現地測量の成果を用いた航空レーザ測量 DTM の 高さ方向の精度検証

Accuracy Validation of Airborne Laser Scanning DTM Using the Ground Control Points

佐藤 浩*・関口 辰夫*・織茂 郁**・中島 保***

*Hiroshi P. SATO, Tatsuo SEKIGUCHI
Kaoru ORIMO and Tamotsu NAKAJIMA*

Abstract : Airborne laser scanning has become an established tool for generating digital terrain model (DTM). To obtain DTM in the vegetative area, laser-reflected points on the canopies should be filtered out from digital surface model (DSM). The filtering is automatically and manually performed, but it is difficult to obtain the perfect DTM, especially in the vegetative hills or mountain areas. In this study accuracy of the “DTM”, which was obtained in the winter of December 2001 and 2002, is validated with ground control points, surveyed by traversing. As a result, root mean square errors (RMSE) are about 0.15m and 0.4-0.6m in the bare flat areas and vegetative slope areas, respectively. Moreover, penetration ratio which is defined by the number of reflected points in DSM divided by the number in DTM, was examined with the RMSE. It was found that the more the penetration ratio increases, the smaller the RMSE is.

1. はじめに

最近、航空レーザ測量データを用いて地形（地表面の標高）を正確かつ詳細に把握しようとする砂防学や地形学の調査・研究が多数報告されている（例えば、秋山，2000；長谷川・岡松，2001；Sekiguchi et al., 2003；応用地形学小委員会，2003；佐藤，2004）。航空レーザ測量とは、GPS（Global Positioning System）と慣性計測装置（IMU：inertial measurement system）によって時々刻々の位置と姿勢が詳細に分かっている航空機から、地上に向けてレーザパルスを照射し、航空機と地上のレーザパルスの反射点（以下、単に反射点という）との距離を計算して、反射点の3次元位置を正確に測量する方法（Ackermann, 1999；Wehr and Lohr, 1999；Masaharu et al., 2001）で

図1 航空レーザ測量

ある（図1）。

我が国では従来から、写真測量によって大縮尺の等高線図が作成されてきた。等高線は、図化機に再現された空中写真の立体モデルにおいて、図化機の操作者が樹高の分だけ標高を差し引いた地表面をメスマークでなぞることによって図化されている。しかし、図化では操作者の熟練の度合いによる精度の違いや主観が入り込む余地があるために、地形学や砂防学の調査・研究の考察において重要な斜面の小地形や微地形（地すべりのクラックや滑落崖、崩積土の分布など）が等高線図に十分表現されているとは言い難かった（Sekigu-

* 国土地理院地理地殻活動研究センター
Geographical Survey Institute
〒305-0811 つくば市北郷1

** 国際航業(株) Kokusai Kogyo Co., LTD.

***朝日航洋(株) Aero Asahi Corporation
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 43, NO. 4, 2004

chi et al., 2003；八木ほか, 2003)。航空レーザ測量を用いると、葉と葉の間を通り抜けたレーザ光の反射点の一部は地表面に存在する可能性があるので、そのような反射点の3次元位置から作成した等高線図は、写真測量で作成した等高線図と比較して、小地形や微地形をより忠実に表現している。しかし、大部分のレーザ光は樹冠等（樹冠や幹、枝、葉、下草など）で反射されているので、我が国のように植生に覆われた地形を正確に知るには、樹冠等と地表面の両方における反射点の集まり（DSM：Digital Surface Model）から、フィルタリングにより樹冠等の反射点を排除して地表面の反射点の集まり、すなわちDTM(Digital Terrain Model)を作成することが不可欠である。以下、DTMとは、ランダムに分布する地表面の反射点の集まりを想定している。また、DTMを構成する地表面の反射点を以下、地表面反射点という。

従来の研究では、上空視界の開けた道路や裸地において反射点の標高精度を考察している（高橋, 2000；津留ほか, 2002)。しかし、地形学や砂防学が対象とするような植生が繁茂する場所において、厳密な精度管理に基づき設置された実測検証点を用いて、航空レーザ測量データから作成されたDTM(以下、航空レーザ測量DTMという)の標高の計測誤差を検証した例は、ほとんど無い。

DSMからDTMを作成するための完全なフィルタリングは、あるアルゴリズムに基づく自動処理のみならず、反射点を画像に3次元表示させて、DSMを反映していると思われる反射点を目視で取り除くような手作業処理（Raber et al., 2002）でも現実的には不可能である。すなわち、実際に生成される航空レーザ測量DTMにも樹冠等の反射点が混入していることは十分考えられる。本研究の目的は、植生が繁茂する場所において、3次元位置が現地で正確に測量されている実測検証点を正解として、フィルタリング自動処理・手作業処理を経て作成された航空レーザ測量DTMの標高精度を検証することである。

地形学や砂防学の調査・研究でよく使われるグリッドDTMは、DTMから内挿計算によって生成されるが、本研究では内挿計算に起因する誤差を考えない。そこで、本研究では内挿計算以前の地表面反射点の標高精度を検証する。

2. 研究対象地域

本研究では、図2に示すように、島根県三隅町と、東京都八王子市を研究対象地域とした。航空レーザ測量の範囲は、図3の三隅町では灰色の枠で囲んだ2 km²であり、図4の八王子市では1 km²である。どちらも丘陵地に位置し、標高はそれぞれ50～300m, 90～180 mである。植生の上層、下層は、三隅町では主に常緑広葉樹とシダ（写真1）が、八王子市では主に落葉広葉樹（写真2）、灌木・笹がそれぞれ占めており、一部、三隅町では落葉広葉樹等、八王子市では常緑針葉樹等が混在する。

図2 研究対象地域の位置

図3 研究対象地域（三隅町）
A-B断面図を図6に示す。

図4 研究対象地域（八王子市）

写真1 現地測量をした箇所の現況（三隅町）

写真2 現地測量をした箇所の現況（八王子市）

3. 航空レーザ測量データ

地表面反射点がより多く存在するように、なるべく

表1 航空レーザ測量の計測諸元

研究対象地域	三隅町	八王子市
使用機器	RAMS	RAMS
ビーム幅 (mrad)	0.3	0.3
反射点密度 (点数/m ²)	3.4	2.8
レーザパルス周波数 (Hz)	15,000	24,000
反射鏡の走査周波数 (Hz)	22.9	24
反射鏡の走査角	5°	5°
航空機の対地速度 (km/h)	204	204
対地高度 (m)	1,200	2,500
飛行コース数	11	10
コース間の重複率 (%)	55	55

図5 DTM抽出のためのフィルタリング自動処理

多くの木が落葉している冬季（三隅町：2002年12月；八王子市：2001年12月）に航空レーザ測量を実施した。表1に、航空レーザ測量の計測諸元を示す。2つの研究対象地域ともに同様の諸元で航空レーザ測量を行ったが、三隅町よりも八王子市のほうが、対地高度が高いのが大きな違いである。

DSMからDTMを得るためのフィルタリング自動処理の手順（図5）は、以下の通りである。まず、研究対象地域を1 kmグリッドのタイルエリアに分けて、1つのタイルエリアの中に50mグリッドのサーチエリアを設けた（図5の(a)）。次に、サーチエリア内のDSMを構成するレーザ反射点について、残差が最小となるような曲面を表す2次の多項式を求めた（近似面；図5の(b)）。多項式を2次にした理由は、地形を本来の姿で抽出するには、1次では現地の尾根と谷の起伏が表現されずに反射点を余計に除去するおそれがあることと、3次以上では本来なら除去すべき反射点にも曲面がフィットしてしまうおそれがあること、2次を採用することが経験的に良いことが判っているためである。

さらに、近似面から上方向と下方向にしきい値を設けて、しきい値より大きいレーザ反射点を削除した（図5の(c)）。タイル全域を面的にカバーするようにサーチ

図6 研究対象地域のDSMとDTMの縦断面図
A-B断面図の位置は図3を参照

エリアを移動させて処理を終了し、サーチエリアを20 m, 18mと小さくさせながら同様の処理を行った。以上を、全てのタイルエリアで繰り返した。その後、手作業処理でレーザ反射点をDSMから取り除くことによって、DTMを得た。現地調査でも、以上の自動フィルタリング処理と手作業処理を経て作成した等高線図は、従来の都市計画図と比較して現地の微地形を良く表現していることを確認している (Sekiguchi et al., 2003)。図6の断面図に、三隅町のDSM及びDSMから抽出した航空レーザ測量DTMの例を示す。断面図の位置は、図3のA-Bである。図6において、DSM上の特異点(平面距離500~600mの区間内)は、送電線の鉄塔を示している。

航空レーザ測量DTM自体の計測精度を知るために、八王子市においては、上空視界が完全に開けて、平面とみなせる小学校の校庭(図4のA地点)において、後述の3級水準測量で計測した標高とその周囲1,200m², 2,575点の反射点の標高との較差を調べた。反射点の平均標高90.420mに対して3級水準測量の標高値は90.495mだったので、較差は-0.075mだった。校庭は排水のため南北方向に一樣に、極めて緩やかに傾斜した平面だった。そこで、反射点の標高を、3級水準測量の標高値を通るような平面の式で近似したとき、残差(反射点の標高と近似式の標高の差)の二乗和を2,575点で割った値の平方根は、0.14mであった。三隅町においては、研究対象地域に適当な平面が無かったため、十分なサンプル数をもって、航空レーザ測量DTM自体の計測精度を知ることはできなかった。以下、本研究の航空レーザ測量DTM自体

には0.14mの計測誤差が含まれていると考える。

4. 現地測量による実測検証点の設置

4.1 実測検証点の設置方法

現地測量による実測検証点の設置には、キネマティックGPS測量のような方法を用いるのが効率的である。しかし、2つの研究対象地域ともに植生が上空を遮蔽していることから、トータルステーションを使った4級多角測量で実測検証点を設置した。図3、図4に示した黒の太線が多角路線である。

三隅町においては、多角点間の視通を確保するため、本研究の目的を妨げない程度に草木を伐採した。また、両地域において、数多くの実測検証点を得るために、多角点からミラーポールを使って放射単点測量を行った。設置した実測検証点は、三隅町で500点以上、八王子市で200点以上だった。

4.2 精度管理

多角測量の精度管理のため、路線の両端には3次元位置を正確に測量した既知点を設置して、終点における多角測量の閉合差を確認した。

まず、上空視界が確保できる場所を既知点として選び、正確に測量して既知点の3次元位置を求めた。既知点とは、三隅町の場合はG-2, G-3, G-4(図3)であり、八王子市の場合はG-301, G-302(図4)である。いずれの既知点の3次元位置も、平面位置については最寄りの電子基準点3点を与点としたGPSによる2級基準点測量により決定し、標高については、最

表2 既知点の設置に関わる精度管理の結果

既知点	水平位置 (m)		標高 (mm)	
	標準偏差	制限値*	較差	制限値*
G-2 (三隅町)	0.008	0.1	5	7
G-3 (三隅町)	0.008	0.1	5	10
G-4 (三隅町)	0.009	0.1	1	10
G-301 (八王子市)	0.018	0.1	6	10
G-302 (八王子市)	0.010	0.1	1	8

*) 制限値は作業規程（国土交通省，2001）に基づく。

寄りの一等水準点を与点とした3級水準測量により決定した。これらの測量を，作業規程（国土交通省，2001）が定める方法や精度に準拠して行った（表2）。すなわち，平面位置については，基線解析で算出した基線ベクトル，分散・共分散を用いて実用網平均計算を行い，網平均計算から得られる平面位置の標準偏差が作業規程に定める制限値を超えていないこと，そして，標高については，往復観測の較差が制限値を超えていないことをそれぞれ確認した。

4級多角測量で得られる実測検証点の3次元位置は，航空レーザ測量DTMの精度検証に利用することから，航空レーザ測量の計測精度（標高で10cmオーダー（Ackermann, 1999））よりも，位置精度が高いことが要求される。そこで，作業規程が定める制限値の半分，すなわち倍角差30″，観測差20″，高度定数の較差30″，距離の較差1cmとし，正確に測量するよう努めた。

多角測量の諸元を表3に示す。多角測量の路線数は，三隅町では図3のG-2，G-3間とG-3，G-4間の2本，八王子市では図4のG-301，G-302間の1本と，この路線の途中の多角点から位置を取り付けて途中の別の多角点に結合したもう1本（2次路線）の計2本である。路線ごとに，多角測量の平面位置と標高の閉合差を算出し（表3），作業規程が定める制限値をおおむ

ね超えていないことを確認した。

4.3 多角点の3次元位置の決定

路線両端に既知点を設置して，一方の既知点から他方の既知点へ向けて多角測量を行ったとき，多角路線の終点と他方の既知点には閉合差が生じた（表3）。この閉合差を，中村・清水（2000）のコンパス法則（閉合差を各多角点間の距離の長さに比例して配分する方法）により各多角点に配分することで，多角点の平面位置を決めた。標高についても，路線長に対する多角点の辺長に応じて閉合差を配分して多角点の標高を決めた。なお，多角点から放射単点測量で得られる放射単点の3次元については誤差配分を考慮していない。

航空レーザ測量データの水平位置精度，標高精度を考慮しても，本研究で得られた実測検証点の位置精度は，平面位置，標高ともにおおむね1cmオーダー程度と考えることができるので，本研究の目的に合致していると考えることができる。路線G-2～G-3の閉合差が他の路線の閉合差と比較して平面位置，標高ともに大きいのは，下層の植生が密に繁茂して視通の確保が困難だったため多角測量の辺数が多かったこと，そして三脚を立てる足場が山道のぬかるみのため正確な測量のためには現地の状況が劣悪だったことが影響している。しかし，本研究の目的を考えて，あえてこのような路線を選んだ。

5. 航空レーザ測量DTMの精度検証

5.1 検証の方法

本来であれば，実測検証点の平面位置を地表面反射点の平面位置と一致させてから両者の標高を比較すればよいが，それらを一致させることは，実際には難しい。そこで，実測検証点のなるべく近傍の地表面反射

表3 多角測量の諸元

研究対象地域	三隅町		八王子市	
	G-2～G-3	G-3～G-4	G-301～G-302	2次路線
路線				
路線長 (m)	924	1,031	821	359
路線当たり多角点数 (個)	27	18	20	11
平面位置の閉合差 (m)	0.37 [0.39]*	0.03 [0.37]	0.03 [0.51]	0.02 [0.26]
標高の閉合差 (m)	-0.03 [0.03]	-0.02 [0.03]	-0.001 [0.03]	-0.002 [0.03]

*) [] 内は制限値。作業規程（国土交通省，2001）に基づく。

点の標高を検証しようとして、実測検証点からなるべく小さい半径の円を設定した。この円内に地表面反射点が存在しない実測検証点については、検証の対象外とした。円内にレーザ反射点が複数あるときは、算術平均から得られた地表面反射点の標高と実測検証点の標高の較差を調べた。

5.1.1 実測検証点が平坦地にある場合

地表面反射点の平均的な点密度（密な場所であれば1点/m²程度）を考慮して、実測検証点の標高と、実測検証点から半径1mの円内にある地表面反射点（図7）の標高の較差（すなわち、反射点の標高から実測検証点の標高を引いたときの差）を調べた。以下、この較差を単に標高較差という。

5.1.2 実測検証点が傾斜地にある場合

実測検証点が傾斜地にある場合、地表面反射点の平面位置の計測誤差は、その場所の傾斜が急であるほど、標高の計測誤差により大きな影響を与える。また、航空レーザ測量システムにおける航空機の位置と姿勢の精度はそれぞれ、10cmと0.02°よりは良い（Wehr and Lohr, 1999）と考えられるが、もし、両者がともに反射点の平面位置精度に影響を与えていると仮定すれば、誤差伝播を考えて、対地高度1,200mの三隅町の反射点は平面位置で最大42cm、対地高度2,500mの八王子市では最大87cmの誤差を有していると考えられる。すなわち、対地高度が高いほど平面位置の誤差はより大きくなる（津留ほか, 2002）。しかし、本研究では、平面位置の計測誤差を正確に見積もることは困難である。

ここでは、地表面反射点の平面位置は正しいと仮定して、傾斜地における反射点の標高精度を検証しようとした（図7）。つまり、注目する実測検証点が傾斜20°以下の傾斜地にあるとき、中心と円周の比高は、航空レーザ測量による標高の計測誤差10cm程度の範囲内に収まると考えて、実測検証点から半径30cmの円内

図7 実測検証点の標高に対比させる地表面反射点の範囲

にある地表面反射点について標高較差を調べた。

5.2 検証の結果

植生のみられない地域であれば植生の樹冠等の反射点がDTMに混在する可能性は皆無であり、植生が密に生えた地域であれば樹冠等の反射点がDTMに混在する可能性は高い。そこで、土地被覆が地表面反射点の標高精度を左右すると考えた。土地被覆とは、空中写真で判読できるような植生の上層を反映した概念であり、例えば三隅町の場合、「常緑広葉樹」という土地被覆の下層にはシダが繁茂し、八王子市の場合、「落葉広葉樹」という土地被覆の下層には笹が繁茂していることを意味している。実際には、現地測量のときに、実測検証点における土地被覆を認定した。

本研究では、実測検証点の点数とともに、土地被覆に応じた平坦地と傾斜地において標高較差の平均二乗誤差（Root mean square error: RMSE）を整理した。その結果を、三隅町については表4と図8に、八王子市については表5と図9にそれぞれ示す。前述したフィルタリングで地表面反射点の点密度は疎らになったため、本研究の検証方法を適用すると、最終的に利用できた実測検証点の数は少ない（表4, 5）。図10, 11に、三隅町と八王子市において最終的に利用した実

表4 実測検証点の点数（三隅町）

土地被覆	平坦地(個)	傾斜地(個)
1. 常緑広葉樹	0	2
2. 落葉広葉樹	1	6
3. 常緑針葉樹	2	1
4. 草地	4	3
5. 道路または裸地	11	6

図8 DTMと実測検証点の標高の較差（三隅町）

表5 実測検証点の点数（八王子市）

土地被覆	平坦地(個)	傾斜地(個)
1. 落葉広葉樹	1	1
2. 灌木と笹	7	14
3. 草地	27	2

図9 DTM と実測検証点の標高の較差（八王子市）

図10 最終的に利用した実測検証点と土地被覆（三隅町）

図11 最終的に利用した実測検証点と土地被覆（三隅町）

測検証点とその土地被覆を示す。航空レーザ測量DTMの標高精度を土地被覆ごとに一般化するのは困難なため、実測検証点が6個以上の場合について考察する。

6. 考察

6.1 三隅町の場合

図8のRMSEにおいて、実測検証点の数が6個以上なのは傾斜地の落葉広葉樹と、平坦地と傾斜地の道路・裸地だった。このうち、航空レーザ測量DTM自体の計測精度0.14mをやや上回っているのは、平坦地と傾斜地の道路・裸地である。航空レーザ測量DTM自体の計測精度を参照すると、これらの土地被覆が航空レーザ測量DTMの標高精度に影響を与えることは無いと考えた。航空レーザ測量DTM自体の計測精度0.14mを大きく上回っているのは、傾斜地の落葉広葉樹だった。以下、図8において、これらの土地被覆とRMSEの関係を考察する。

まず、道路・裸地のRMSEが平坦地、傾斜地ともに0.15mだったことから、上空視界が開けていれば、平坦地と傾斜地（すなわち本研究では傾斜20°以下）の違いが航空レーザ測量DTMの標高精度を低下させることは無いことを確認した。

傾斜地の落葉広葉樹のRMSEは約0.4mだった。これを傾斜地の道路・裸地と比較すると、下層の植生などの反射点が混在することによって、航空レーザ測量DTMの標高精度が低下したと考えることができる。

6.2 八王子市の場合

図9のRMSEにおいて、実測検証点の数が6個以上なのは、平坦地と傾斜地の灌木・笹と、平坦地の草地である。これらはすべて、航空レーザ測量DTM自体の計測精度0.14mを上回った。これらの土地被覆では、三隅町の場合と同様に、それぞれの植生の樹冠等における反射点の混在が、航空レーザ測量DTMの標高精度を低下させたと考えられる。

図9の灌木・笹では、平坦地よりも傾斜地のほうがRMSEは高く、平坦地よりも傾斜地のほうが、自動処理フィルタリングのみならず地表面を推定しながら行う手作業フィルタリングが困難だったことを示唆している。また、平坦地で比較すると、草地より灌木・笹のほうがRMSEは2倍程度高い。このことは、笹のよ

うに地表面を密に被覆している植生の場合、地表面がどこにあるか判断が困難なため、地表面を推定しながら行う手作業フィルタリングがより困難だったためと推定される。

6.3 反射点の透過率

Cowen et al. (2000) は、17ヶ所の現地で計測した緑被率とレーザ光の透過率を調べ、緑被率が高くなるほど透過率も低くなることを明らかにしている。そこで、レーザ光が樹冠等を透過してなるべく多く地表面に達しているほど、本研究で考察している DTM の標高の計測誤差は、より小さくなっていることが期待される。

本研究では、土地被覆ごとに平坦地と傾斜地の透過率を調べた。ここで透過率とは、実測検証点を中心に半径 1 m の円内について、土地被覆ごとの DTM の総点数/DSM の総点数×100 (%) を意味する。透過率が高いほど、レーザ光が透過したことを示す。三隅町と八王子市の結果をそれぞれ表 6、7 に示した。

図 8、9 と表 6、7 に基づいて、RMSE と透過率の関係を図12 (三隅町)、図13 (八王子市) にそれぞれ示した。その結果、RMSE と透過率に線形の相関を見出すのは難しかった。しかし、例えば、三隅町の傾斜地の落葉広葉樹では透過率が20%程度で RMSE が約 0.4m、平坦地と傾斜地の道路・裸地は透過率が60%以上で RMSE は約0.15m だったことを考えると、透過率が60%以下なら RMSE が0.15m よりも大きく、植生の樹冠等の反射点が DTM に混在していることが判った。

八王子市の灌木・笹の透過率は、平坦地、傾斜地と

図12 反射点の透過率と RMSE の関係 (三隅町)

図13 反射点の透過率と RMSE の関係 (八王子市)

もに約28%だった。このとき、RMSE は平坦地よりも傾斜地のほうが大きかった。このことから、灌木・笹では、たとえ透過率が同程度であったとしても、平坦地よりも傾斜地ではフィルタリングが困難であったと考えることができる。

7. 結 論

現地測量による実測検証点を使った精度検証は普通、現地測量の作業の効率を考えると裸地で行う。本研究においても、上空視界が開けた道路・裸地では、平坦地、傾斜地に関わらず航空レーザ測量 DTM の標高精度は0.15m と評価された。

日本のような湿潤な気候にある地域における砂防学や地形学的な調査・研究では、植生の繁茂した土地の DTM を扱わざるをえないので、実際にこのような土地における航空レーザ測量 DTM には、どの程度の標高精度があるかを調べた。航空レーザ測量 DTM は、地形を微細に表現する有用なツールであるが、たとえば土地被覆が落葉広葉樹や灌木と笹では、道路・裸地

表 6 土地被覆と反射点の透過率 (三隅町)

土地被覆	平坦地 (%)	傾斜地 (%)
1. 常緑広葉樹	—	11.6
2. 落葉広葉樹	100.0	20.4
3. 常緑針葉樹	15.4	13.9
4. 草地	75.0	59.1
5. 道路または裸地	84.0	68.1

表 7 土地被覆と反射点の透過率 (八王子市)

土地被覆	平坦地 (%)	傾斜地 (%)
1. 落葉広葉樹	60.0	50.0
2. 灌木と笹	28.0	28.2
3. 草地	41.1	33.3

よりも DTM の RMSE が大きいとともに、その傾向は傾斜地ほど大きいことが分かった。

土地が植生に被覆されて透過率が低い斜面では、落葉期に航空レーザ測量を実施しても、航空レーザ測量 DTM の標高には、0.4~0.6m 程度の誤差が含まれている可能性があることを含みながら、これを利用する必要がある。

謝 辞

本研究にあたって、多角測量の視通確保のための植生伐採にご協力いただいた三隅町の関係者と、本稿を作成するにあたってアドバイスをいただいた国土地理院地理情報解析研究室の小白井亮一室長、神谷 泉主任研究官、長谷川裕之主任研究官に感謝します。なお、本研究は、文部科学省科学技術振興調整費「地震豪雨時の高速長距離土砂流動現象の解明」の研究費の一部等を用いて行われたものである。

(受付日2003.12.15, 受理日2004.7.9)

参考文献

- 秋山幸秀, 2000. 空中レーザ計測システムの治山・砂防関係への応用, 写真測量とリモートセンシング, 39(2), pp.25-28.
- 応用地形学研究小委員会, 2003. 応用地形フォーラム (5), 応用地質, 44, pp.249-256.
- 国土交通省, 2001. 公共測量作業規程, 日本測量協会, 東京, 380pp.
- 佐藤 浩, 2004. 火山活動終了後の雲仙普賢岳・溶岩ドーム周辺の地形変化, 地形, 40, pp.1-22.
- 高橋博将, 2000. 航空レーザ測量における標高精度の検証, APA, 77(9), pp.66-74.
- 都留宏介, 中島 保, 藤原輝芳, 2002. 航空レーザ測量の品質評価, 写真とリモートセンシング, 41(1), pp.21-27.
- 中村英夫, 清水英範, 2000. 測量学, 技術堂出版, 東京, pp.200-201.
- 長谷川裕之, 岡松香寿枝, 2001. 高密度地形データを用いた地すべり地の地形抽出と特徴把握, 日本写真測量学会平成13年度秋季学術講演会論文集, pp.189-192.
- 八木浩司, 檜垣大助, 吉松弘行, 相楽 渉, 高木洋一, 2003. 空中レーザ高精度地形図地すべり・微地形判読への応用, 地すべり, 39(4), pp.35-41.
- Ackermann, F., 1999. Airborne laser scanning—present status and future expectations, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp.64-67.
- Cowen, D.J., Jensen, J.R., Hendrix, C., Hodgson, M. E., and Schill, S.R., 2000. A GIS-assisted rail construction econometric model that incorporates LIDAR data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 66, pp.1323-1328.
- Masaharu, H., Hasegawa, H., and Ohtsubo, K., 2001. Three-dimensional city modeling from airborne laser scanning, Proceedings of the 20th International Cartographic Conference, International Cartographic Association, 2, pp.1337-1343.
- Raber, G.T., Jensen, J.R., Schill, S.R., and Schuckman, K., 2002. Creation of digital terrain models using an adaptive lidar vegetation point removal process. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68, pp.1307-1315.
- Sekiguchi, T, Sato, H.P., Ichikawa, S., and Kojiroi, R., 2003. Mapping of micro topography on hill slopes using airborne laser scanning, Bulletin of Geographical Survey Institute, 49, pp.47-57.
- Wehr, A., and Lohr, U., 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp.68-82.