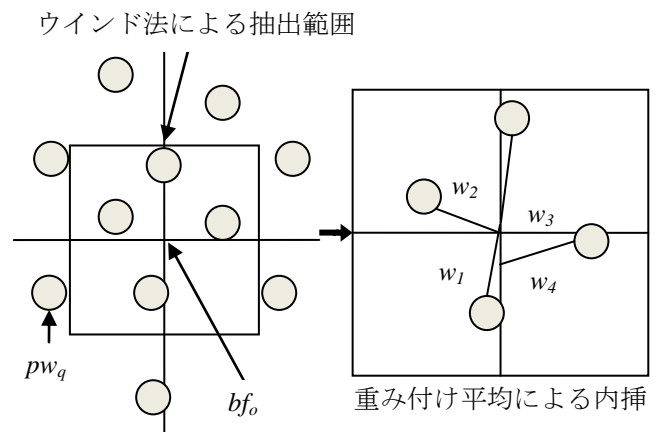


図-9 ウインド法による重みづけ平均の内挿計算

表-1 実験環境

種類	機器	項目	値
ハード	実験マシン	CPU	Inter® Core™2 Duo CPU 2.50Ghz
		メモリ	4.0GB
		HDD	280GB
ソフト	開発環境	開発環境	VisualStudio2005
		言語	Visual C++
	CADソフト	AutoCAD Civil3D	2010
	CGソフト	UC-Win/Road	ver.3.04.12

表-2 実験データの詳細

項目	人工データ	MMS データ
点数	約 150 万点	約 30 万点
計測距離	45m	90m
計測誤差	0.01m	0.01m

(2) 実験データ

本研究では、実験データとして、生成される3次元モデルの現況地形に対する再現精度を評価するために、人工的に作成したデータと三菱モバイルマッピングシステム (MMS : Mobile Mapping System) ²³⁾ で計測した点群座標データを用いた。人工データは、理想的な堤防形状(図-10)を入力し、それぞれの面から計測間隔 50mm, 計測誤差 10mm を想定した点群を生成した。また、MMS の点群座標データは、図-11の楕円で囲まれている堤防沿いの経路を走行して計測した結果(図-12)を用いた。各点群座標データの詳細を表-2に示す。

(3) 実験条件

本項では、提案手法で用いる7つのパラメータ s, w, h, t, a, β, g を実験条件として設定する。このうち、パラメータ s および h の値は、予備実験の結果から経験的に値を設定した。予備実験では、実験とは異なる堤防形状に基づき作成した人工データを用いた。各パ

ラメータの説明と予備実験より得られた結果を次に示す。

a) パラメータ s の設定

パラメータ s は、「I) 抽出範囲限定処理」にて、断面変化点の抽出間隔を設定する値である。予備実験では、パラメータ s の最適な値を決定するために 0.1m から 2.0m まで、0.1m 間隔で 3 次元モデルを生成した。生成されたそれらのモデルと人工点群データの生成に用いた堤防形状との差異を比較した。その結果、 s の値が 0.5m の場合が最も正確に堤防形状を再現していたことから、本実験では $s = 0.5(m)$ を採用した。

b) パラメータ w, h の設定

パラメータ w, h は、「I) 抽出範囲限定処理」にて、断面変化点の抽出範囲を設定する値である。パラメータ w は、抽出範囲 rc の縦幅を設定する値であり、抽出範囲内に断面変化点を含む必要がある。そのため、本実験では十分に大きな値として 3m を採用した。パラメータ h は、抽出範囲 rc の横幅を設定する値である。予備実験では、パラメータ h の最適な値を決定するために 0.1m から 10.0m まで、0.1m 間隔で断面変化点を取得した。取得したそれらの断面変化点と手作業によって取得した断面変化点との差異を比較した。その結果、 h の値が 1.0m の場合に取得した断面変化点と正解データとの差異が最小となったため、本実験では $h = 1.0(m)$ を採用した。

c) パラメータ t の設定

パラメータ t は、「II) 断面変化点取得処理」にて、点群 P_j から断面線の候補点を取得する間隔を設定する値である。点群 P_j は投影変換によって密度が高まるために線形化を行うと急な傾きが頻出し、本来ノイズでない値がノイズとして検出される可能性がある。そのため、 t 間隔ごとに候補点を取得することで、急な傾きによるノイズの頻出を除去する。本実験では、 t の値に投影変換前の点群データから、天端面における点同士の平均間隔である 0.05m を採用した。

d) パラメータ g の設定

パラメータ g は「IV) フィルタ作成処理」にて、格子フィルタの間隔を設定する値である。パラメータ g に小さい値を設定すると生成される 3 次元モデルの再現度が向上するが、出力されるデータ量も増加する。本実験では、同様の格子フィルタを用いて地形を 3 次元モデル化した既存研究²⁴⁾を参考に $g = 5(m)$ を採用した。

e) パラメータ α, β の設定

次に、パラメータ α, β の役割および採用した値を説明する。パラメータ α, β は断面変化点取得処理にて、道路の傾きを特定する際に利用する閾値である。そのため、本実験では道路構造令 24 条の横断勾配の最大値である 5% (2.9 度) を採用した。

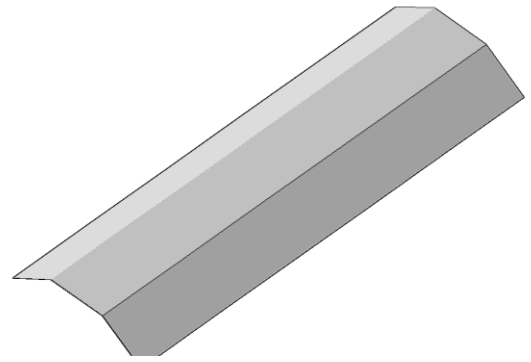


図-10 理想的な堤防形状の可視化結果

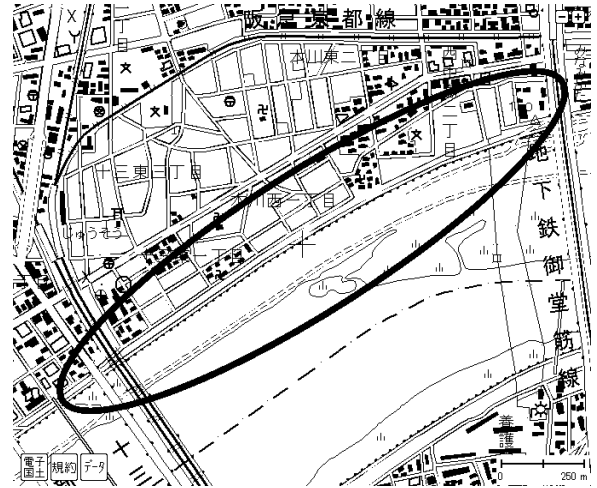


図-11 淀川堤防計測位置

(【出典】国土交通省国土地理院：電子国土ポータル、2010年5月現在)



図-12 MMS 点群座標データの可視化結果 (G-Viz Lite1.0 三菱電機社)

(4) 実験内容

本実験では、まず、本研究で提案した手法で出力したブレイクラインを考慮した間引きの点群座標データを用いて 3 次元モデルを生成する。次に、従来手法によるブレイクラインを考慮しない間引き点群座標データを用いて生成した 3 次元モデルと提案手法の結果とを比較して考察し、有用性・有効性を評価する。評価

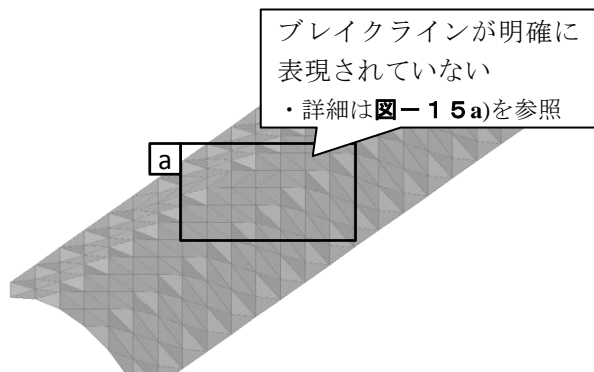


図-13 人工データから生成した3次元モデル
(従来手法)

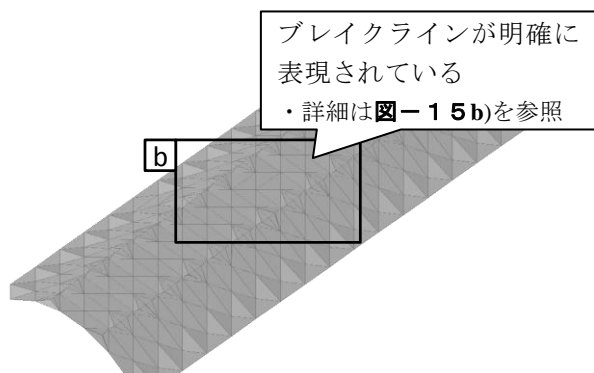


図-14 人工データから生成した3次元モデル
(提案手法)

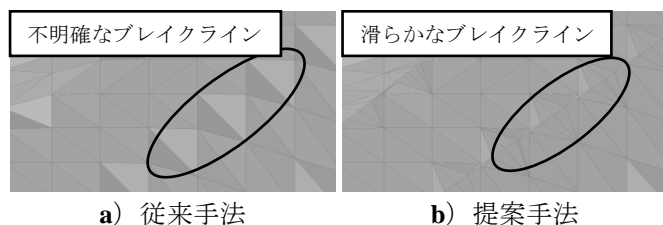


図-15 断面変化点部分の拡大

では、生成した3次元モデルが正しく元の形状を再現しているのかを確認する。また、実験には、人工データおよび実測による点群座標データを用い、それぞれを評価する。

6. 実験結果と考察

(1) 人工データを用いた3次元モデルの生成実験

a) 3次元モデルの可視化による評価

人工データから各手法を用いて生成した点群座標データより3次元モデルを生成した結果を図-13、図-14に示す。各図を比較すると、提案手法の方が元の形状(図-10)に従って、正確に形状を再現できていることが分かる。各手法の断面変化部分を拡大した結果(図-15)を確認すると、提案手法は、ブレイクラインを正確に表現できており、従来手法の問題点を解消できていることが分かる。

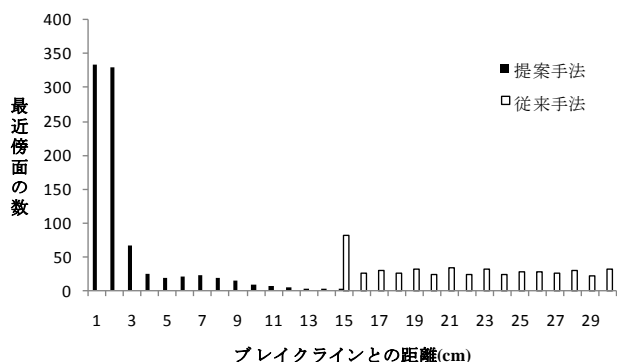


図-16 断面変化点における近傍面の集計結果

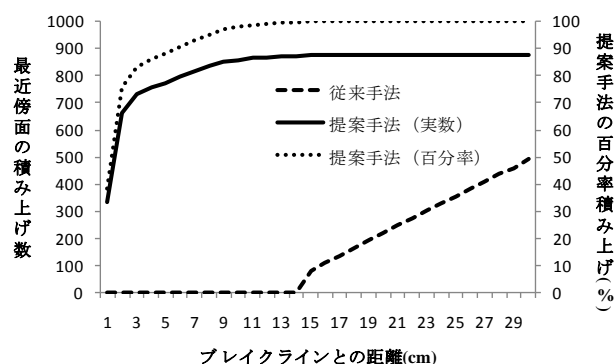


図-17 近傍面の積み上げグラフ

b) ブレイクラインの作成結果と考察

本実験では、断面変化点の再現精度を評価するため、ブレイクラインの正解データを元データから手作業で作成した。その正解データを10cm間隔で分割した点からモデルへの最短距離を算出し、その距離に基づき集計した結果を比較した。比較結果を図-16、図-17に示す。図-16は、縦軸を最近傍面の数、横軸を最近傍面とブレイクラインとの距離を表現したグラフである。図-17は縦軸を最近傍面の積み上げ数として集計結果を表現したグラフである。この結果、ブレイクラインを高い再現精度で作成できたことが確認できた。図-16から、従来手法では、正解データから3次元モデルを構成する点までの距離が15cm以上離れた箇所に存在するのに対して、提案手法では、1cm以内の距離から取得できていることが分かる。また、図-17を確認すると、提案手法では、全体の約98%が10cmで収束していることが分かる。それに対して、従来手法では、15cmから一定の増加率で積み上げ数が増加している。これらの結果から、提案手法で生成した3次元モデルは、従来手法で生成したモデルと比較して、元の形状を正確に再現できていることが分かる。

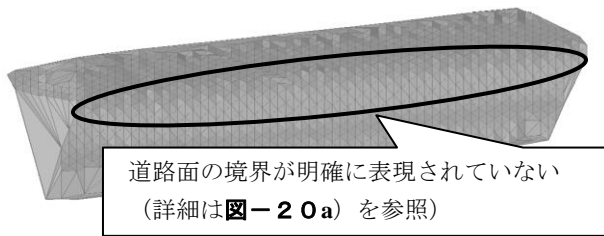


図-18 点群座標データから生成した3次元モデル (従来手法)

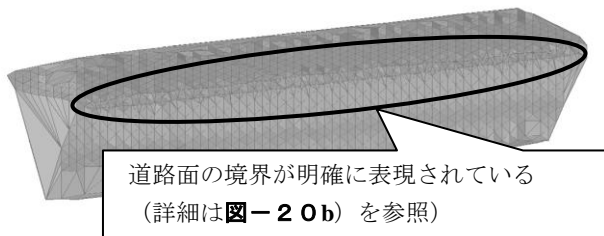


図-19 点群座標データから生成した3次元モデル (提案手法)

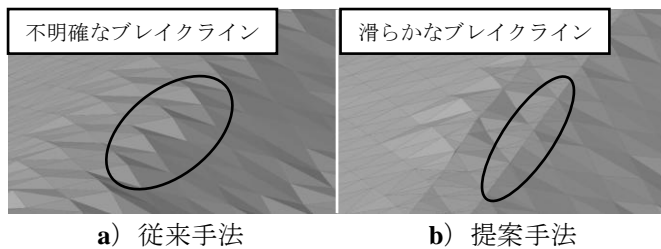


図-20 道路面部分の拡大図

(2) 実測による点群座標データを用いた3次元モデル生成実験

a) 3次元モデルの可視化による評価

MMSによって実測した点群座標データを用いて3次元モデルを生成した結果を図-18, 図-19に示す。図-18と図-19の結果を比較すると、従来手法と比べて、提案手法では容易に天端面を確認できる。図-20を確認すると、提案手法は、ブレイクラインを正確に表現できており、従来手法の問題点を解消できていることが分かる。

b) ブレイクライン抽出の結果と考察

人工データの実験と同様にブレイクラインの構成点と最近傍面までの距離を集計した。この時、正解データにはDMデータの道路線で堤防形状の法肩に最も近い位置にあるものを利用した。

比較結果を次の図-21, 図-22に示す。この時、集計結果からは次の2点の知見を得た。1点目は、本提案手法によって高い再現精度でブレイクラインが作成可能であることが確認できた。提案手法では、約70%の点群座標データが7cm以内に収まっているのに対し、従来手法では約40%に留まっている。また、従来手法にて70%に達するのは約15cmの段階である。これら

表-3 道路土工の出来形管理基準および規格値

工種	測定項目	規格値(mm)
盛土工	幅	100
	法長 5m 以上	法長の 2%
	法長 5m 未満	100
切土工 (掘削工)	幅	100
	法長 5m 以上	法長の 4%
	法長 5m 未満	200

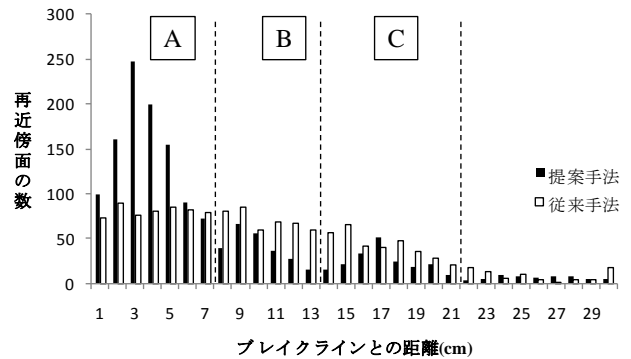


図-21 断面変化における近傍面の集計結果

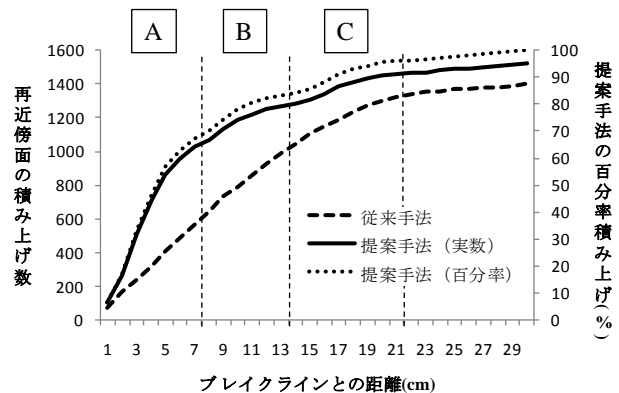


図-22 近傍面の積み上げグラフ

の結果から、MMSの点群座標データを対象とした場合でも提案手法の方が優れていることが分かった。2点目は、情報化施工の出来形管理にも利用できることが確認できた。国土交通省の定める道路土工の出来形管理基準および規格値を表-3に示す。出来形管理基準で定められた測定間隔は40mであるため、90mの施工延長に対して計測点数は約2点である。この2点を一回の出来形計測で取得すると仮定すると、点群データの計測誤差を考慮しない場合、本提案手法による一回の計測で取得できる計測点は、現況地形の形状が1cm以内の再現精度の場合は図-22から分かるように約100点(約50倍)、2cmの再現精度の場合は約250点(約125倍)である。従来の出来形計測の労力と、本提案手法による労力とを比較した作業負荷の効果を検証する課題は残るが、これらの結果から、本提

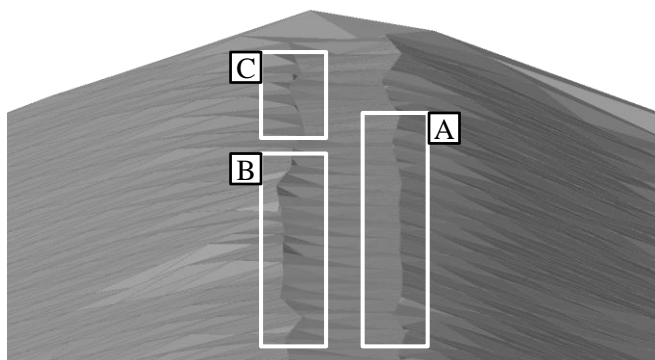


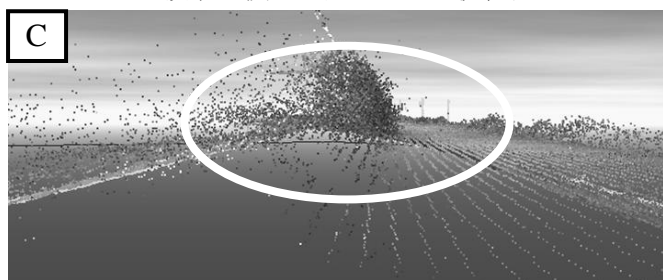
図-23 道路面部分の拡大図



A 領域の横断方向からの可視化例



B 領域の横断方向からの可視化例



C 領域の横断方向からの可視化例

図-24 横断方向からの可視化例
(G-Viz Lite1.0 三菱電機社)

案手法を利用することで、出来形管理の品質向上に寄与できると考えられる。

c) 領域ごとによる評価

本項では、図-21、図-22が示す提案手法の結果が10cm以内の段階に含まれなかった約20%の結果の原因を考察する。図-21は、提案手法による結果として次の表-4の3つの領域に分けることができる。表-4に示す各領域は、図-23の3次元モデルの各箇所と対応している。また、色情報付きの点群座標データを図-24に可視化した。図-23および図-24

表-4 各領域の範囲

領域	範囲	点数	割合
A	1cm から 7cm	1,025	67.4%
B	8cm から 13cm	242	15.9%
C	14cm から 21cm	194	12.8%

の結果から、次に示す各領域の内容を確認できた。

図-23のA領域では、ブレイクラインが正しく直線として抽出されていることが分かる。図-24の「A領域の横断方向からの可視化例」を確認すると、A領域では、植生のノイズが少なく斜面がなだらかであり、断面変化点を正しく認識できていることが分かる。

図-23のB領域では、ブレイクラインの抽出で吸収しきれなかったノイズが折れ線としてブレイクラインに影響していることが分かる。図-24の「B領域の横断方向からの可視化例」を確認すると、B領域では、A領域に比べて断面変化点上に植生のノイズが山なりに集中しており、断面変化点を正しく認識する上で障害となっていることが分かる。

図-23のC領域では、ブレイクラインはA領域と同様に直線として抽出されているが、ブレイクライン間の距離がA領域と比べて狭まっていることが分かる。図-24の「C領域の横断方向からの可視化例」を確認すると、C領域では植生による強いノイズが路面から斜面にかけて壁のように連なっており、点群から断面変化点の認識が困難であることが分かる。これらの結果から、提案手法は図-24のB領域のノイズの強さまでならばある程度植生によるノイズの影響を抑えることができるといえる。しかし、C領域では、植生によるノイズが壁のように路面と斜面とを隔てており、ノイズとして影響を抑えきれずに路面と壁の断面変化点としてブレイクラインが誤抽出されていると考えられる。この問題に対して、あらかじめ堤防形状の特徴を利用して天端面以上の標高を持つ点群をノイズとして除去することでブレイクラインを正しく抽出する対策手法が考えられる。

7. おわりに

本研究では、レーザスキャナから取得した点群座標データを用いて断面変化点（ブレイクライン）を考慮した3次元モデルを生成する手法を提案した。提案手法では、ブレイクラインを抽出処理したデータと、格子状のフィルタを利用して間引き処理した点群座標データとを用いて3次元モデルを生成する。その結果、「点群座標データが膨大で一般のCADソフトでは読み込むことができない」および「実際に計測した点群座標データからブレイクラインを抽出する際に誤抽出が発生する」の2つの課題を解決した。すなわち、レー

ガスキャナで取得した点群座標データから3次元モデルを生成する技術開発に貢献したといえる。また、実証実験の結果から、壁状の植生によるノイズがブレイクラインに影響を与えることが課題として残ったが、情報化施工の出来形管理に利用可能な現況形状に対する再現精度を確保した3次元モデルの生成に有用であることを立証した。すなわち、本研究の提案手法は「市販のCADソフトで読み込み可能な点群座標データの生成」と「市販のCADソフトを用いて面の境界を正しく認識可能な現況形状の再現」の2つの実現に貢献したといえる。

本研究によって得られた課題としては、1) 植生によるノイズが壁のように集合している状態でブレイクラインの誤抽出が発生、2) ブレイクライン候補線が必要な2点が挙げられる。今後、これらの課題を解決し、点群座標データから植生に影響されずに現況地形に対する高い再現精度の3次元モデル生成を目指す。また、3次元モデルを活用した情報化施工の実証実験を実施し、実務への適用性や享受する効果を明らかにする。

本論文は、官学を基軸とした新技術開発促進を目的として、国土交通省近畿地方整備局内に設置している「河川事業のデータ流通環境の構築に関する研究会」の活動成果である。今後も引き続き、円滑なデータ流通環境の実現に向けて鋭意取り組んでいく予定である。

謝辞：本論文を遂行するにあたり、国土交通省近畿地方整備局の企画部長 塚田幸広氏、機械施工管理官 三上章氏、施工企画課 加藤義紀氏、久野啓嗣氏、田中斉氏、河川工事課 下野公仁氏、中村超氏には貴重なご意見・示唆を賜った。日本工営(株)山口達也氏、三菱電機(株)および(株)フォーラムエイトの各氏には点群座標データの計測や3次元モデルの生成でご協力を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：ICTが変える、私たちの暮らし～国土交通分野イノベーション推進大綱～、2007年5月。
- 2) 国土交通省：「国土交通省CALIS/ECアクションプログラム2005」の策定について、2006年3月。
- 3) 国土交通省：「国土交通省CALIS/ECアクションプログラム2008」の作成について、2009年3月。
- 4) 国土交通省情報化施工推進会議：情報化施工推進戦略、2009年3月。
- 5) 金澤文彦、青山憲明、阿部寛之、今井龍一、上坂克己：道路中心線形データ交換標準(案)基本道路中心線形偏Ver.1.0、国土技術政策総合研究所資料、第371号、2007年1月。
- 6) 金澤文彦、田中洋一、神原明宏：土工におけるトータルステーションを用いた出来形管理の検討、国土技術政策総合研究所資料、第505号、2009年1月。
- 7) 国土交通省：施工管理データを搭載したトータルス

- テーションによる出来形管理監督・検査の手引き(案)、2009年3月。
- 8) 国土交通省：施工管理データを搭載したトータルステーションによる出来形管理要領(案)、2008年4月。
- 9) 椎葉祐士、田中洋一、遠藤和重、藤島崇：施工管理データを搭載したRTK-GNSSによる出来形管理手法の提案、土木情報利用技術論文集、土木学会、Vol.18、pp.59-66、2009年10月。
- 10) 土工締め管理情報化施工検討委員会：TS・GPSを用いた盛土の情報化施工締め管理要領(案)、2003年12月。
- 11) 田中成典、今井龍一、中村健二：公共事業のデータ流通環境の整備に関するフレームワークの一考察、土木情報利用技術論文集、土木学会、Vol.18、pp.37-46、2009年10月。
- 12) 福森秀晃、佐田達典、大久保秀晃、清水哲也、村山盛行：3次元レーザーキャナによる測定精度に関する基礎的実験、土木情報利用技術論文集、土木学会、Vol.18、pp.193-200、2009年10月。
- 13) 大津慎一、佐田達典：三次元形状計測における大量点群データの処理手法、土木情報利用技術論文集、土木学会、Vol.16、pp.27-36、2007年10月。
- 14) 谷口健男、真下啓治：3次元体表面上の点群を用いた形状生成と要素分割、応用数理、応用数学会、Vol.15、No.4、pp.310-319、2005年12月。
- 15) Gumhold, S., Wang, X. and MacLeod, R.: Feature Extraction from Point Clouds, Proceedings of 10th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, pp.293-305, 2001.
- 16) 古谷隆志、真鍋友和、谷口健男：point cloudsからの特徴線抽出とそれを利用した3次元領域形状の生成、計算工学講演会論文集、計算工学会、Vol.9、pp.773-776、2004年5月。
- 17) 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、土木学会、Vol.18、pp.1-8、2009年10月。
- 18) 国土交通省：国土交通省公共測量作業規程解説と運用、日本測量協会、2003年5月。
- 19) 国土交通省：拡張デジタルマッピング実装規約(案)、2005年3月。
- 20) 国土交通省：大縮尺地形図図式 拡張デジタルマッピング取得分類基準表(案)、2005年3月。
- 21) Pratt, W.: Digital Image Processing, John Wiley & Sons, 1978.
- 22) 村井俊治：空間情報工学、社団法人日本測量協会、1999年4月。
- 23) 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、<<http://www.mitsubishielectric.co.jp/pas/mms/>>、(入手2010.5.28)。
- 24) 上野幹夫、小林一郎、山本一浩、安重晃、橋本淳也：レーザ計測データを用いた有限要素法による洪水氾濫解析、土木情報利用技術論文集、土木学会、Vol.14、pp.1-6、2005年10月。

(2010.5.28 受付)