

ラジコンヘリと LIDAR データを用いた 森林構造把握の基礎的研究

平 春* 後 藤 真太郎*

キーワード：ラジコンヘリ、LIDAR、空中写真、森林構造、DEM

1. はじめに

リモートセンシングは、その広域性、周期性から森林をモニタリングするための有効な手段として研究されてきた。その研究は、樹種の分類（加藤, 2002; Maartin et al., 1998; Larsen, 2007）、林分タイプ分類（蔡ら, 2004）、フェノロジーの解析（小谷ら, 2003; 西田ら, 2003, 2004; Xiao et al., 2006）、樹冠率の推定（小熊・山形, 2000; 沖・小熊, 2002）といった森林構造に関する解析やミクセル分解（小熊ら, 2002）といった解析手法の開発と多岐に及ぶ。しかしながら、前述のような研究にて度々用いられる光学センサーでは森林植生指標を用いて、樹種の分類や樹冠率の推定などができるが、森林垂直構造を計測し、実態に把握することは難しい。森林材積量の推定、さらに二酸化炭素吸収量や炭素貯蔵量を予測するには、森林構造を把握することは重要である。このような中で航空機搭載型の LIDAR を用いた森林計測は、森林の三次元構造、毎木位置や高さ、樹冠など単木単位で森林構造のパラメータを取得が可能であると期待されている（瀬戸島, 2001; 加藤, 2004）。これまでも、LIDAR データを用いて、樹木の高さの推定（田村, 2000; 蔡斌, 2006; Takahashi, 2005）、樹冠量の推定（伊藤, 2008）、材積・炭素量の推定（米, 2002）、森林バイオマスの推定（M. García, 2010; R. Nelson, 2012）といった研究が行われている。

LIDAR データの精度については、佐藤ほか（2004）が LIDAR データによる DEM の高さ方向の誤差が 1 m 以下であることを明らかにし、従来の写真測量で得られる等高線データと比べて精度が高いことを示した（佐藤, 2004）。森林地域ではその開空度によってレーザのパルスの透過性が異なるため、森林構造の計測精度や森林下の地形計測精度に影響があると考えられる。本研究では、ラジコンヘリを用いて、森林管理による開空度が異なる

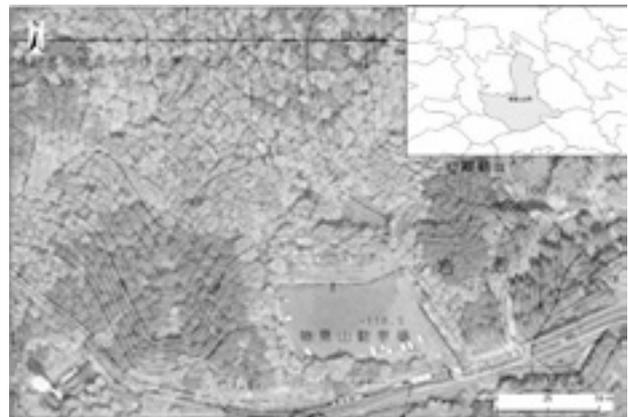


図1 対象地域（県立比企丘陵自然公園）

二つの調査域で LIDAR の透過性を調べ、LIDAR データと現地測量データとの誤差を計算し、その精度を検討した。また、地表面とレーザパルスの距離の差を樹高とし、樹高の分布図を作成し、管理によって異なる森林垂直分布を調べ、LIDAR データの空間分布から推定される森林構造の状況を解析した。

2. 調査域と使用データ

2.1 対象地域

本研究の対象地域は埼玉県東松山市南西部から鳩山町を中心に広がる岩殿丘陵に位置する県立比企丘陵自然公園である（図1）。対象地域内は下草刈り管理されている森林と管理されていない森林の2種類が隣接している小地域があり、開空度条件が異なるため LIDAR の透過性を検討する条件を満たす調査地域である（図2, 図3）。2つの小地域の内、西側小地域は定期的な管理が行われており、東側の地域は管理が放棄されている。本研究では西側の小地域を M 地域、東側の小地域を N 地域とした。

M 地域は「市民の森」として、定期的な管理がなされ

* 立正大学大学院地球環境科学研究科



図2 M地域の森林の林床状況



図3 N地域の森林の林床状況

ている範囲内に位置する。「市民の森」は、東松山市の南西部、鳩山町との市境に位置する公有林で、1986年（昭和61年）に国有林の払い下げにより東松山市が32haを買い上げ、管理している。現在、「市民の森」の植生管理については、東松山市は造園業者に委託しており、「市民の森」で行われている植生管理は、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。最近は、「市民の森」全体を6つのブロックに分け、毎年1箇所ずつ下草刈りを行っているが、それ以前からも管理自体は行っていた。また、遊歩道周辺10mについてのみ、毎年、下草刈りが行われている。下草刈りは秋に行われており、斜面上部を中心に林床を一様に刈りとられている（図2）。

これに対してN地域では、M地域のように定期的な管理が行われておらず、常緑低木や背の高いアズマネザサが茂っている（図3）。しかし、二次林が成立していることや、萌芽したコナラが見られることから以前は管理が行われており、その後放棄されたと思われる。

表1 LIDAR 計測仕様（2006年12月25日）

項目	計測仕様
計画計測密度	約4.0m ² に一点
実質計測密度	約1.0m ² に一点
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
オーバーラップ率	40%
計測コース間隔	180m
プラットフォーム	セスナ404

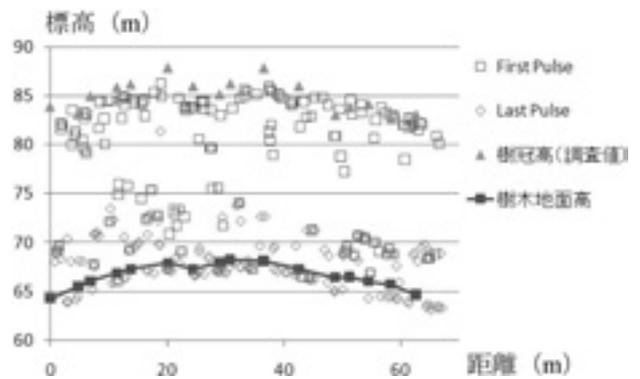


図4 LIDAR データと樹木調査データの断面図

2. 3 使用データ

本研究では、セスナ機搭載型の航空レーザスキャナ Leica/ALS50を用いて計測を行った（表1）。利用したLIDARは、一つのレーザショットに対して、反射強度1位と2位の反射パルスを記録でき、受信前後関係によってそれぞれファーストパルス（First Pulse）とラストパルス（Last Pulse）という名称を付けられている。LIDARデータと樹木調査データの断面図によると、ファーストパルスとラストパルスは垂直方向上混在するが、地面に近づくと、ラストパルスの割合は高くなり、地面から離れると、ファーストパルスの割合が高くなる（図4）。全体的に見ると、ファーストパルスは必ずラストパルスより高いとはいえず、ラストパルスは必ずしも地面反射されたものでもない。両タイプとも森林全体構造に反射されたものであると考えられる。なお、レーザパルスの反射地点のポイントデータの属性は座標XYと標高Zである。



図5 ラジコンヘリ MD-200

表2 ラジコンヘリ MD-200 の撮影仕様

項目	仕様
写真縮尺	5882.353
カメラの焦点距離 (cm)	1.7
飛行高度 (m)	100
地上解像度 (cm)	2.529
オーバーラップ	60
サイドラップ	30
撮影基線長 (m)	30.588
コース間隔 (m)	71.235
横方向の実距離 (m)	76.471
縦方向の実距離 (m)	101.765
撮影面積 (㎡)	7782.007
ステレオ有効面積 (㎡)	2178.962
論理平面位置 (cm)	2.529
論理標高 (cm)	8.269
横方向 (cm)	1.3
縦方向 (cm)	1.73

3. 研究方法

3. 1 ラジコンヘリによる樹冠調査

3. 1. 1 ラジコンヘリによる空中写真撮影

本研究ではLIDARデータの透過性を見るために株式会社イメージワンから提供されたラジコンヘリ MD-200 を使用して、2011年8月3日に対象地域の空中写真を撮影した(図5)。このラジコンヘリは重さ200gまでのカメラを載せることができ、バッテリー使用時間約20分、電波距離は1kmである。また、あらかじめプログラム撮影ルートを飛行することができ、リアルタイムで下向きカメラの映像とカメラ中心点の高さ(GPSによる)をチェックしながら写真を撮ることができる。本研究では、ラジコンヘリによる現地撮影を表2の計測仕様をもとに、図6に示す位置で行い、11枚の写真を撮影できた。なお、この撮影位置はラジコンヘリに搭載されたGPSから測定され、写真の中心位置を示している。

3. 1. 2 空中写真の幾何補正

ラジコンヘリにより撮影した空中写真は位置情報を持つ

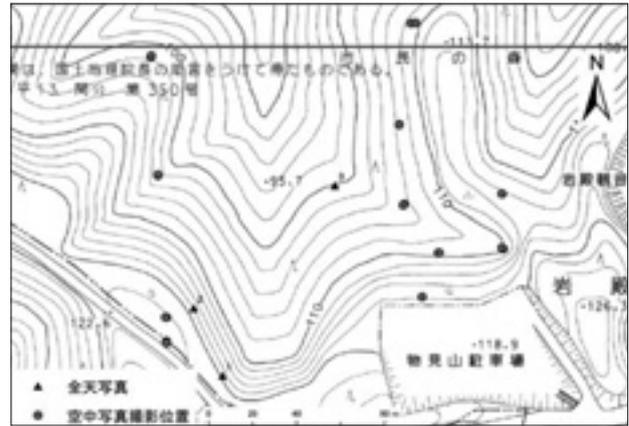


図6 ラジコンヘリによる空中写真撮影位置と全天写真撮影位置

ていないため、幾何補正をする必要がある。本研究では空中写真で判読できる地上物をGCP (Ground Control Point) とし、幾何補正を行った。選定した地上物は物見山駐車所の囲いの角と看板、電波塔のフェンスの角であり、それらに対して基準点からトータルステーション(以下、TS)を用いて測量を行った(図7)。測量結果を表4-1に表示している。GCPを空中写真から判読し、位置を約1ピクセル(約5cm)まで合わせた。モザイク処理は、写真の中心点のGPSデータと方位角を利用し写真を回転させ、同じ地上物を判読し、対応のピクセルを合わせた。

3. 1. 3 樹冠と樹冠間の分類

3.1.1で幾何補正した空中写真の輝度値情報から閾値を決め2値化処理を行い、樹冠と樹冠間を分類した。閾値は輝度値のヒストグラム(図8)の最大値より決めた。

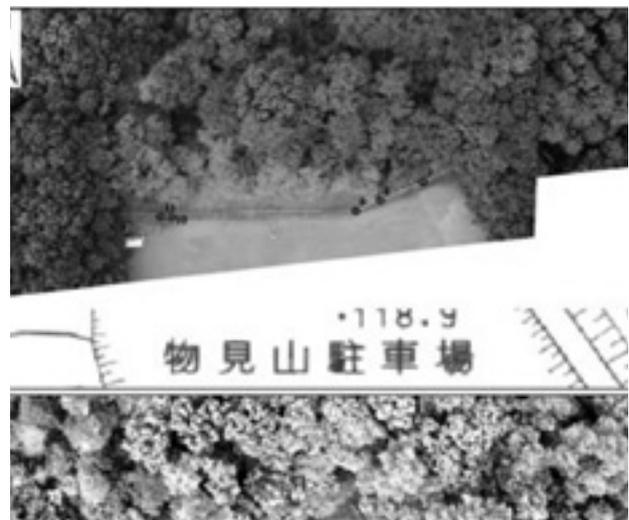


図7 空中写真の幾何補正に使用したGCP

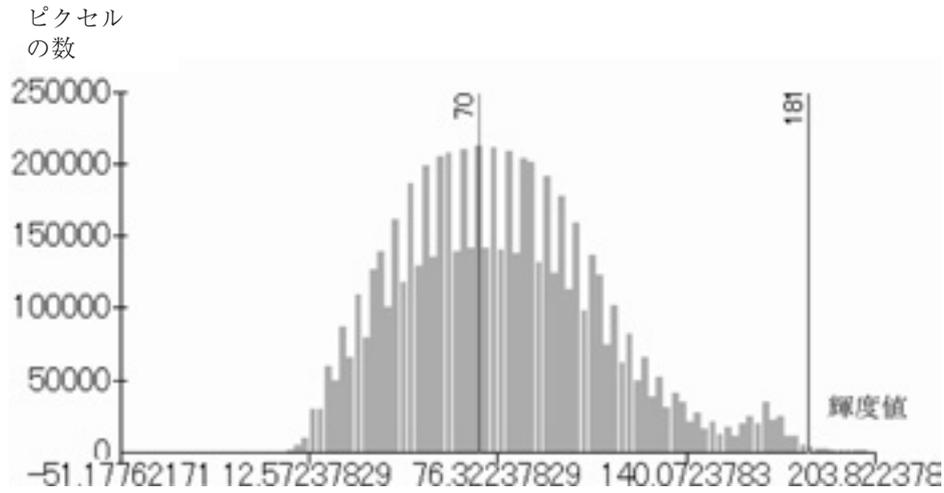


図8 空中写真の輝度値ヒストグラム

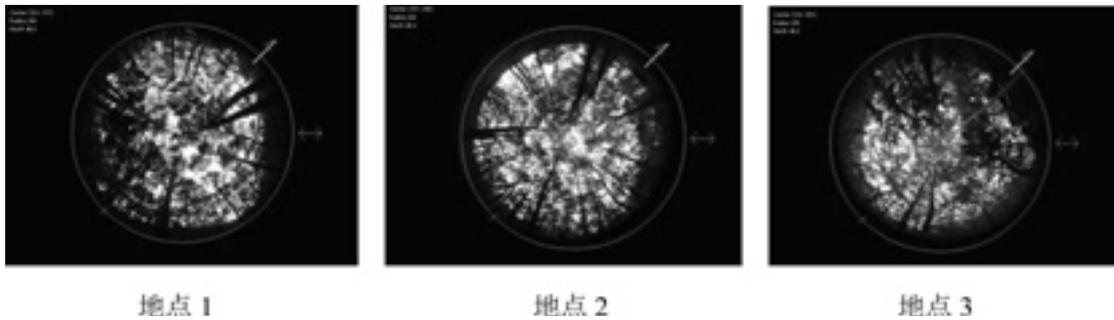


図9 魚眼レンズを用いた各地点の全天写真

この分類精度を検証するために、魚眼レンズ (NIKON fisheye converter fc-e9 0.2x) を用いて、図6に示している位置において全天写真を撮影し、CanopOn 2 (全天写真プログラム, 2009) を用いて得られた開空度と比較を行った (図9)。

3. 2 LIDAR データの透過性の検討

本研究では、3.1において樹冠と樹冠間と分類した結果を用い、M地域とN地域におけるレーザパルスの透過性について検討を行った。樹冠間に位置するレーザパルスは地面に到達していると考えられるので、樹冠間から反射しているレーザパルスの割合を計算した。本研究で使用したLIDARのビーム幅は約40cmであるため、レーザパルスのポイントデータより20cmのバッファ (直径40cm) を作成し、樹冠間から反射しているか確認を行った。

3. 3 LIDAR データ精度の検討

3. 3. 1 現地測量

LIDAR データの処理精度を検証するために、研究域に

おける TS を使用し、地表面測量を行った。測量方法として、物見山に設置している二等三角点からトラス測量を行い、調査域周辺に基準点を設置し、基準点から標高の測量を行った (図10)。また、計測システムの傾斜角によって発生した高さ方向の誤差を検討するため、調査地付近の物見山駐車場 (図10) においても TS 測量を行った。

3. 3. 2 LIDAR 精度の検討

本研究では、TS 測量によって得られた標高データを



図10 TSによる現地測量 (約600点)

用いて、空中写真から得られた樹冠間からの反射パルスデータの精度検証を行った。なお、検証に用いた地点は物見山駐車場であった。次に、LIDAR データを開空度が異なる M 地域と N 地域の現地測量データと比較し、その透過性と地表面測量の精度を検討した。

3. 4 樹高分布図による森林構造の把握

空中写真で分類した樹冠間から反射している LIDAR データから地表面 DEM を作成した。作成手法として、まず LIDAR データから TIN (Triangulated Irregular Network) を発生させ、次に TIN から Natural Neighbor 内挿方法を使用し DEM を作成した。同じ手法を使用し、樹冠から反射している LIDAR データを利用し DSM (Digital Surface Model) を作成した。この DSM と地表面 DEM の差分を計算し樹高分布図を作成した。また、M 地域と N 地域における現地調査を行い、研究地域の森林構造を確認した。

4. 解析結果

4. 1 LIDAR の精度検証結果

物見山駐車所の TS によって得られた地表面標高データを利用して LIDAR 計測システムの誤差は 0.326m となった。また、M 地域では樹冠の間から反射するラストパルスは 52.62% であり、それを現地測量データと比較した平均誤差は 0.413m となった (図11)。N 地域では樹冠の間から反射するラストパルスは 25.47% であり、それを現地測量データと比較した平均誤差は 0.629m である (図12)。この結果から、誤差が大きい場所 N 域では開空度が低いためラストパルスは樹冠から反射しており、誤差が小さい M 域では開空度が高いためラストパルスが樹冠間から反射していると判断される。

ラジコンヘリの空中写真の 2 値化処理の精度検証のた

表 3 各地点の開空度 (%)

閾値	開空度 (%)		
	地点 1	地点 2	地点 3
0.5	17.9	19.9	12
0.2	35.2	42.8	30.4
0.8	11.6	13.4	8.4

め、M 域に 2 か所 (地点 1, 地点 2)、N 域では 1 か所 (地点 3) の全天写真を撮り、開空度を計算した (図 6)。本研究では CanopOn 2] を利用し、まず閾値を 0.5 に設定し解析した (表 3)。その結果、地点 2 が最も開空度が高く、次いで地点 1 が高かった。三か所中唯一 N 域で撮影した地点 3 は、地点 1、地点 2 よりも開空度が低かった。また、閾値を上下してもそれぞれの地点の関係はほとんど変わらなかった。ラジコンヘリの空中写真から計算された樹冠間の割合は M 域では高く、N 域では低い結果とほとんど一致している。

4. 2 森林構造の把握結果

現地調査によると、M 地域の植生は、木本類はアカマツが最も多く、次いでヤマザクラやコナラが多い。流域内の木本類は、ほぼこの 3 種で占められている。アオキなどの低木はほとんど見られず、5 m 以下の木本は、成長途中のコナラなどが少し見られる程度である。草本類はアズマネザサが優先しており、ほぼ一面アズマネザサが群生しているが、隙間を縫うようにシダ類やジャノヒゲなども見られる。一番背の高い草本はアズマネザサであり、高いものでは約 30cm にもなる (図 2)。N 地域の植生は、木本類はコナラやシラカシ、マルバアオダモなどの落葉広葉樹や常緑広葉樹が多く、M 流域で最も多かったアカマツは N 地域では少なかった。また、生育場所も尾根を中心とした狭い範囲に限られていた。低木に

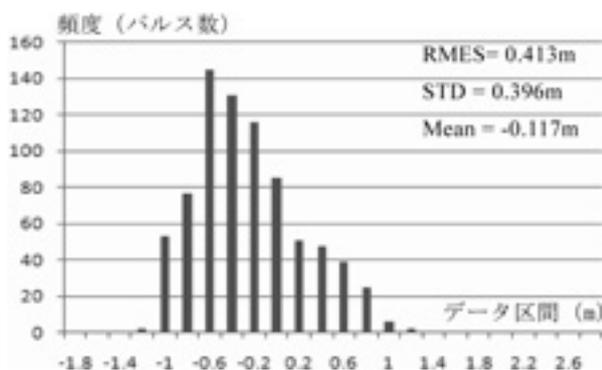


図11 M 地域の LIDAR の誤差

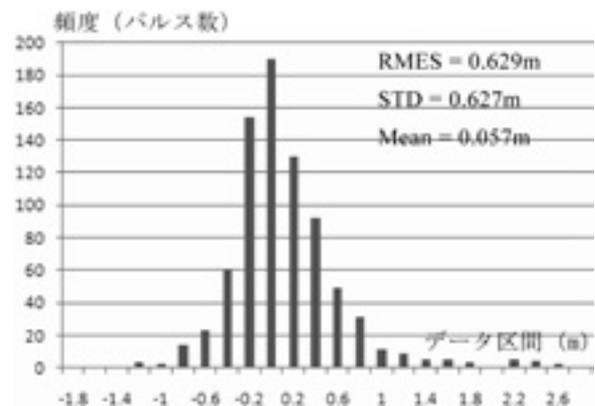


図12 N 地域の LIDAR の誤差

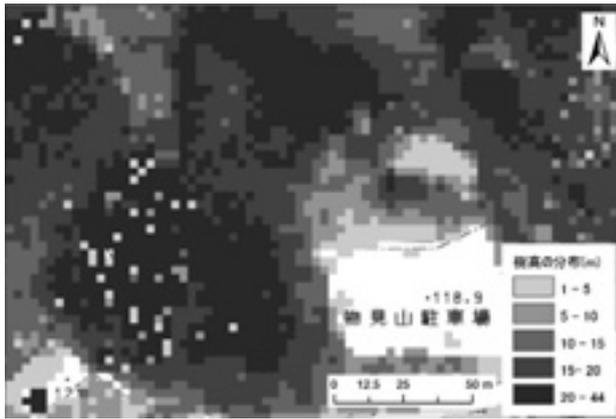


図13 樹高分布図

関しては、斜面ではヒサカキ、谷底付近ではアオキがほぼ一面を覆っていた。ヒサカキとアオキは平均して2m程度の全長だった。その他には、立ち枯れの木がN地域より多く見られた。草本類は、ヒサカキやアオキが光りをほとんど遮ってしまっているため、ほぼアズマネザサしか見られず、ところどころに30cm～100cm程度のアズマネザサが群生していた(図3)。

LIDARによる樹高分布図では、1m～5m、5m～10m、10m～15m、15m～20m、20～、五つの樹高ランクに分けて表示した(図8)。樹高分布図によると、N地域では1m～5mの低木と、5m～10mの亜高木、樹高10m以上高木が分布し、M地域では、主に樹高10mの高木が分布している。この結果が、現地観測による森林構造とほぼ一致していることをわかった。

5. まとめ

本研究は、開空度の異なる森林中に調査地を設置しLIDARデータの透過性とその精度を検討した。その結果、開空度が50%以上の森林ではLIDARの標高誤差が50cm以下となり、樹冠下の微細な地形を把握できることがわかった。

また、LIDARデータから樹高分布図を作成した結果、管理によって異なる森林の低木層、中木層、亜高木層高木層など特徴を把握することができた。

参考文献

伊藤拓弥・松英恵吾・内藤健司(2008) 航空機LiDARによる森林資源量推定—スギ・ヒノキの樹高・樹冠量による立木幹材積推定式の検討—, 写真測量とリモートセンシング, 47(1), 26-35.
加藤正人(2002) 高分解能IKONOS衛星による針広混交林の

樹種分類, 森林航測198, 6-9.

加藤正人(2004) 森林リモートセンシング. (株)日本林業調査会.
川西基博・崎尾 均・白石貴子・米林 伸・後藤真太郎(2005) 荒川中流域の河畔林における草本植生の種組成と生活型, 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平成17年度事業報告書, 107-112.
小谷英司・栗屋善雄・岡野通明(2003) 落葉広葉樹林における航空機MSS分光反射とfPARの季節変化, 日本写真測量学会年次学術講演会発表論文集, 225-228.
米康 充・小熊宏之・山形与志樹(2002) 京都議定書に関する吸収源計測システムの開発—航空機Lidarによるカラマツ林の樹冠計測と材積・炭素重量計測精度の検証—, 日本リモートセンシング学会誌, 22(5), 531-543.
Larsen, M. (2007) Single tree species classification with a hypothetical multi-spectral satellite. Remote Sens. Environ., 110, pp523-532.
Maartin, M. E., S. D. Newman, J. D. Aber and R. G. Congalton. (1998) Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data, Remote Sens. Environ 65, 249-254.
Mariano García, David Riaño, Emilio Chuvieco, F. Mark Dawson (2010) Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data, Remote Sensing of Environment 114, 816-830.
西田顕郎・土田 聡・三枝伸子・山本 心(2003) 衛星観測と生態モデルによる落葉樹林の季節変化の推定, 日本写真測量学会年次学術講演会, 231-232.
西田顕郎・川戸 渉・土田聡・三枝信子・岩男弘毅・村岡裕由(2004) 衛星観測による落葉樹林の季節変化の推定, 日本写真測量学会年次学術講演会, 91-92.
小熊宏之・山形与志樹(2000) リモートセンシングデータを用いた森林樹冠率の推定, 写真測量とリモートセンシング 39(2), 82-89.
小熊宏之・島崎彦人・山形与志樹(2002) 森林樹冠率の推定におけるミクセル分類手法の有効性に関する研究, 写真測量とリモートセンシング41(2), 4-14.
沖 一雄・小熊宏之(2002) リモートセンシングデータを用いた特定森林樹冠率の推定—釧路湿原におけるハンノキの推定—, 日本リモートセンシング学会誌22(5), 510-515.
蔡斌・秋山侃・魏宏(2006) 航空機レーザー計測による広葉樹林の樹高, 樹冠面積の抽出, 写真測量とリモートセンシング45(3), 4-11.
R. Nelson, T. Gobakken, E. Næsset, T. G. Gregoire, G. Ståhl, S. Holm, J. Flewelling (2012) LiDAR sampling — Using an airborne profiler to estimate forest biomass in Hedmark County, Norway, Remote Sensing of Environment 123, 563-578.
佐藤 浩・関口辰夫・織茂 郁・中島 保(2004) 現地測量の成果を用いた航空レーザー測量DTM高さ方向の精度検証,

- 写真測量とリモートセンシング43(4), 13-21.
- 瀬戸島政博, 赤松幸生, 船橋 学 (2001) 森林域での航空機レーザーキャナによる計測調査への可能性, 測量, 10月号, 21-25.
- Takahashi, T., Yamamoto, K., Senda, Y., Tsuzuku, M. (2005) Estimating individual tree heights of sugi plantations in mountainous areas using small footprint airborne LiDAR, *Journal of Forest Research* 10 (2), 135-142.
- 田村正行・高槻幸枝 (2000) 航空機レーザーキャナによる樹高計測, 写真測量とリモートセンシング39(2), 8-13.
- 蔡斌・秋山侃・小阪尚子・永井 論 (2004) 高分解能マルチスペクトル衛星画像による林分タイプの分類, 日本写真測量学会年次学術講演会発表論文集, 221-224.
- Xiao, X. Hagen, S. Zhang, Q. Keller, M. and Moore III, B. (2006) Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forest in South America with multi-temporal MODIS images, *Remote Sens. Environ* 103, 465-473.
- 全天写真解析プログラム (2009年2月27日), <http://takenakio.org/etc/canopon2/index.html>

要 旨

本研究では、広範囲の森林の情報を得るための手段として LIDAR データに着目し、ラジコンヘリによる空中写真を用いて森林管理状況が違ふ場所における LIDAR データの精度を検討することを目的とした。

ラジコンヘリを利用して研究地域における空中写真を撮影した。空中写真を幾何補正処理し、輝度値より2値化し、樹冠と樹冠の間と分類した。

この分割結果を用いて、森林管理状況が異なる地域における樹冠から反射するレーザパルスの割合と樹冠間から反射するレーザパルスの割合を計算した。

現地測量による地表面標高測量を行い、樹冠間から反射するレーザパルスと地表面との差分を計算し、LIDAR データの精度を検討した。また、樹冠間から反射するレーザパルスデータを地表面と考え、LIDAR による標高とその差分を樹高とし、研究地域における樹高マップを作成し、現地植生調査の結果と比較した。

その結果、開空度が50%以上の森林では LIDAR の標高誤差が50cm 以下であり、樹冠下の微細な地形を把握できることがわかった。LIDAR データから作成した樹高分布図によると管理により森林の低木層、中木層、亜高木層高木層など特徴が異なることを明らかにし、現地植生調査結果により検証された。

A Study of Evaluation Methods for Structure of Sub-canopy Using Radio-Control Helicopters and LIDAR Data

BORJIGIN Habula* and GOTO Shintaro*

*Graduate Student of Geo-environmental Science, Rissho University

Abstract:

In this study, we focused on the utility of Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR) which enable us to obtain information of wide area forest, for a purpose of using aerial photograph taken by radio-control helicopters to evaluate the accuracy of LIDAR data concerning the difference in forest management.

We performed geometric correction processing for the aerial photographs taken by radio-control helicopters, binarizing process for the luminosity value, and classification for canopies. Then the results were used to calculate the proportion of both laser pulse reflected by single canopy and the laser pulse reflected among canopies. Through field works, we measured the ground elevation of study area and investigated the elevation differences between laser pulse reflected among canopies and ground to evaluate the accuracy of LIDAR data. At meanwhile, laser pulse reflected among canopies was considered as ground surface, with which different value between LIDAR-derived elevations was investigated. We mapped the different value that considered as tree height, and then made comparison with field investigation results.

The forest with canopy openness greater than 50% has a LIDAR-derived elevation error less than 50cm, which enable us to understand the topography under canopy. The result of this research demonstrated according to the tree height map derived from LIDAR data, that the characteristics of understory, sub tree layer and overstory from forest vary depending on different forest management, which is calibrated by field investigation result.

Keywords: Radio-Control Helicopters, LIDAR, Aerial Photograph, Sub-Canopy, DEM