

3次元ライダー計測による地形と構造物の高精度の空間情報化について

大政 謙次

細井 文樹

1. はじめに

1960年代の始めに米国やカナダなどで始まった地理情報システム (GIS: Geographic Information System) は、我が国でも1970年代以降、国や地方公共団体を中心に、国土数値情報の整備や公開、都市計画GISの開発、デジタルマッピングの規格策定などが進み、広く利用されるようになった。そして、1990年代半ば以降のパーソナルコンピュータとインターネットに代表される通信技術の発達で、GISの個人ユーザへの普及を促した。最近では、Google Map/Earthの公開により、世界の衛星写真や地図のデータをWeb GISとして、身近に利用できるようになり、また、GPS受信機能をもつ携帯電話やカーナビゲーションの普及により、GISが日常生活で欠かすことのできないものになってきている。そして、扱う情報も、2次元 (2D) の地図情報から、3次元 (3D) の空間情報へと推移してきている。

代表的な3次元空間情報としては数値地図の標高データ (DEM: Digital Elevation Model) があるが、最近では人工衛星や航空機から撮影されたステレオ画像を解析することによるDEMの作成も進んでいる。また、市販のデジタルカメラにより撮影されたステレオ画像から様々な対象の3Dモデルを作成することも可能になってきている。

しかしながら、ステレオ画像の解析による3D化は、受動的な計測データを用いるために、天候や被写体の状態 (明るさやテクスチャー、形状など) により精度が大きく影響を受け、高精度3Dモデルの作成には問題が残

る。このため、最近では、レーザーやマイクロ波を利用した能動的な計測による方法の開発も活発に行われている。

ここでは、地形や河川、構造物などの高精度3Dモデルの作成に有用で、実用レベルにある3Dライダー (LIDAR: Light Detection And Ranging) 計測による空間情報化について紹介する。なお、レーザーによる距離計測用の3Dライダーは、レーザープロファイラーやレーザースカナー、3Dスカナー、レンジスカナー、イメージングライダーなどと呼ばれることもある。

2. 航空機からの3Dライダー計測

航空機ライダーによる計測は、1980年代頃から陸域の地形図作成の分野に応用され始めた。この頃使用されていたライダーシステムは、飛行方向に沿って航跡上のみを計測していく、非常にスキャン間隔が疎なものであった。このため、1990年代の中頃になると、飛行方向に直角に、パルスレーザーをスキャン照射し、地形や樹高を計測する3Dライダーが開発され、使用され始めた。

しかし、スキャン間隔が粗く、地上でのビーム径 (Footprint) が1m以下になると、凹凸のある地表面や樹冠の正確な計測が難しかった。しかし、最近では、数十cm以下の小さなビーム径でも、ビーム径に比べてスキャン間隔を細かくし、地表の観測面を漏れなくスキャンできるような、100KHz/秒のパルス照射能力を持ち、低空低速で飛行できるヘリコプター搭載型のものも運用されている (表-1)。

(表-1) 航空機搭載型および地上型の高性能3Dライダーの性能例

スカナー	航空機搭載型	地上型	地上型
	(2D スキャン+飛行方向)	(3D スキャン)	(3D スキャン)
計測方式	Time-of-flight	Time-of-flight	光プローブ
計測速度 (点/秒)	25,000 ~ 100,000	8,000 ~ 12,000	1,600
ラインスキャン速度 (スキャン/秒)	25 ~ 100	1 ~ 20	0.35 ~ 1.1
計測距離範囲 (m)	80 ~ 3,500	2 ~ 1,000	3.5 ~ 10
距離精度 (mm)	5 ~ 20	5 ~ 10	0.5 ~ 5
グローバル座標系の絶対位置精度 (cm)	20 ~ 50 (GPS+IMU)	< 5 (RTK-GPS)	< 5 (RTK-GPS)

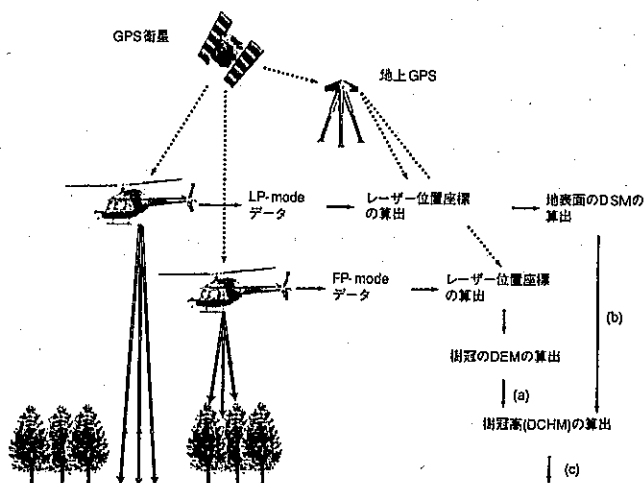
(図-1)は、ヘリコプター搭載型の高精度3Dライダーによる樹木が繁茂した地表面と樹冠の計測の概念図である。このシステムでは、地表面に向かって、進行方向に対して直角方向にパルスレーザーを漏れなくスキャン照射し、地表面や樹木から帰ってくる反射パルスの飛行時間 (Time-of-flight) を計測することにより、地表面との距離を算出する。その際、樹冠の計測はレーザー光が反射して最初に戻ってくるパルスを受信するモード (FP-mode : First pulse mode) により、また、地表面の計測はレーザー光が反射して最後に戻ってくるパルスを受信するモード (LP-mode : Last pulse mode) により行う。そして、あらかじめ地上のGPS (Global Positioning System) により正確に計測された基準位置 (三角点に設置) と、ヘリコプターに搭載されている航空機GPSや機体の位置や姿勢をGPSと結合して正確に計測するIMU (Inertial Measurement Unit) のデータ、さらに、レーザーのスキャン角 (照射角度) 及び計測された距離のデータなどから、地上のレーザー反射位置の正確な3次元座標を算出し、標高を示すメッシュデータ (DEM) を得る (図-1の流れ図を参照)。なお、このシステムの距離計測の誤差は15cm以内である。また、このシステムにより求められる絶対座標の誤差は、20~50cm程度であるが、基準点からの相対座標での誤差のみと、距離計測の精度である15cm以内である。

(図-2)と(図-3)は、谷間の地域の航空写真とこの地域のFP-mode DEMの鳥瞰図の例である。航空写真では、縦軸が基準位置からの偏北距離 (上方が北)、横軸が偏東距離である。下方の道路の北側に隣接して庭園があり、この庭園内には、小川が流れ、針葉樹や広葉樹の高低木110余種が植栽されていた。また、庭園の右上方に隣接した山の斜面には、麓から頂上に向かって、

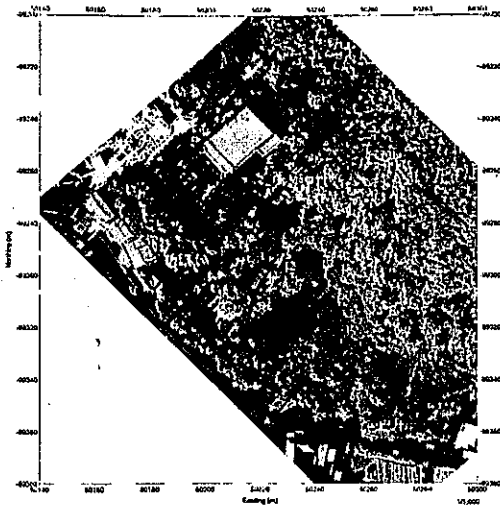
アオキイロハモミジ群落、コナラ群落、オオバーヤシヤブシ群落が広がっていた。また、庭園の左上方には建物が散在し、宅地造成中の土地があった。道路の南側には家屋や農地がみられた。FP-modeは、レーザー光が反射して最初に戻ってくるパルスを受信するモードであるので、このモードにより得られた標高メッシュデータ (FP-mode DEM) (図-1 (a) 参照) は、樹木がないところでは地面や家屋の上部の標高を示すが、樹木が生育している場所では、その位置で最も高い樹冠の標高を与える。

一方、LP-modeは、レーザー光が反射して最後に戻ってくるパルスを受信するモードであるので、樹間を通して地表面までパルス光が到達する確率がFP-modeの場合よりも大きく、地表面までパルスが到達した場所では、地表面の標高を与える。このため、このモードにより得られるデータにおいて、周辺に比べて標高が特に低い場所を抽出し、補間処理をすることにより、地表面の形状 (地形、建物を含む) を示す標高メッシュデータ (DSM : Digital Surface Model) (図-1 (b) 参照) を得ることができる。

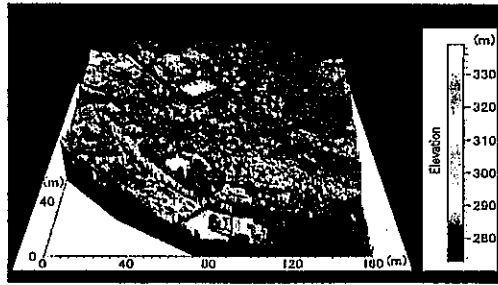
(図-4)はLP-mode DEMから推定されたDSM (建物を含む) を鳥瞰図として示したものである。右上の山の斜面が高く、また、左上から右下に向かって、標高が低くなっていることがわかる。対象地域の地形図や地上調査の結果から判断して、密生した樹木に覆われていた地域であるにもかかわらず、その下にある地表面の形状や傾斜が正確に再現されていた。また、建物、道路、小川なども細部にわたって現況と一致していた。経験では、20%程度の地表面がLP-modeで計測できれば、正確な地表面の再現が可能であることが知られている。



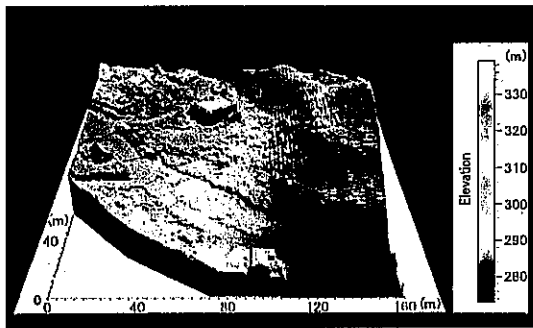
(図-1) ヘリコプター搭載の高精度3Dライダーによる樹木が繁茂した地表面と樹冠の計測の概念図¹⁾



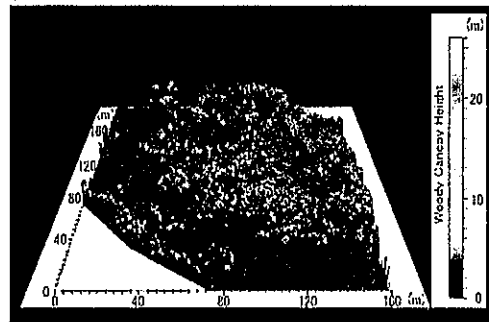
(図一 2) 谷間の地域の航空写真¹⁾



(図一 3) 図 2 の地域のFP-mode DEM¹⁾



(図一 4) 図 2 の地域のDSM¹⁾



(図一 5) 図 2 の地域の樹冠高 (DCHM)¹⁾

(図一 5) はFP-mode DEMからDSMを引くことによって求められた樹冠高のメッシュデータ (DCHM: Digital Canopy Height Model) (図一 (c) 参照) の鳥瞰図である。山や谷、建物などの部分が除かれ、平地に樹木が生育しているように表示されている。この鳥瞰図から、樹冠の形や樹木の高さがわかる。個々の樹木において、針葉樹で47cm、広葉樹で40cmの誤差内での計測が可能であった。また、RMSEでみると、針葉樹で19cm、広葉樹で12cm程度の誤差であった。

上記のように、航空機搭載3Dライダーでは、広いエリアを対象とした3D計測が可能であり、通常の測量では困難な樹冠や樹林下の地表面の正確な計測が可能となる。また、地上GPSにより正確に計測された基準位置と、ヘリコプターに搭載されているIMUのデータにより、数十cmの精度で、グローバル座標系の絶対位置に対応づけることが可能となる。こうした航空機搭載型3Dライダーの特徴を生かすことで、農地やそれに隣接する林地も含めた広範囲の地形や構造物、樹冠高の測量を効率よ

く行うことができ、正確な3Dモデル化が可能となる。なお、樹林地などで、密生した下層植生がある場合は計測の誤差要因になり、また、細かい地形の凹凸などは検知できない場合がある。

3. 地上での3Dライダー計測

地上で使用する地上型 (可搬型) の3Dライダーは、航空機からのそれに比べて、より高い空間分解能を有し、計測地点まで自由に持ち運べる利点がある。しかし、距離計測の範囲と精度は装置によって異なるので目的に応じて選択する必要がある。一般に、Time-of-flight方式の装置は、長い距離の計測に適しており、距離精度も距離に依存しないという特徴がある。しかし、10m以下の近距離の計測では、光プローブ法などの三角測量の原理に基づく装置に比べて距離精度が悪くなる。例えば、Time-of-flight方式の可搬型3Dライダーとして、80%反射率の自然物ターゲットで1000mの距離まで5~10mm

の距離精度で、また、20%反射率でも350mまで同様の精度で計測できるものが市販されている。一方、光プロブ方式では、10mで5mm、3.5mで0.5mmの距離精度のものがある(表-1)。

さらに、RTK-GPS (Real Time Kinematic GPS) を併用することにより、可搬型3Dライダーで得られた対象の3Dデータを誤差数cm以内でグローバル座標系の絶対位置に対応づけることが可能となる(図-6)。

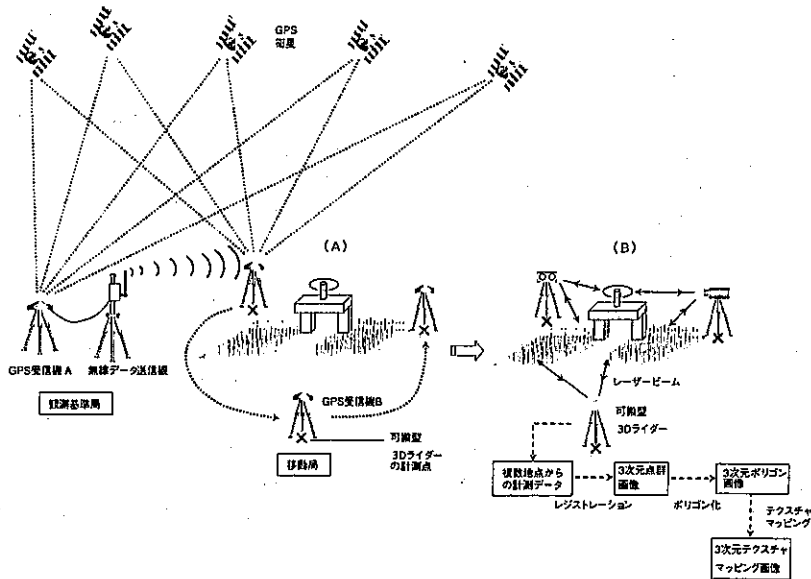
RTK-GPSの主な構成要素は、既知位置に設置した観測基準局 (GPS受信機A)、無線データ送信機および移動局 (GPS受信機B) である。基準局の受信機では、常時GPS衛星からの電波を受信し、搬送位相波の積算値データを計測する。その後、これらのデータを含む測位用データを移動局側に伝送する。移動局側でも同時に搬送位相波を計測し、基準局から伝送されてきたデータとともに使用して、可搬型3Dライダーで計測を行う地点の絶対位置を計測する(図-6 (A))。この図の場合は、GPS受信機Bを3カ所に移動し、ライダーを設置する3カ所の絶対位置を決めている。なお、RTK-GPS方式の代わりに、受信機が1台ですむ、全国の電子基準点(固定基準局)のデータを用いた仮想基準点方式(VRS-GPS: Virtual Reference Station GPS)を利用してよい。

(図-6 (B))は、可搬型3Dライダーによる計測法の概要を示す。計測に際しては、対象物に対して地上の複数地点からデータ取得を行う。そして、それぞれのデ

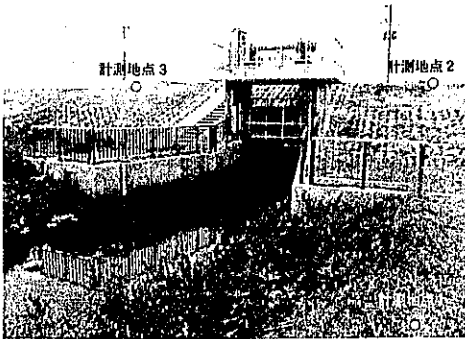
ータの座標系を一致させるため、位置あわせ(レジストレーション)を行う。こうして得られたデータは対象全体の3次元点群画像であり、ここから対象の各部分の形状や寸法、距離を自由に算出することができる。さらに、得られた点群画像の各点を三角形のポリゴンでメッシュ化することで、3次元ポリゴン画像を作成することができる。このポリゴン化によって、対象を点で表現する点群画像から、対象を面で表現するサーフェス画像への変換がなされ、対象の面積や体積といった量も算出できるようになり、また、カラー写真との3次元合成(テクスチャマッピング)も可能になる。

(図-7)の写真に示すような農業用排水樋門の計測例を(図-8)に示す。(図-7)に示される3箇所の計測地点から可搬型3Dライダーによる計測を行った。各計測地点から得られた点群データをレジストレーションし、ポリゴン化を行った結果が(図-8 A、B)である。方向によらず細部にわたって現況が再現されることがわかる。こうして得られた3次元現況画像は建設された施設の構造確認や維持管理、補修、更新などの際に活用できるものと考えられる。

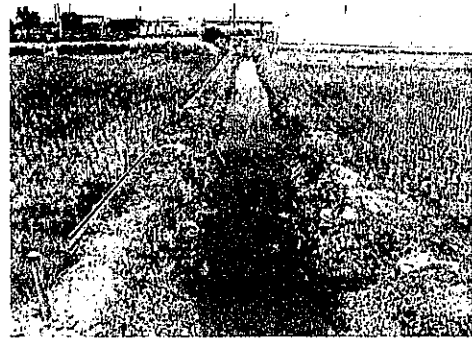
ポリゴン化された3Dモデルには、形状以外にも対象表面の模様や色(テクスチャー)の情報を付与するテクスチャマッピングという手法が適用できる。計測の際に対象のデジタルカラー写真を撮影し、それをコンピュータ上でポリゴン画像にマッピングする。(図-10)は(図-9)の農業用水路のカラー写真をポリゴン画像に



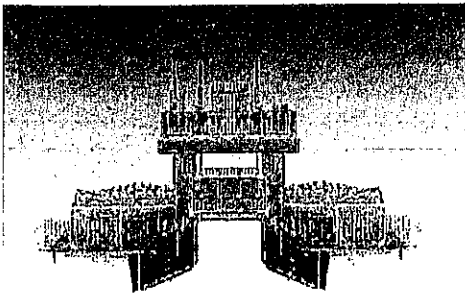
(図-6) RTK-GPSを併用した可搬型3Dライダーによる計測
 A: RTK-GPSによる可搬型3Dライダー設置地点の絶対位置の計測
 B: 絶対位置の明らかになった地点からの可搬型3Dライダーによる計測



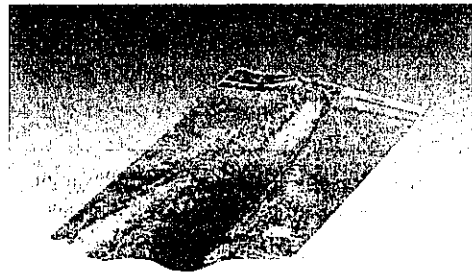
(図一 7) 排水樋門の写真



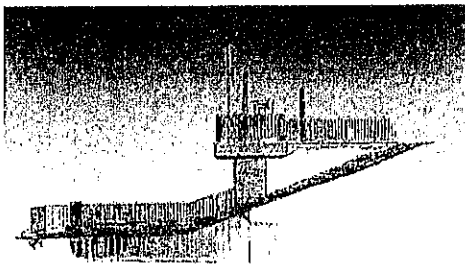
(図一 9) 農業用水路の写真



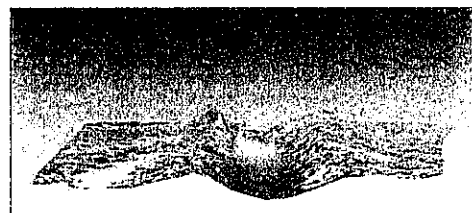
(図一 8 A) 図一 7 の排水樋門の 3 次元ポリゴン
画像：正面



(図一 10 A) 図一 9 の農業用水路のテクスチャマ
ッピング画像：上面



(図一 8 B) 図一 7 の排水樋門の 3 次元ポリゴン
画像：側面



(図一 10 B) 図一 9 の農業用水路のテクスチャマ
ッピング画像：正面

マッピングして得られたテクスチャマッピング画像の例である。コンクリート補修のなされていない小規模用水路は複雑な形状を有するが、この様な複雑な形状の対象であっても、その3D形状と断面がカラー情報とともに再現されていることがわかる(図一10A、B)。こうしたテクスチャーを伴う3次元画像は施設の現況把握以外に、コンピューターグラフィックスの技術と併せて、景観設計にも利用できる。

4. おわりに

ここでは、樹木が繁茂する谷間の地形や排水樋門、農業用水路などを例に、航空機搭載型及び可搬型3Dライダー計測による空間情報化の有用性について紹介した。今後、地形や水路、構造物などの精密3D GIS構築と併せて、農業農村工学分野での施設整備や防災、計画分野などでの利活用が期待される。

参考文献

- 1) 大政謙次・秋山幸秀・石神靖弘・吉見健司 (2000) ヘリコプター搭載の高空間分解能Scanning Lidar システムによる樹冠高の3次元リモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌, 20:34-46.
- 2) 航空レーザ測量WG (編) (2004) 図解-航空レーザ測量ハンドブック, 日本測量調査技術協会.
- 3) 村井俊治 (編) (2005) 測量工学ハンドブック, 朝倉書店
- 4) 大政謙次 (編) (2006) 農業・環境分野における先端的画像情報利用, 農業電化協会
- 5) 尾上守夫・羽倉弘之・池内克史 (編) (2006) : 3次元映像ハンドブック, 朝倉書店
- 6) 測位・地理情報システム等推進会議 (2006-2007) 「GISアクションプログラム2002-2005」に関するフォローアップ報告, GIS アクションプログラム 2010.
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/sokuitiri/index.html>
- 7) K. Omasa, F. Hosoi and A. Konishi (2007) 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. J. Exp. Bot. 58:881-898