

# 航空機 LIDAR を用いた森林域の地盤標高モデル作成の試み<sup>#</sup>

范 海 生\* 李 劍 巧\*\*  
平 春\* 後 藤 真太郎\*

キーワード：LIDAR、地形標高モデル (DEM)、森林、丘陵、四分木、フィルタリング処理

## 1. はじめに

近年、身近な自然との共生の場とした里山林に代表される二次林の管理放棄が問題視されている。広域な森林を管理するために、森林に関するさまざまな情報を面的に、かつ効率的に収集することが急務となる。

航空機搭載型 LIDAR (Laser Imaging Detection And Ranging) を用いた森林計測は、森林の三次元構造を面的にとらえる手段として期待が高まっている。LIDAR 計測データ (以下「パルスデータ」という) から森林の植生階層構造に関する情報を抽出できることにより、広域な森林を対象に総括的な管理を議論することが可能になる。これにより、森林管理の効率化と管理者不足の解消が図れ、時代のニーズに応えることができると考えられる。

本研究では、埼玉県東松山市鳩山町にある県立比企丘陵自然公園における二次林を対象に、航空機 LIDAR による森林域での面的な地盤標高データの取得とその処理解析を通じて、森林域における地盤標高モデルの作成方法を検討した。

## 2. 調査地とデータ整備

### 2.1 調査地の概況

調査地の県立比企丘陵自然公園は、岩殿丘陵 (比企南丘陵) の北東部に位置する。公園内の調査地域の起伏比は約0.16、谷壁傾斜は約25.6°である。

調査地内には、コナラ、アカマツとヤマザクラを主体とする二次林である。その一部は、東松山市により「市民の森」として管理されている範囲に位置する。植生管理は、主に下草刈りで、樹木については倒木処理を行うのみである。

今回の検証では、調査地内の植生管理されている部分を対象エリアとした (図1中枠内)。



※地形図 (500 分の 1) と IKONOS 画像の合成図

図1 調査地の概況図

### 2.2 LIDAR パルスデータの取得

使用した航空機 LIDAR は、Laica 社製 ALS50 である。パルスデータ取得にあたっては、高木層の落葉広葉樹の樹冠下に発達する常緑広葉樹の垂高木層、低木層と林床植生の階層的な林分構造を把握するために、落葉後の冬季 (2006年12月25日) に実施した。表1には計測諸元を、図2にはパルスデータの取得範囲を示す (図中枠内)。



図2 航空機 LIDAR パルスデータの取得範囲

\* 立正大学地球環境科学部

\*\* 清華大学電子工学部

# 平成21年度立正大学大学院地球環境科学研究科オープンリサーチセンター業績

表 1 LIDAR 計測仕様

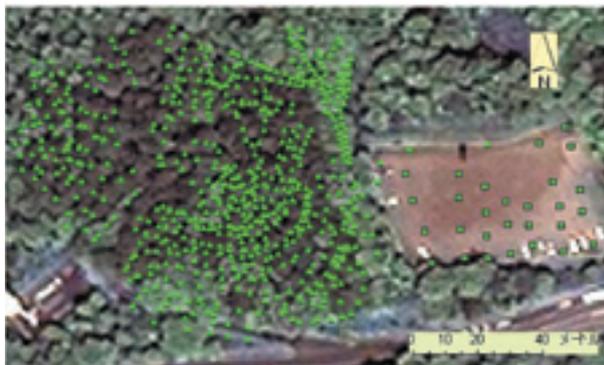
項目	計測仕様
実質計測密度	約3.4点/m <sup>2</sup>
レーザパルス頻度	65,000Hz
スキャン角度	± 18度
スキャン頻度	45Hz
レーザービーム径	0.3mrad*
飛行対地高度	約1200m
測定時飛行速度	252km/h
計測コースラップ率	40%
計測コース間隔	180m
測定プラットフォーム	セスナ404 タイタン
パルスデータの構成	データタイプ First/Last 属性項目 X, Y, Z (反射強度値なし)

\* 対地高度1200m 時地上で40cm 程度

### 2. 3 現地測量

前述の検証対象エリア ( 図 1 ) において、2009年 9月 から12月までに地盤標高の現地測量を実施した。ここでは、地形が急激に変化する遷急点では約 1 m 間隔、地形変化が緩やかな地点では数 m 間隔で計測した。

現地測量には、トプコン社製のトータルステーション ( 以下は TS という ) を使用した。地盤標高計測ポイント ( 以下は TS 測量点という ) の分布を図 3 に示す。



▲ TS 測量点 ( 林内 )      ■ TS 測量点 ( 駐車場 )

図 3 TS 測量点の分布図

### 3. 解析方法

本研究では、前述の TS 測量点データを基に、航空機 LIDAR パルスデータから作成した地盤標高モデルの精度を検証し、森林域での航空機 LIDAR の利用可能性を検討した。その検討手順を図 4 に示す。

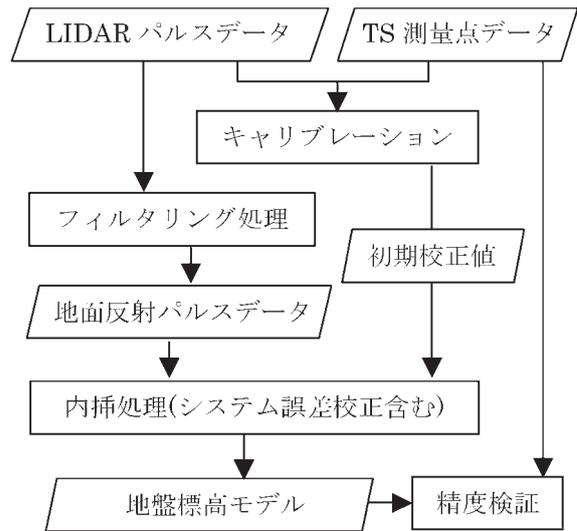


図 4 データ解析フローチャート

図 4 に示した主なデータ処理・検討項目の詳細は以下の通りである。

#### パルスデータのキャリブレーション

前処理として、LIDAR パルスデータと TS 測量点データ間の標高方向におけるシステム誤差値を求める。その値は、パルスデータのキャリブレーション処理に標高校正値として採用した。

#### パルスデータのフィルタリング処理

本研究では、Kraus と Pfeifer より開発されたフィルタリングアルゴリズム ( Kraus ら、1998 ) を基に、広域かつ高密度なパルスデータ処理に向ける地面反射パルスデータの抽出方法を開発した。この方法は、森林被覆の丘陵域への適用事例として、本研究の調査地における二次林の地盤解析に適用した。その結果は本文の後半部分に示す。

#### 内挿処理により地盤標高モデルの作成

パルスデータから抽出した地面反射パルスデータを用い、内挿処理により地盤標高モデル ( 以下は地盤 DEM という ) を作成した。

#### LIDAR 地盤計測精度の検証

現地 TS 測量点データを参照データとし、最適な DEM メッシュサイズを検討した上で、作成した地盤 DEM の精度を求めた。その結果に基づき、航空機 LIDAR を用いた森林域での地盤計測方法の適用性を検証した。

#### 3. 1 測量データのキャリブレーション

異なった測量システムにより取得した航空機 LIDAR パルスデータと現地 TS 測量点データ間のキャリブレーション

ションを実施する必要がある。そこで本研究では、調査地付近の駐車場における TS 測量点データを利用して、LIDAR パルスデータの初期校正値を求めた。

下記の表 2 に示す通り、駐車場内計34点の TS 測量点 (図 3 参照) を利用し、TS 測量点と近く (距離 0.5m) の LIDAR パルスデータの標高値の平均差を求めた。その値 (-0.326m) は LIDAR パルスデータの標高値の初期校正値として採用した。

表 2 TS 測量点データと LIDAR パルスデータの標高値比較結果 (単位: m)

参照データ	標高の平均値		差 (平均)
	TS	LIDAR	
TS 測量点	TS	LIDAR	$Z_{LIDAR} - Z_{TS}$
計34	119.549	119.223	-0.326

\* 駐車場の TS 測量点データを用いた統計結果

### 3. 2 四分木式フィルタリング処理方法

本研究で開発し適用したパルスデータのフィルタリング処理方法は、Kraus らが開発したフィルタリングアルゴリズムに基づいたものである。

一方、Kraus 式フィルタリング処理では、全域のパルスデータを分割せずに処理することにより、次のような欠点が生じると考えられる。

< 処理結果精度上の問題 >

局所的な地形特徴の抽出は困難となり、大縮尺の地盤 DEM の作成精度基準を十分に満たせない。

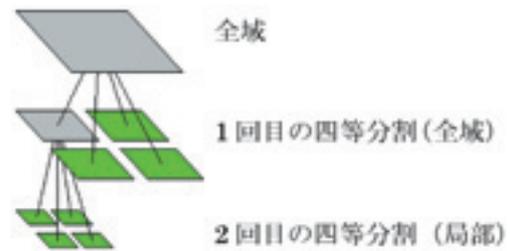
< 処理効率上の問題 >

全域のデータを一体で繰り返し処理するため、広域なパルスデータを処理する際に、CPU 計算量は莫大になり、実応用性に欠ける。

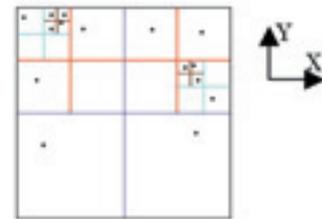
即ち、航空機 LIDAR パルスデータから地面反射パルスデータをより正確かつ効率的に抽出し大縮尺の地盤 DEM を作成するためには、全域のパルスデータを面的に細分化する必要がある。また、分割された領域別にフィルタリング処理を行うことにより、パルスデータ全体処理の CPU 計算量を有効に抑えられられる。

そこで本研究では、画像処理に用いられる四分木 (Quad-Tree) 方法 (Finkel, 1974) を適用し、次のようなフィルタリング処理手法を開発した。

図 5 に示すように、四分木方法を用いて、解析対象データの局部特徴を配慮しながら、一定な条件を満たす格子に限り、該当格子を繰り返し四等分割し、最終的に階層的なデータモデルを構築する。



(A) 四分木式の階層的な構造



(B) 四分木式の領域分割効果

図 5 四分木方法の説明図

なお、四分木方法を用いたパルスデータのフィルタリング処理には、次のような処理手順と判断基準を設けた。

< ステップ I >

X-Y 平面座標系において、パルスデータの全体をメッシュ化処理し、指定メッシュサイズ (n) の格子に分割する。

< ステップ II >

格子ごとに、(フィルタリング処理後に残った) パルスデータの二次曲面回帰或いは平面回帰解析を行い、三次元表面方程式を求める。

< ステップ III >

格子ごとに、Kraus 式フィルタリング処理を行い、上記の三次元表面から一定距離値以上離れたパルスデータを除去する。

次に、下記の条件 A と B を全て満たす格子は、次のステップ IV に進める。条件 A と B の何れかを満たせない格子は、次のステップ V に移す。

条件 A : 格子内 (フィルタリング処理後に残った) パルスデータの数は一定数 (閾値 N) 以上。

条件 B : 格子内 (フィルタリング処理後に残った) パルスデータと求めた三次元表面との標高方向の残差平均値は一定数 (閾値 S) 以上。

< ステップ IV >

該当格子を四等分割し、各サブ格子において、上記のステップ II と III を繰り返し実施する。

< ステップ V >

該当格子の四分木分割処理を完了させる。

また、全域の四分木分割処理は完了してから、各格子

に残されたパルスデータを用いて、調査地の地面三次元形状を表す不整三角形網 ( TIN ) を作成する。最後に、その TIN データの内挿処理により地盤 DEM を作成する。

次の図 6 には上記の処理手順を表すパルスデータ処理フローチャートを示す。また、図 7 には四分木式フィルタリング処理の流れを示す。

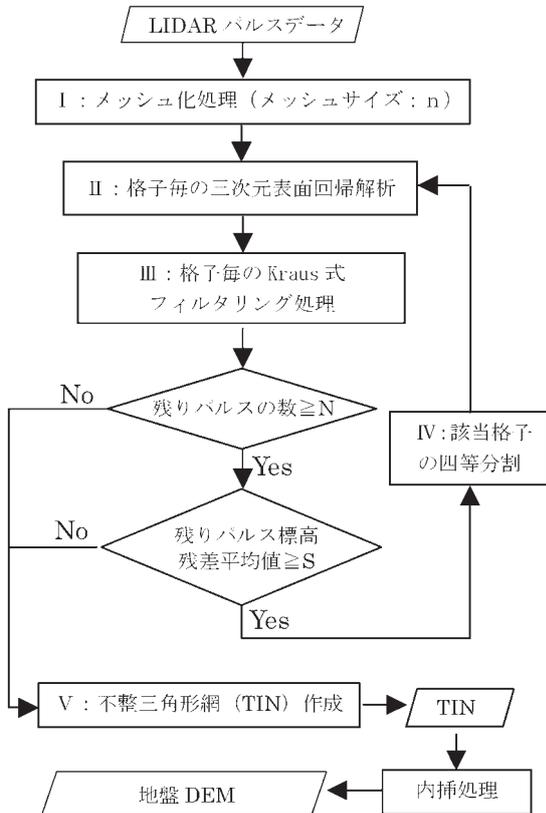


図 6 パルスデータ処理フローチャート

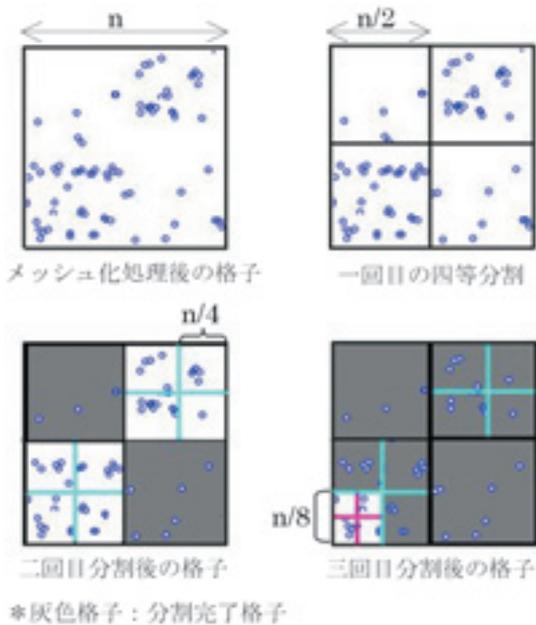


図 7 四分木式フィルタリング処理の流れ

### 3. 3 地形計測成果の精度検証

本研究では、最適な DEM メッシュサイズの選定を含め、航空機 LIDAR パルスデータより作成した地盤 DEM の精度を検証した。その検証方法を図 8 に示す。

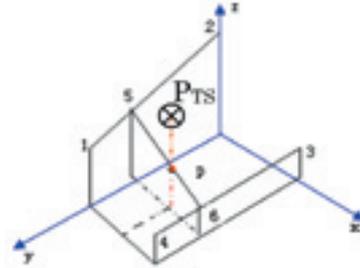


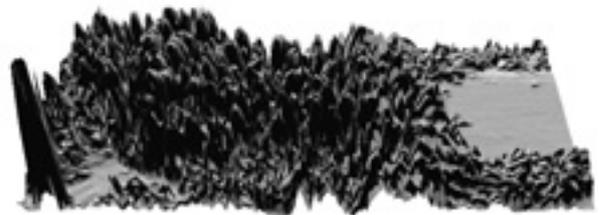
図 8 地盤 DEM 誤差の計算方法

図 8 に示した三次元座標系において、地盤 DEM の局部表面 1-2-3-4 と TS 測量点  $P_{TS}$  間の差を計算するには、まず  $P_{TS}$  を通る垂直線と三次元曲面 1-2-3-4 との交点  $p$  を求める。次に、交点  $p$  と  $P_{TS}$  の直線距離を計算する。この距離値が TS 測量点  $P_{TS}$  における地盤 DEM の誤差値とする。

## 4. 解析結果

### 4. 1 地面反射パルスデータの抽出

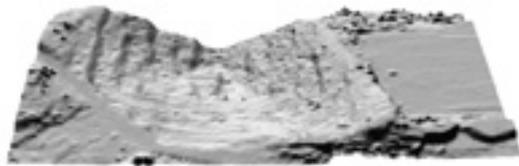
次の図 9 には、前述の四分木式フィルタリング方法を適用したパルスデータ処理効果 - フィルタリング処理前及び繰り返し処理後の残りパルスデータ全体の上表面の陰影図を示す。なお、最終回フィルタリング処理後に残ったパルスデータは地面反射パルスデータと見なされ、後述の地盤 DEM の作成に採用した。



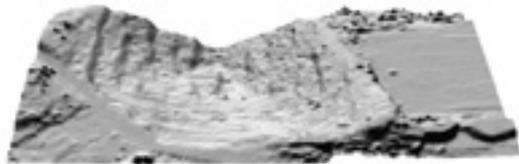
(A) フィルタリング処理前



(B) 1 回目のフィルタリング処理後



(C) 2回目のフィルタリング処理後



(D) 最終回のフィルタリング処理後

図9 パルスデータのフィルタリング処理効果図

#### 4.2 地盤DEMと精度検証結果

地盤DEMの作成にあたっては、最適なDEMメッシュサイズの選定が必要となる。本研究では、現地測量による実測点 - TS 測量点データ (計709点、図3参照) を主体に、前述の精度評価方法 (図8) で各点の実測値と地盤DEMの差を求めた。なお、異なったメッシュサイズで作成した地盤DEMの精度を求め比較した結果、最小誤差値のメッシュサイズ (1 m) を確認できた (図10参照)。それを最適なメッシュサイズとして選んだ。

次の図11には上記の最適なメッシュサイズで作成した地盤DEMとLIDARパルスデータの横断グラフを示す。

なお、参照データのTS測量点データと比較した結果として、地盤DEMの誤差 (RMSE) は0.413mであった。地盤DEMの精度評価結果を図12に示す。

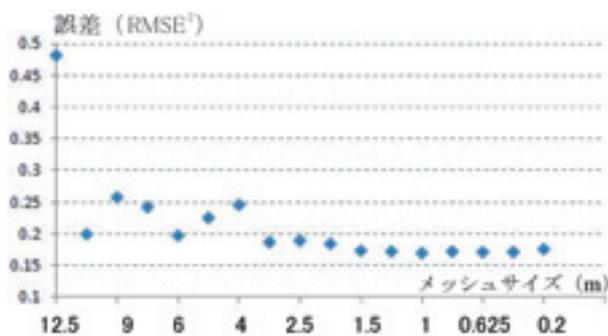
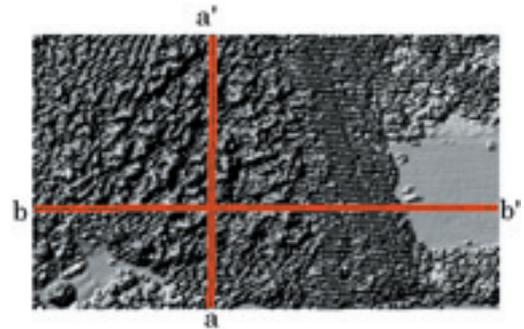
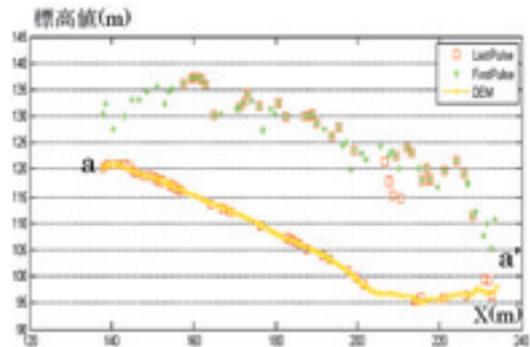


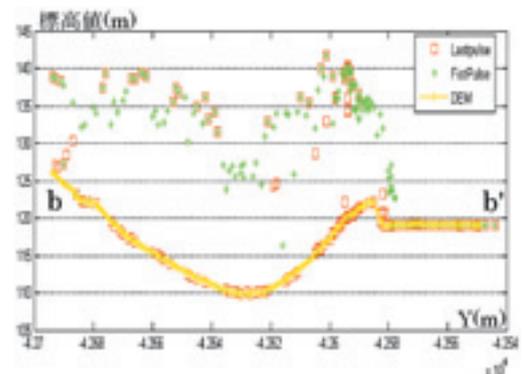
図10 地盤DEMメッシュサイズと誤差の関係図



(A) 横断線の定義



(B) 線分aa'上の横断グラフ



(C) 線分bb'上の横断グラフ

図11 地盤DEMとパルスデータの横断図

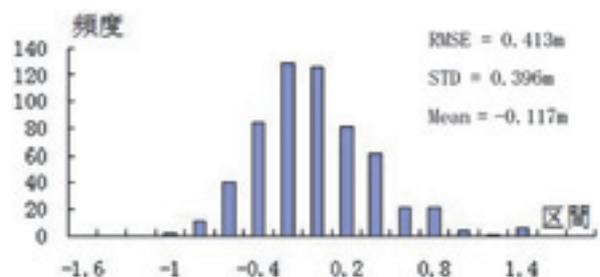


図12 地盤DEM誤差分布ヒストグラム (メッシュサイズ: 1m)

## 5. まとめ

本研究では、航空機 LIDAR により取得したパルスデータの処理解析を通じて、森林域における地形計測の精度を検討した。その結果としては、航空機 LIDAR パルスデータを用いて高精度の地盤標高モデルを作成できる可能性が明らかになった。広範な森林域を対象とする大縮尺地盤 DEM 作成に、本手法の利用性は高いと判断される。

今後、フィルタリング処理手法の改善、中間反射パルスデータ (Other Pulses) を持つ新型パルスデータの利用可能性や下層植生管理されていない地域における地盤 DEM 作成精度などについて検討する予定である。

## < 謝 辞 >

本研究に利用した航空機 LIDAR 計測データは、立正大学と朝日航洋株式会社による産官学共同研究成果の一部である。また、本研究の一部は「立正大学石橋湛山記念基金」より研究助成を受けて実施した。ここに関係各位に厚く謝意を表す。

## < 参考文献 >

- K. Kraus, N. Pfeifer, 1998, Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 53, pp.193-203.
- R. A. Finkel and J. L. Bentley, Quad Trees: A Data Structure for Retrieval on Composite Keys, Acta Informatica 4 (1), pp.1-9, 1974.

# Determination of Digital Elevation Model in Wooded Area with Airborne LIDAR Data

FAN Haisheng\*, LI Jianqiao\*\*, PING Chun\*, GOTO Shintaro\*

\*Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

\*\*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, China

## Abstract:

Auto-generation of Large-scale digital elevation model in wooded areas is fundamental to LIDAR data's application in forest management over a large extent. In this article, a new method is proposed and implemented, which is characterized by the combination of adaptive quadtree-based processing with common iterative filtering method. Digital elevation model in wooded and undulating hill area was derived from LIDAR data, and proved to be in good accordance with field survey data of terrain surface, which was collected by high-precise total-station. Also, adaptive quadtree-based processing algorithm on LIDAR data processing was verified with high efficiency, which shows its adaptation for processing high dense LIDAR data over a large extent.

Keywords: LIDAR; digital elevation model (DEM); DEM in wooded and undulating hill areas; quadtree; filtering