

航空レーザ測量入門

平成 16 年 3 月

国土地理院
地理地殻活動研究センター
地理情報解析研究室

はじめに

最近の測量技術の進展には著しいものがある。新しい測量技術を使いこなしていくためには、その概要的な知識だけではなく、計測の幾何学やデータの処理方法などについてある程度の理解が必要となる。

航空レーザ測量は1990年代後半に実用化された新しい測量技術である。この技術により、地表面の形状が詳細に計測されるようになり、現在ではこの成果は、測量だけではなく、土木工学、防災、環境保全など幅広い分野で利活用されつつある。

地理情報解析研究室では、航空レーザ測量が実用化され始めた頃より、この技術に関わる研究開発を実施してきた。特に、平成12～14年度に総合技術開発プロジェクト(総プロ)「先端技術を活用した国土管理技術の開発」の一環として実施された「スキャン式レーザ測距儀による斜面計測・解析技術の開発」では、航空レーザ測量を使った詳細な地形形状の把握を目的に、その計測とデータ処理が行われた。最終年度には、これらの成果とともに、この技術に関する基礎知識や、実際に活用する際に必要となる知見などを取りまとめた。

この技術資料は、上記総プロなどの研究成果に基づいて、航空レーザ測量に関する、基礎知識、基本原理、活用(測量計画機関が発注するなど)に際しての知見、具体的な成果事例などをできるだけ分かりやすく記述したものである。本資料が、これから航空レーザ測量を活用しようとする者、あるいは理解しようとしている者にとって、有益なものとなることを心より願っている。なお、本資料については、作成の経緯や性格上、内容によっては当研究室が実施した数件の事例に基づいた記述、すなわち一概に一般化することが難しいと考えられるものも含まれている。活用に際しては、この点に十分留意していただきたい。

この技術資料の作成は、当研究室の長谷川裕之主任研究官、水越博子研究官、岡松香寿枝支援協力員、吉田幸子支援協力員が担当した。特に、岡松支援協力員には取りまとめ作業を中心的に行ってもらった。また、神谷泉主任研究官、佐藤浩主任研究官には素稿の点検などを担当してもらった。

平成16年3月

地理地殻活動研究センター

地理情報解析研究室長

小白井 亮一

目次

1. 航空レーザ測量の業務全体を見通す	
1-1. 航空レーザ測量の概要	1
1-1-1. 航空レーザ測量とは	1
1-1-2. 計測準備から納品までの流れ	3
1-1-3. 写真測量との比較	6
1-2. レーザスキャナの構成要素を知る	9
1-2-1. プラットフォーム ～固定翼機と回転翼機～	9
1-2-2. レーザスキャナの機器構成	10
1-2-3. レーザ反射ミラーの種類	14
1-2-4. 取得レーザパルスの種類	15
2. レーザスキャナの計測原理を知る	
2-1. 位置と姿勢を求める	17
2-1-1. GPS による航空機の位置特定	17
2-1-2. IMU による航空機の姿勢特定	18
2-1-3. 航空機の位置・姿勢の算出	19
2-2. レーザ反射点における高さのジオイド補正	22
3. センサーのキャリブレーション	
3-1. キャリブレーション概要	23
4. 飛行計画と計測の実施	
4-1. 飛行計画	25
4-1-1. 計測諸元の設定	25
4-1-2. 計測諸元の代表値と関係式	32
4-1-3. GPS 基準局	33
4-1-4. 計測地域の特性	33
4-1-5. レーザ反射点データの欠測およびノイズ	36
4-2. 計測の実施	37
4-2-1. GPS基線距離とレーザ反射点データの精度	37
4-2-2. GPS観測を行う時間	38

5. レーザ反射点密度の点検	
5-1. レーザ反射点密度に粗密を生じさせる原因	39
5-2. レーザ反射点密度の点検方法	40
6. 取得データの精度検証に関する検討	
6-1. システムの精度と誤差要因	42
6-1-1. GPS 測量に起因する誤差	42
6-1-2. IMU による姿勢データの誤差	42
6-1-3. レーザスキャナによる距離計測の誤差	43
6-2. 精度検証手法の種類	43
6-2-1. コース間の整合検証	44
6-2-2. 高さの精度検証	46
6-2-3. 水平位置の精度検証	48
7. 取得データの加工(フィルタリング)	
7-1. フィルタリングとは	50
7-1-1. ノイズ処理	50
7-1-2. フィルタリングの種類と特徴	51
7-2. フィルタリングの限界と対策	53
7-2-1. 地形	53
7-2-2. 植生	54
7-2-3. 地物	56
7-3. フィルタリング処理後の点検	56
7-3-1. 除去すべき反射点の確認	57
7-3-2. 除去してはならない反射点の確認	58
8. 出力図サンプル	
8-1. 出力図サンプルと利用事例	59
8-1-1. 等高線図	59
8-1-2. 段彩図	60
8-1-3. 傾斜区分図	61
8-1-4. 陰影図	63
8-1-5. 等高線と正射影画像重ね図	64
8-1-6. 等高線とカラー一段彩図	65

参考文献	6 6
用語の整理	6 9
発注時項目チェックリスト	7 0
計測業務・解析業務フロー	7 3
作業機関の保有機器	7 4

第1章 航空レーザ測量の業務全体を見通す

1-1. 航空レーザ測量の概要

1-1-1. 航空レーザ測量とは

航空レーザ測量では、航空機に搭載したレーザスキャナから地上に向けて多数の近赤外レーザパルス(波長 λ : $1.06\mu\text{m}$)を照射し、地表面で反射したレーザ光をレーザスキャナの受光部で捉えるまでに要する、レーザ光の往復時間を計測し、航空機と地表との間の距離を算出する。さらに、レーザスキャナと共に航空機に搭載されている GPS (Global Positioning System: 汎地球測位システム)と IMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置)により、航空機に搭載したレーザスキャナの位置と姿勢が正確に得られるため、広範囲におけるレーザ反射点の標高と平面位置を精度良く素早く特定することができる(図 1-1)。

照射されるレーザ光は多少広がりを持ちながら地表面に向かって進行するため、建物や樹木で反射される光と、地表面で反射される光を独立したパルスとして捉えることができる場合がある。これらのパルスの特性を利用した適切なフィルタリング処理を施すことによって、地表面のデータ(DSM: Digital Surface Model: 数値表層モデル、数値地表モデルとも言う)を、地表に存在する植生や建物などの地

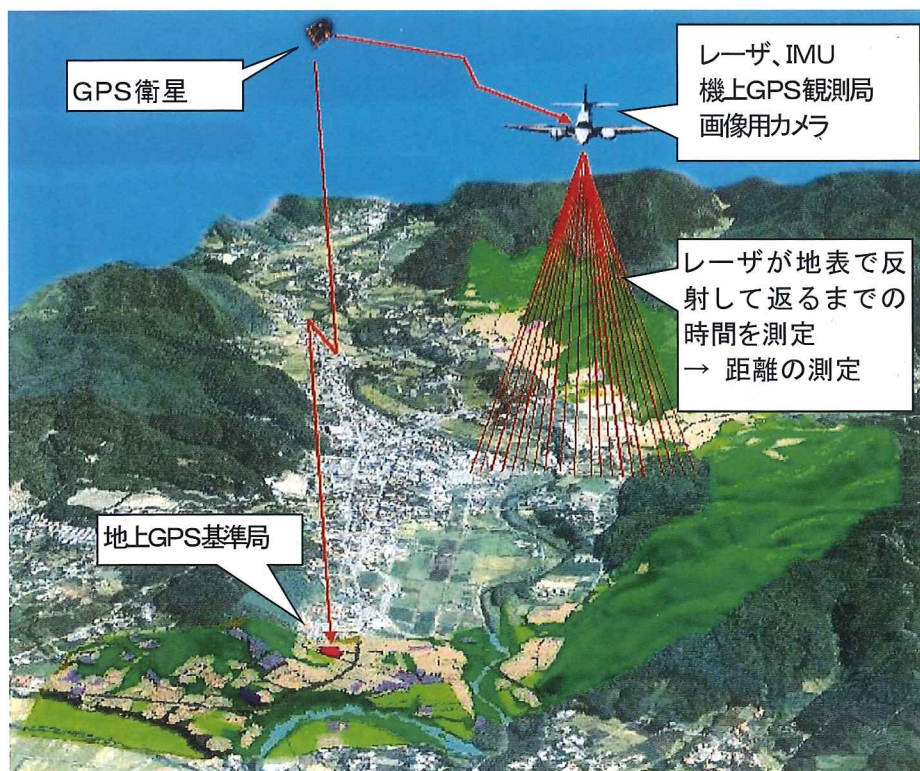


図 1-1 航空レーザ測量の概要

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

航空機に搭載されたレーザスキャナにより地表面にレーザ光を照射し、航空機と地表面の距離を算出する。さらに、航空機の位置・姿勢を GPS と IMU により計測し、レーザ光が反射された地点の標高と平面位置を高い精度と高い密度で算出する。レーザスキャナは航空機の進行方向と垂直に走査するので、一回の走査で線状のレーザ反射点群を得ることが出来る。また航空機が移動することにより、走査される線が航空機の進行方向に移動する。これらの組み合わせにより面的なレーザ反射点群を得ることが出来る。

物データと、DSM から地物データを除いた地形データ(DTM: Digital Terrain Model: 数値地形モデル)に概ね分離できる(図 1-2)。これらのデータは、ランダムに分布する3次元のポイントデータであるため、適切な内挿補間法を用いて、より一般的な等高線や不等三角網(TIN: Triangulated Irregular Network)、グリッドなどのデータに変換され、その後の処理に用いられることが多い。

航空レーザ測量は詳細な地形データを広範囲に取得できることから、二時期のデータを取得して差分から変化を読み取るといった利用方法もある。また、差分データの利用に限らず、コストなどの面から独自にデータを取得するのではなく、第三者が取得したデータを利用することも今後増えていくと考えられる。こうした状況では、各データの解析処理フローやデータの意味を記したメタデータが整備されていないと、解析上問題が発生した場合に、どの工程に起因するか追跡できなくなる。このため、納品時には必ず解析処理フローとメタデータを添付させるように要求した方がよい。

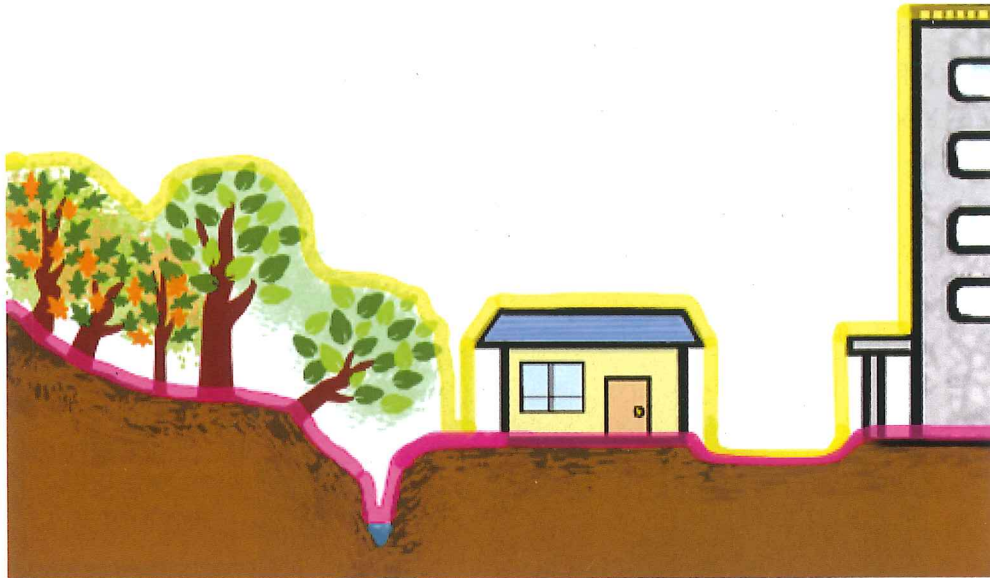


図 1-2 取得データの特徴(DTM、DSM)

■ DSM (Digital Surface Model: 数値表層モデル、または数値地表モデル)

■ DTM (Digital Terrain Model: 数値地形モデル)

DSM は地表に存在する地物(建物、樹木)の表面の高さを表す。地物がない場合は地面の高さを表す。図では黄色で示されている。一方 DTM は地表上の地物を取り除いた地面のみの高さを表す。図では赤色で示されている。レーザスキャナで取得されるデータには、地面で反射された計測点によるものと建物や樹木で反射された計測点によるものが混ざっている。従ってDTMを得るためにはフィルタリング処理を行い、地面で反射された計測データのみを取り出さなくてはならない。

1-1-2. 計測準備から納品までの流れ

航空レーザ測量の基本的な業務フローの一例を図 1-3 に示す。正射影画像の作成や現地での点検測量などは必須作業ではないが、後続の作業や精度検証作業で必要とされることから要求することが多い。

①計測前の準備

1) 計画・準備

目的に応じた計測データが取得できるように計画し、必要な機材、資料の準備を行う。特に、植生や地形などの現地の状況、空港の状況、GPS 衛星の配置状況、天候などを十分に考慮して、要求される計測点密度が達成できる測量パラメータや、飛行コースなどを選定する。

2) 地上 GPS 基準局の選定

地上 GPS 基準局は、精度向上のため計測エリアに近い場所を選定する。作業実施機関が独自に地上 GPS 基準局を設置しなくても、1秒間隔でデータを取得できる電子基準点データで代用することも可能である。計測に適した既設の地上 GPS 基準局がない場合は、独自に設置する地上 GPS 基準局の場所を選定する。

②実測

3) 飛行・計測

機上 GPS が取り付けられた航空機に IMU がマウントされているレーザスキャナ本体を搭載し、天候などの条件が整い次第、飛行・計測を行う。取得された各種データは磁気ディスクや磁気テープに記録される。

4) 地上 GPS 基準局での観測

一般的な GPS を利用した測量の場合と同様に、上空が開けていて、樹木・構造物、電波障害などの心配がない場所に基準点を選点し、GPS 測量で位置を決定する。高さは直接水準測量で決定する場合もある。航空機での観測と同期して、キネマティック測量用の GPS データを取得する。

既設の基準局データを利用する場合は、以上の作業の代わりに、電子基準点など現地付近で利用可能な基準局のデータを入手する。

5) 画像撮影

必要に応じて空中写真を取得することもある。航空レーザ測量を行う航空機にいっしょに取り付けられたデジタルカメラなどによって航空レーザ測量と同時に撮影を行う場合と、別途撮影のために飛行を行う場合がある。

③計測後の処理

6) レーザ反射点群データの作成

航空機側で取得した機上 GPS 観測データと IMU データ、および地上 GPS 基準局で取得した地上 GPS 観測データを POS (Position and Orientation System) 専用のソフトウェアで解析することによって、レーザスキャナの正確な 3 次元位置、および姿勢を算出する。次に、このレーザスキャナの位置・姿勢とレーザスキャナによる測距データを解析し、レーザ反射点の 3 次元座標値を算出する(レーザ反射点群データ)。

7) フィルタリング処理

まず、レーザ反射点群データから雲や大気中の塵などによって発生するノイズを検出し、除去する。次に、ノイズが除去されたレーザ反射点群データを、樹木や構造物などで反射した点と地表面で反射した点に分離し、DEMを作成する。

8) 現地点検測量

必要に応じて、水準測量など、航空レーザ測量の結果と比較が行えるような現地点検測量を行う。

9) 3次元データ作成

フィルタリングによって分離された、ランダムに分布する地表面のレーザ反射点群を内挿補間し、TIN やグリッドなどのデータを作成する。

10) 正射影画像の作成

必要に応じて、空中写真のデジタル画像を DEM データを用いて地表面に投影し、デジタル正射影画像を作成する。

11) 航空レーザ測量データの精度評価

現地点検測量の結果や既存の基準点などを利用して、航空レーザ測量データの精度を調べ、必要な精度を満たしているかどうか評価を行う。

④成果のまとめ

12) 出力図の作成

等高線図、カラー陰影図、カラー段彩図、傾斜分類図、傾斜方位図などの成果品を作成する。これらの図を重ね合わせて出力する場合もある。(第8章参照)

13) 報告書の作成

作業内容と解析結果を報告書にまとめる。

14) 納品

納品時には、報告書やデータの内容を点検し、DTM、グリッド、等高線などの納品データや各種出力図を受け渡す。

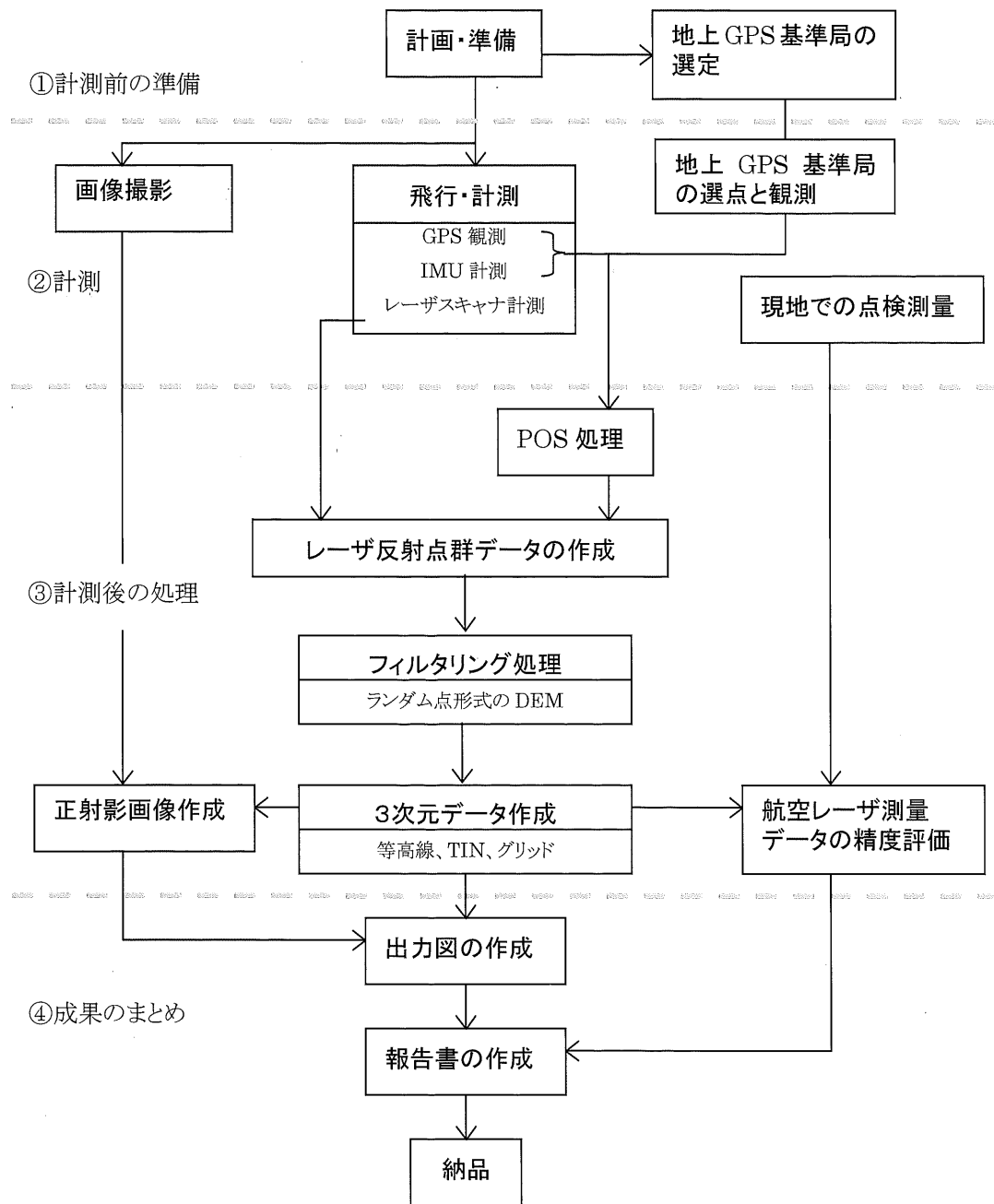


図 1-3 航空レーザ測量の作業フロー
(国土地理院・国際航業株式会社 2002 を改変)

1-1-3. 写真測量との比較

航空レーザ測量には、素早く精度良く広範囲の DEM を取得できるという特徴がある。理解を深めるため、図 1-3 の①計測前の準備、②計測、③計測後の処理の各段階とその他の処理上の特徴について、航空レーザ測量の特徴を具体的に写真測量と比較する(表 1-1 参照)。

1) 計測前の作業を比較する (図 1-3 の①過程)

従来の写真測量においては、計測時のカメラの位置と姿勢は未知数であり、これを決定するため、現地に対空標識を設置するとともに、空中三角測量を実施する必要があった。対空標識は、計測エリアに対してバランスよく配置することが精度上望ましい。このため、立ち入りが困難な場所に設置する必要があったり、既設の基準点がないため、新たに標定点計測を行う必要があったりするなど、現地作業の負担が大きかった。

一方、航空レーザ測量においては、レーザスキャナ本体などの位置と姿勢を GPS と IMU を用いて計測するため、計測エリア内、または周辺に GPS キネマティック測量に必要な地上 GPS 基準局が1点あれば計測可能である。基準局として、現在では国土地理院の電子基準点が利用できる。従って、現地における精度検証を除けば現地に立ち入る必要はない。以上のことから、従来の写真測量と比較すると、計測前の作業については、航空レーザ測量の方が圧倒的に少ないと言える。

ただし近年では、写真測量についても、GPS と IMU を用いて空中写真撮影時のカメラの位置・姿勢を計測することにより、対空標識を利用せずに空中三角測量(GPS 空中三角測量)を行うこともできるようになってきている。こうした方法を用いる場合、写真測量と航空レーザ測量における計測前の作業量はほとんど違いがない。

2) データ取得段階を比較する (図 1-3 の②過程)

写真測量におけるデータ取得は、原則として快晴時の日中に行う必要がある。撮影対象地域に雲などが存在し、地表の様子が目で確認できない場合は、その部分のデータを取得することができない。また、最悪の場合は空中三角測量を行うことができず、データが全く得られないということもありえる。

航空レーザ測量では、大気中に塵や雲があると、レーザ光はそれらに反射して地表面まで到達できず、ノイズとなってしまう。従って、飛行高度より下に雲、霧、霞、多量のエアロゾルがある場合、あるいは降雨、降雪時には計測ができない。また、航空レーザ測量のみでは高さや形状の情報しか得ることができず、判読性は写真に比べて劣る。この欠点を補うために航空レーザ測量と同時撮影で画像を取得する場合は、やはり快晴時の計測が重要になってくる。

写真測量では太陽高度による影もデータ取得に影響してくるが、航空レーザ測量では太陽高度を配慮せずにデータ取得できる利点がある。画像を必要としない、あるいは別途用意できる場合、航空機運用上の制限を除いて夜間に計測飛行を行うことも可能である。

以上のことから、航空レーザ測量の方が、制限が格段に緩やかである。

3) 計測データから数値データを得る過程を比較する (図 1-3 の③過程)

写真測量での標定・図化作業は、図化機に空中写真のフィルムをセットし、相互標定、対地標定を経て、ようやく技術者が1点ずつ数値データを取得していくという時間のかかる作業工程である。また、技術者の熟練度によって成果品の精度が異なってくるという不安定要素を抱えている。

航空レーザ測量では、レーザ光の照射位置を決定するために、航空機に装備した GPS のデータとレー

ザスキャナに装着された IMU のデータ、および地上局の GPS データをあわせて解析処理し、計測時のレーザスキャナの位置と傾きを求める。これはほぼ完全に自動化された手法であり、高い再現性を持つ。これらのデータは離陸から着陸まで連続して取得されており、例えば位置データが GPS により毎秒 1 回、姿勢及び加速度データが IMU により毎秒 100～200 回計測されている。さらに、これらの計測データは、カルマンフィルタにより内挿されることで、飛行軌跡データに変換される。こうして決定された位置や姿勢のデータは非常に高精度かつ高密度であり、レーザ光を発射したときのレーザスキャナの位置を正確に求めることができる。また、レーザスキャナから対象物までの距離は、レーザ光が対象物で反射されて戻ってくるまでの距離を計測することによって正確に求めることができる。その結果、レーザスキャナではそれぞれの計測点の高さを $\pm 15\text{cm}$ 程度の精度、計測点の水平座標は $\pm 30\text{cm}$ 程度の精度で決定することができる。

航空レーザ測量では、毎秒 25,000～70,000 点のレーザ反射点の 3 次元座標を取得することができる。ただし、次項で述べるように、航空レーザ測量では地物で反射したレーザ計測点と地表で反射したレーザ計測点を分類するフィルタリング処理が必要となる。地形や植生が複雑な場合には、フィルタリング処理によって完全に計測点を分類することが出来るとは限らないので、注意が必要である。

一方写真測量の場合、写真に写っている地物の座標を決定するには空中三角測量、標定、細部図化の工程が必要である。従来、これらの工程は熟練技術者による労働集約的な工程であった。しかし、前述のように GPS と IMU を用いて空中三角測量を省略する、解析図化機を用いて標定を自動化する、ステレオマッチング技術を用いて DTM の取得を半自動化することも行われている。

得られる地上分解能に関しては、航空レーザ測量の場合、機体の種類やレーザスキャナの性能によっても異なるが、最高でも 50cm～2m 程度である。写真測量の場合、使用する写真の縮尺や画像の解像度によって異なるが、10cm 程度の地上分解能の標高データを取得することが可能である。

4) その他の処理上の特徴を比較する

写真測量における森林域の DTM の取得は、技術者が樹木を経験によって想定し、樹木下の地表面を図化するため、詳細な地表面の再現が困難であり、微小な凹凸などは計測できないことも多い。航空レーザ測量では、森林域においても樹木下の地表面までレーザ光が到達した点があれば、地表面で反射したレーザ反射点のみを抽出するようフィルタリング処理することにより、地表面を再現することができ、微小な凹凸なども計測することが可能である。一般的な傾向として、航空レーザ測量は写真測量よりも樹木による影響を受けにくいと言える。

対象物の認識や分類においては、写真測量の方が有利である。写真測量では色や質感などの情報を利用して目視で対象物を認識できる。これに対して、航空レーザ測量では形状データしか得ることができないため、対象物の正確な判断が困難である。しかし、航空レーザ測量と同時に画像を撮影して両者を重ね合わせることによって、対象物の正確な形状把握と同時に目視による対象物の認識も可能となる。

画像としての地上分解能を比較すると、レーザスキャナの分解能は光学画像に比べて低いですが、用途によっては十分に対応できる分解能となっている。さらに、レーザ反射点データと同時に取得した画像を組み合わせて、正射影画像の作成に利用できるといったことも航空レーザ測量の特徴である。

表 1-1 写真測量と比較した航空レーザ測量の特徴

項目	航空レーザ測量	写真測量
点の取得	高密度の DEM データが迅速に得られる。	一対の写真を図化機にセットすることで面的に取得。
高さ方向の精度	精度は良く、概ね±15cm。	作業規程の精度として、1/2,500 の図面で標高点 66cm、等高線 100cm。
水平方向の精度	高さ方向の精度に比べ劣る。概ね±30cm。	1/2,500 の図面で、平面位置 175cm。
画像	2 枚のステレオ画像を必要としない。	2 枚のステレオ画像が必要である。
天候による影響	天候の影響を受けるが写真測量よりは有利	写真撮影時の天候に左右される。
樹木による影響	樹木の下での DTM を計測できる可能性が増大する。	樹木の高さを人が経験と勘により取り除き地表を想定するが、不十分。
対象物の認識	DEM データしか得られないために、対象物の認識は不明瞭で困難な場合がある。	写真から判断するため、目視で対象物を認識できる。
分解能	光学画像に比べて、平面位置の分解能は低い。	レンズの解像度、フィルム粒子に依存するが、高い分解能が可能。
その他の利用	画像データと組み合わせて、正射影像の作成に利用できる。	

表 1-2 固定翼機と回転翼機の主なパラメータの代表値

	固定翼機(セスナなど)	回転翼機(ヘリコプター)
プラットフォーム		
計測可能高度範囲 (h)	175~3,000m	50~2,000m
計測幅 (s)	~2,000m	高度 500m で最大 580m
対地速度 (v)	180~340km/h	50~200km/h
進行方向の反射点間隔 (d_{along})	2m~	0.5m~
進行方向に垂直の反射点間隔 (d_{across})	1m~	0.5m~

1-2. レーザスキャナの構成要素を知る

1-2-1. プラットフォーム ～固定翼機と回転翼機～

プラットフォームとはレーザスキャナを搭載する航空機のこと、固定翼機と回転翼機(参考参照)がある。プラットフォームの違いによって、計測範囲やレーザ反射点間隔に違いが生じるため、それぞれの特徴を活かし、計測目的に応じた計測を行う必要がある。

計測高度が計測幅に反映されるように(4-1-1 参照)、計測範囲やレーザ反射点間隔、計測可能高度や対地速度などの各種パラメータの値は、プラットフォームの飛行能力の違いに影響を受ける。作業実施機関によって、レーザスキャナを搭載できるプラットフォームが限定されるので、計測目的によっては注意する必要がある。それぞれの機器の主なパラメータの代表値を表 1-2 に示す。

<参考>

固定翼機(セスナなど): 飛行高度が高いため、計測範囲を広くとることができる。対地速度は速い。都市部の高層ビルなどが多い場所では、低い高度で計測を行うと建物の影になって反射点データが得られない部分が多い。このため高い高度から計測を行い、レーザ光が鉛直近くから入射するようにする必要があり、固定翼機が適する。

回転翼機(ヘリコプター): 飛行高度が低いため、計測範囲は狭くなる。対地速度は小さい。従って固定翼機よりも反射点間隔は小さくできる。進行方向及び進行方向に対して垂直方向の反射点間隔を0.5m 程にすることができる。曲がった河川の流域沿いや道路の路線沿いに細長い計測を行う場合は、機動性に富んだ回転翼機が適する。

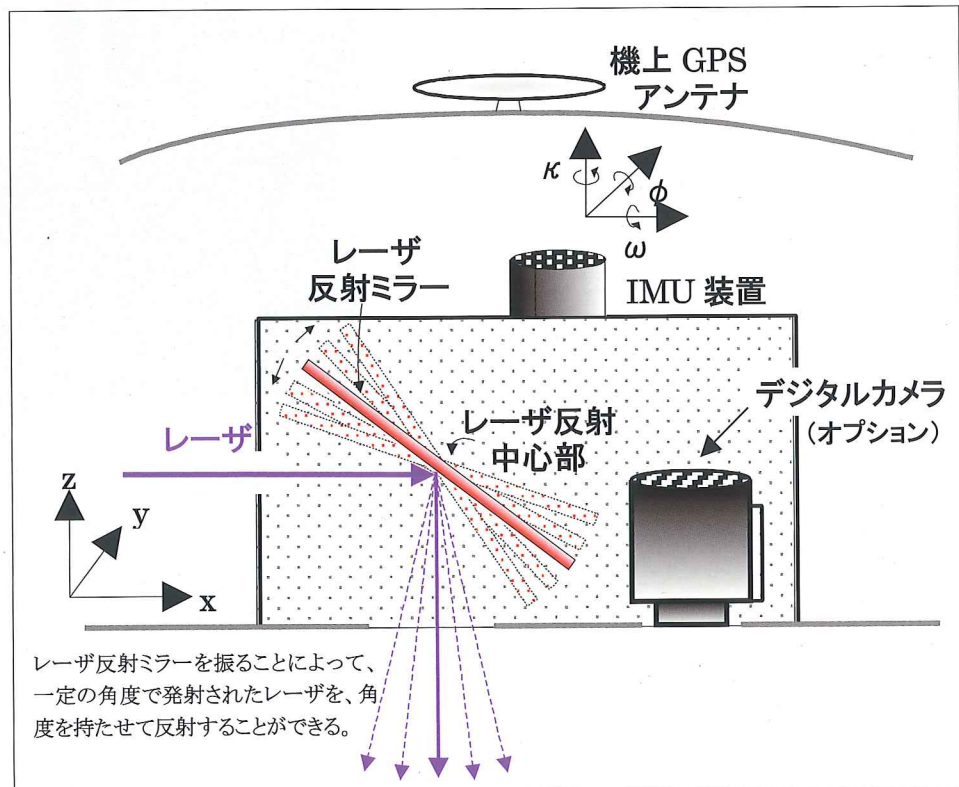


図 1-4 レーザスキャナの機器構成

1-2-2. レーザスキャナの機器構成

レーザスキャナは航空機の位置を計測するための GPS、航空機の位置・姿勢を計測するための IMU、航空機から対象物までの距離を計測するスキャン式光波測距儀（レーザスキャナ本体）から構成されている（図 1-4）。スキャン式光波測距儀は、地上で用いるノンプリズム型の光波測距儀と同じだが、航空機が移動し、かつレーザ光が飛行と直行方向にスキャンするため、面的な計測が可能となっている。個別の機器の特徴に関しては以下に説明する。

1) GPS (Global Positioning System: 汎地球測位システム)

航空レーザ測量では、相対測位の一種である GPS キネマティック測量で計測を行う。キネマティック測量では、整数値バイアス決定のための初期設定や短期間の観測中断に対応するために 2 周波の GPS 受信機を利用する。この測量では 1 台の GPS 受信機を座標が既知な点に設置し（地上 GPS 基準局）、移動する物体に別の GPS 受信機を搭載して同時に連続観測を行うことで、移動する物体の位置を観測する。キネマティック測量は搬送波測位法の一つであるため、DGPS などのコード測位（擬距離を用いる測位）に比べて位置を高精度に求めることができる。航空レーザ測量の場合は 1 秒ごとに GPS 計測を行うのが一般的である。

今日では、地上 GPS 基準局として電子基準点を活用する機会が増えている。電子基準点の長所は、地上 GPS 基準局を設置するために現地に行く必要がなく、基準局の位置も既知な点である。

図 1-5 に航空機に搭載された GPS 受信アンテナの例を示す。GPS 衛星からの電波を受信するために GPS アンテナは機体の外部上面に設置されている。レーザ発射位置を知るために、GPS アンテナとレーザスキャナ本体との位置関係を事前に計測して決定しておく必要がある。

2) IMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置)

IMU は直交 3 軸上に配置したセンサの姿勢（傾き）を計測するジャイロと加速度計、ならびに演算用コンピュータからなる。これらのセンサを用いて単独でセンサの位



図 1-5 機上GPSアンテナ

〈国土地理院・朝日航洋株式会社
2000 より引用〉

地上 GPS 基準局のデータを利用して
連続キネマティック測位を行い 1 秒ご
との機体の位置を計測する



図 1-6 IMUとレーザスキャナ本体

（国土地理院・国際航業株式会社
2002 より引用）

マウント部から横（右方向）に突き出している円筒がレーザスキャナ本体。IMU はレーザスキャナの姿勢を直接計測するために、機体ではなくレーザスキャナ本体に取り付けられている。レーザスキャナ後方には同時観測を行うためのデジタルカメラも取り付けられている。

置と姿勢を決定することができる。IMU は高いサンプリングレート(例:毎秒 200 回)を有し、GPS よりも短い時間間隔の高周波の位置・姿勢の変動を正確に捉えることができる。しかし、時間の経過と共に系統誤差(ドリフト)が累積する。このため GPS による解析結果を利用して、ドリフト成分を除去する必要がある。GPS と IMU を組み合わせることにより、計測飛行を行っている間、高い時間分解能で正確に位置・姿勢を決定することができる。

図 1-6 は航空機に搭載された IMU とレーザスキャナ本体、および画像撮影用のデジタルカメラの例である。航空機に設置されたマウント台にレーザスキャナがはめ込まれている。その上に IMU が取り付けられており、レーザスキャナの位置と姿勢を直接計測できるようになっている。図 1-6 のシステムには、デジタルカメラも取り付けられているため、航空レーザ計測と同時にデジタル画像の取得も行える。

3) レーザスキャナ本体(スキャン式光波測距儀)

レーザスキャナ本体では、発光部から発射されたレーザ光が対象物に当たって反射し、受光部に戻ってくるまでの時間を計測することにより、対象物までの距離を計測する。図 1-4 に示すように、レーザスキャナの内部には、レーザ光を反射してレーザ照射角度を変えるための鏡(レーザ反射ミラー)が取り付けられている。この鏡は飛行機の進行方向と直交する方向にレーザ照射角度を変えられるようになっている。これによって飛行機の進行方向と直交する方向で線的なデータを得ることができる。また、飛行機が移動することにより、レーザ発射地点が航空機の進行方向に移動することによって面的なレーザ反射点データを得ることができる。レーザ光は最大で 1 秒間に 25,000~70,000 回(25,000~70,000Hz)照射することができ、1m あたり 0.25 点から 2 点程度の密度で 3 次元座標データを得ることができる。

レーザスキャナを航空機から取り外して地上に設置し、あらかじめ距離が測定されたターゲットを用いて測距を行った結果、レーザスキャナ単体での測距精度は 5cm 程度であることがわかっている。

地表に到達するレーザ光の間隔は、レーザスキャナの性能によって異なるが、それ以外にも航空機の飛行速度、飛行高度、レーザを放射状に発射する際のスキャン角度(FOV: Field of View)などを調整することによって変更可能である。狭い地域において、より高密度なレーザ反射点データの取得を目的とする場合、飛行速度を落としてスキャン角度を小さく設定し、広範囲でより効率的な計測を行うときには、飛行速度を上げてスキャン角度を大きく設定するように、目的に応じた様々な密度でのデータ取得が可能となる。

4) 画像撮影装置(デジタルカメラ、ビデオ)

画像用のカメラを航空機に搭載している利点は、画像を使用することにより、崖地や道路などのブレイクラインの存在及びレーザ反射点の確認が可能な点である。画像用カメラにはカラー及びモノクロのデジタルカメラ、ビデオカメラなどがある(表 1-3)。

表 1-3 画像撮影装置の例

	用途	存在可能性	データ
ビデオ	・何を取っているか確認するため	ほぼ全てに搭載している	映像
カメラ	・何を取っているか確認するため ・オルソフォト作成のため	搭載されていることもある (オプション)	スチール 写真

＜参考＞

レーザスキャナの安全性確認:地表面データを短時間で精度良く高密度に取得するため、航空レーザ測量に用いられるレーザ機器の出力は大きく、ANSI (American National Standards Institution : 米国規格協会) により、レーザクラスは 3B、もしくは 4 に指定される。近距離で照射された場合は人体に影響を及ぼすことから、その安全管理には十分留意しなければならない。レーザの障害で最も問題となるのは、レーザ光自体の極めて高い指向性による大きなエネルギー密度である。障害の対象は、皮膚と眼が代表的である。JIS では JIS C 6801「レーザ安全用語」JIS C 6802「レーザ製品の安全基準」に安全基準が設けられている。

＜レーザ光の安全基準＞

- | | |
|--------|-------------------------------------|
| クラス1: | どのような使用条件でも安全 |
| クラス2: | 可視光レーザが目に入射した場合でも反射的に目を閉じる時間内であれば安全 |
| クラス3A: | 光学機器を用いてビーム内を観察すると危険だが、裸眼では安全 |
| クラス3B: | 裸眼によるビーム内観察は危険だが、拡散反射光は安全 |
| クラス4: | 拡散反射光でも目に障害を与える可能性がある |

3次元計測で使用されるレーザ光源は、近赤外レーザダイオード(LD)が主流である。レーザの安全性については、国際的な基準が定められており、ANSI Z-136.1-1993 にその詳細が記されている。

この基準によれば、人体の中で最もレーザ光に弱いとされている眼球中の網膜に損傷を与えるかどうかで安全か危険かが判定されている。レーザパワーは、波長、パルス幅、ピークパワー、パルスレートをもとに計算される。一般にアイセーフと言われるものには2種類あり、ひとつはレーザの発射口を裸眼でのぞいても大丈夫であるような低いパワーレベルのレーザを使用している機器のことである。もうひとつはレーザの発射口を裸眼でのぞくと危険だが、発射口からある距離以上離れると ANSI で定めたパワーレベル以下になるので、アイセーフとなる機器のことである。後者の場合は、「ある距離」が厳密に定められ、「ある距離」以内ではレーザが発射できないような安全装置を装備することが義務付けられている。

レーザパワーと測距距離とはトレードオフの関係にあり、レーザパワーを上げれば測距距離は伸びるが危険距離も増す、パワーを下げれば測距距離は短くなる。どちらを優先するかは使用目的により選択することになる。

図 1-7 に航空レーザ測量における対地高度制限の例を示す。この計測機器の場合、距離 600m 以内ではアイセーフとならないので、対地高度(計測地域での最高標高点からの高度)600m 以下では計測を行うことが出来ないようになっている。また対地高度 600m 以上 1,600m 以下ではレーザ減衰フィルターを用いて発射するレーザ光の強度を低下させ、アイセーフとなるように設定されている。対地高度 1,600m 以上では、通常の強度でレーザ光を発射してもアイセーフとなるため、レーザ減衰フィルターを用いる必要はない。このような制限の下に航空レーザ測量を行うことにより、たとえ裸眼でレーザスキャナを観察したとしても航空機は高速で移動しており連続してレーザーパルスを浴びることはないの、皮膚や眼に障害を与えることはない。

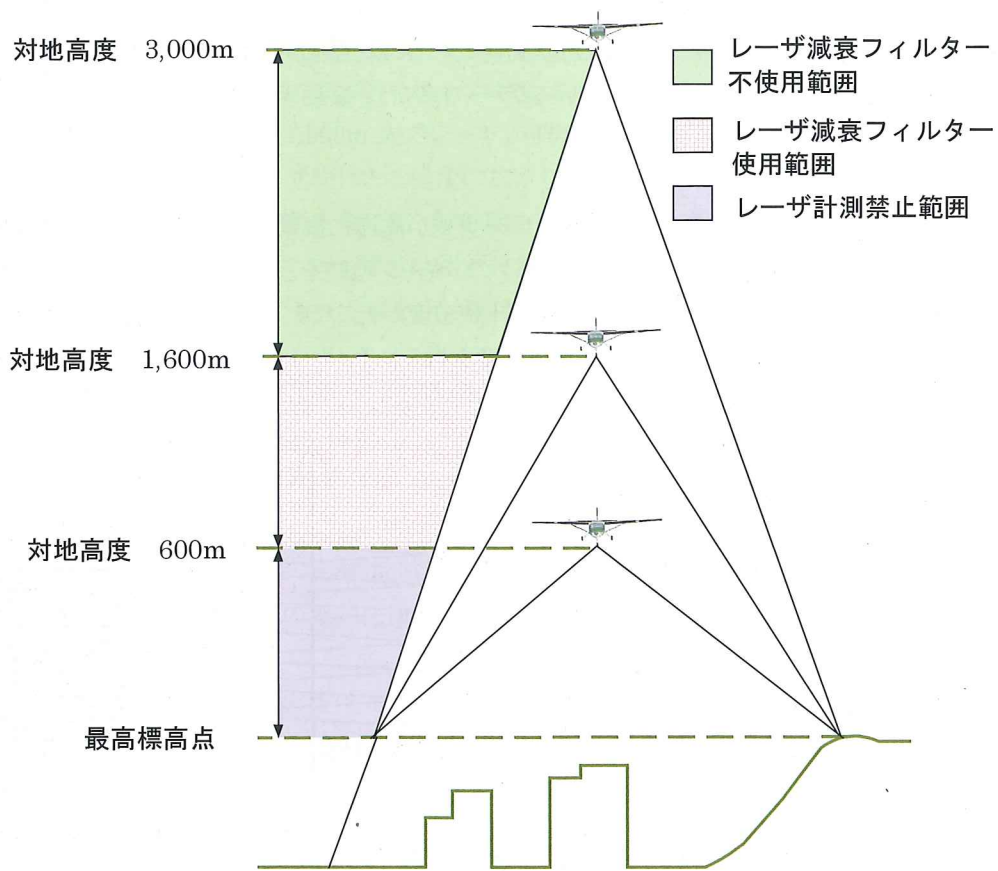


図 1-7 航空レーザ測量における対地高度制限の例
(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

1-2-3. レーザ反射ミラーの種類

レーザスキャナ本体に組み込まれているレーザ反射ミラーには、振動平面鏡と回転ポリゴンミラーの2種類があるが、航空レーザ測量で採用されているミラーの多くは、振動平面鏡タイプである。

1) 振動平面鏡

図 1-8 の様に、レーザスキャナから照射されたレーザ光が高速に振動(回転)している平面鏡に反射することにより地上をスキャンする。この場合ジグザグのスキャン軌跡をとり、スキャンする際の角速度は、中心部で速く、両端で遅くなる。従って中心部では計測密度が低くなり、両端では計測密度が高くなる。平面鏡を比較的大きくできるので、強い受信信号強度を得られるメリットがある。また、片側走査のみを用い、ジグザグにスキャンを取らない機器もある。

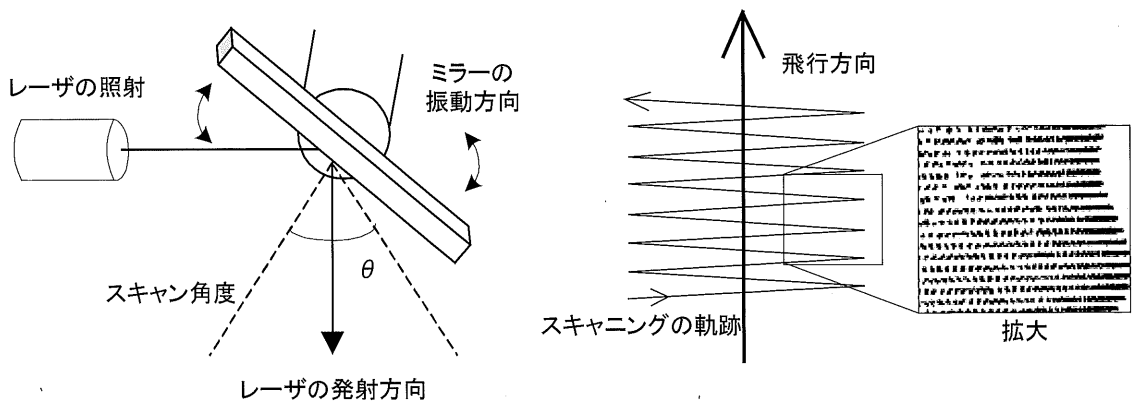


図 1-8 振動平面鏡

2) 回転ポリゴンミラー

図 1-9 の様に、多角形に面取りされたミラーをモータにより高速回転させ、面取りされた部分にレーザを照射することによって地上をスキャンする。平行直線状のスキャン軌跡をとり、スキャンする際の角速度は一定である。従って計測密度は中心部でも両端でもほとんど変わらない。ミラーを一定の速度で回転させればよいから、振動平面鏡を用いた場合に比べると高速スキャンが可能であるが、鏡の有効面積をあまり大きくできず、受信強度が小さいという特徴がある。

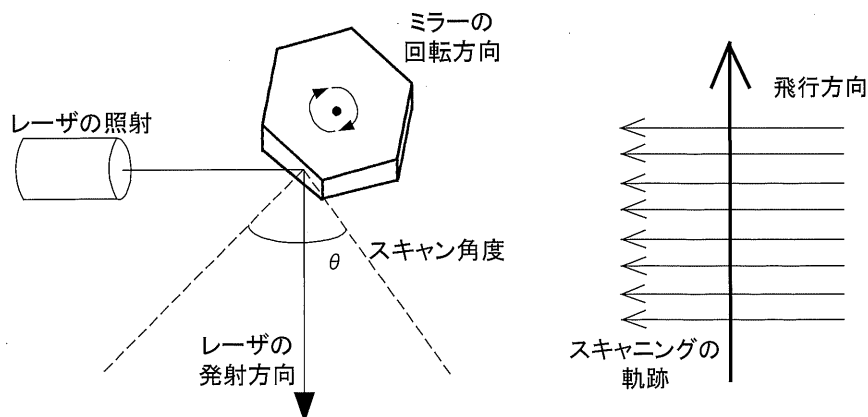


図 1-9 回転ポリゴンミラー

1-2-4. 取得レーザパルスの種類

レーザ光は、拡散しにくい光ではあるが、全く拡散しないわけではない。従って、レーザスキャナから発射されたレーザ光は、一定の広がりをもっている。この広がり大きさ(広がり角)は数 mrad から 0.3mrad 程度である。これは 1,000m 先でレーザが照射される個所の大きさが直径数 m から 0.3m 程度に相当する。このようにレーザ光はある程度の広がりをもっているため、例えば、樹木の場合、樹冠の隙間を通過したレーザ光が中間の葉や枝、幹の間をすり抜けて地表面まで到達することがある。こうした場合、異なった部分に当たったレーザ光は別々に反射される。複数の反射ピークを検出できる計測器を使用した場合には、これらのレーザ反射光が複数のレーザ反射パルスとして認識される場合がある。

これら複数のレーザ反射パルスのうち、最初に計測されたレーザ反射パルス(レーザスキャナに最も近い点で反射されたパルス)をファーストパルスと呼ぶ。また、最後に計測された反射パルス(レーザスキャナから最も遠い点で反射されたパルス)をラストパルスと呼ぶ。レーザスキャナによって、ファーストパルスのみしか計測できないもの、ファーストパルスもしくはラストパルスのいずれか片方しか計測できないもの、ファーストパルスとラストパルスを同時に計測できるもの、3つ以上の反射パルスを同時に観測できるものなど、取得できるパルスの種類に違いがある。

ラストパルスには、樹冠を通り抜けて地表面で反射しているパルスが含まれるため、ラストパルスのレーザ反射点データを利用することにより、樹木などに覆われた地域でもその下の地表面の形状を知ることが可能となる。ただし、樹木の密度が高い場合や木の幹で全てのパルスが反射されてしまう場合には、地表面の形状を知ることができない。また、レーザを透過しない対象物(例えば建物など)の蔭になってしまう個所の形状は当然計測することができない。

図 1-10 に複数のレーザ反射パルスの模式図を示す。レーザスキャナから照射されるレーザパルスをクリーム色で示す。ファーストパルスは、赤い線で示された地点で反射されたパルスとして観測される。この地点で反射されなかったレーザパルスはさらに下方へ進行していく。次のパルスは、ピンクの線で示された地点で反射されたパルスとして観測される。この地点でも反射されなかったレーザパルスは青い線で示される地表面まで到達し、ラストパルスとして観測される。この図の場合、赤い線で反射されたパルスはファーストパルス、ピンクの線で反射されたパルスはアザーパルス、青い線で反射されたパルスはラストパルスとして記録される。ファーストパルスとラストパルスを両方取得した場合の縦断面図の例を図 1-11 に示す。

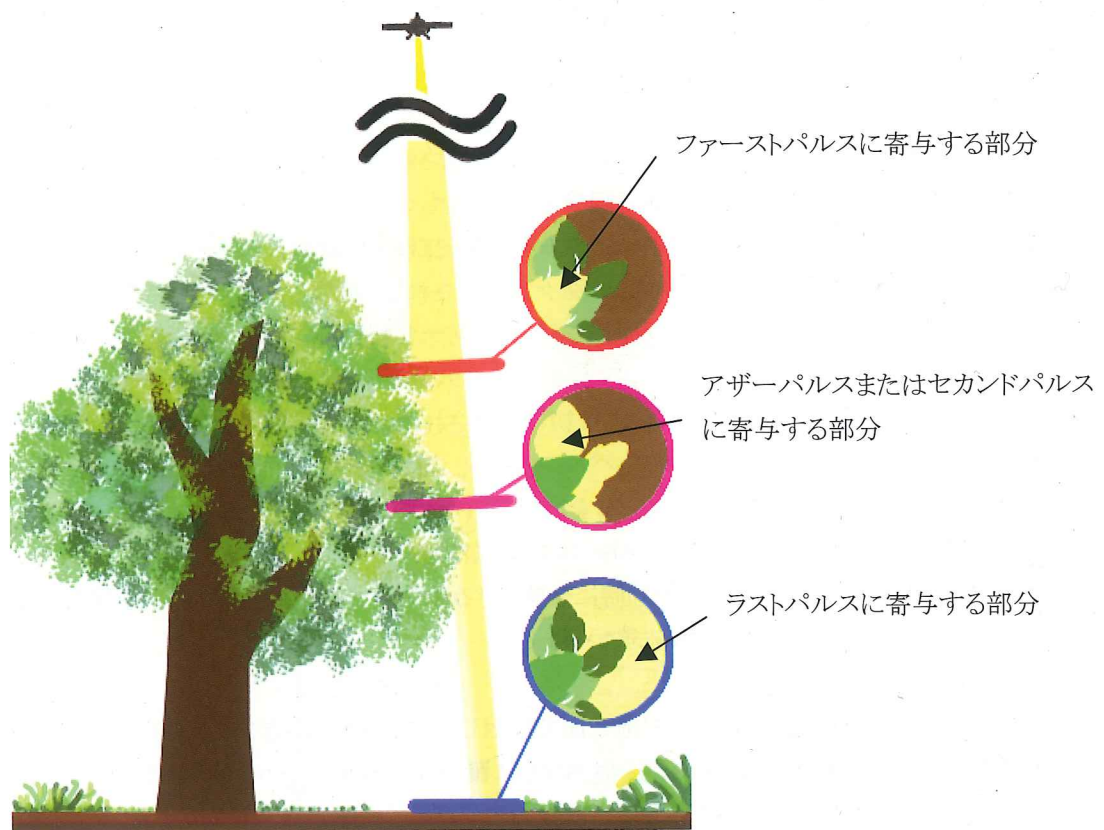


図 1-10 パルス分類の模式図

- レーザパルスの照射・反射
- ファーストパルスの位置と視野内の状況
- アザーパルスまたはセカンドパルスの位置と視野内の状況
- ラストパルスの位置と視野内の状況

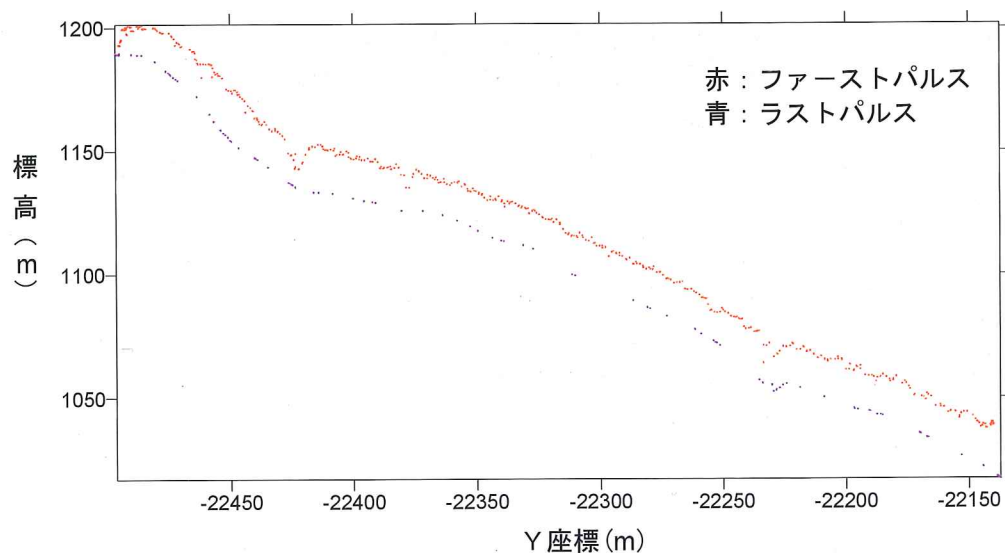


図 1-11 ファーストパルスとラストパルスを示した断面図

（国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用）

第2章 レーザスキャナの計測原理を知る

2-1. 位置と姿勢を求める

2-1-1. GPS による航空機の位置特定

第1章でも述べたように、航空機の位置は、GPS を用いた相対測位の一種である、連続キネマティック測量(図 2-1)によって計測される。この測位方法によると位置精度が数 cm で算出される。連続キネマティック測量では、2 周波 GPS 受信機を 2 台以上使用し、そのうち 1 台は航空機(機上 GPS 観測局)に、その他を三角点等の座標既知点(地上 GPS 基準局)に設置して、航空機の位置座標を算出する。連続キネマティック測量により 1 秒ごとに取得した機上 GPS 観測局データと地上 GPS 基準局のデータを解析することによって、機上 GPS アンテナの正確な位置を確定する。解析結果として 1 秒ごとの航空機の飛行軌跡を得ることができる(図 2-3)。このとき、1 秒ごとの観測状況の良し悪しに関する付加情報が得られる。

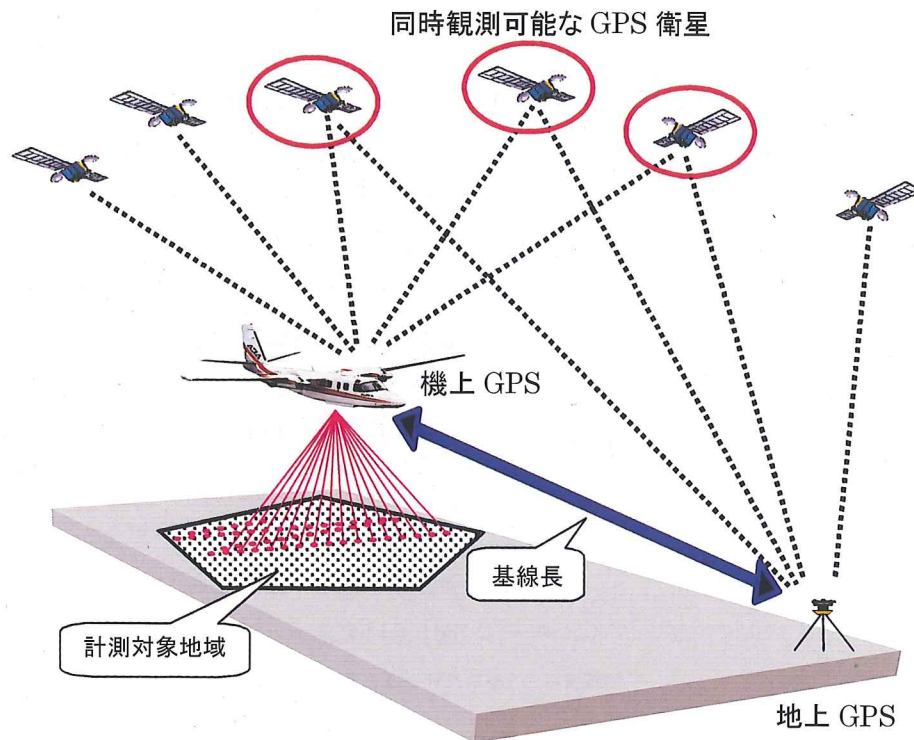


図 2-1 GPS 計測の概要
(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

2-1-2. IMU による航空機の姿勢特定

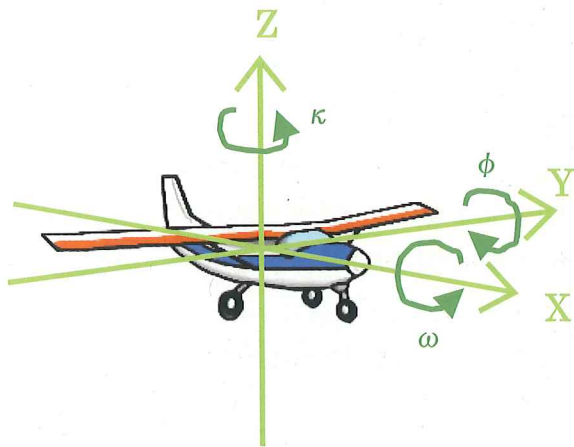


図 2-2 航空機の姿勢 3 軸

第1章で述べたように、IMUはジャイロと直交する3軸上に配置した加速度計からなっている。IMUでは航空機の離陸前に水平や真北方向を決定するための初期化作業が必要である(飛行中に初期化を行う方法もある)。航空機を地上に静止させ、加速度計によって水平を割り出し、IMUによって真北方向を割り出し、機体の向いている方位角を計算する。この初期化作業終了後に加速度計で計測されたデータを積

算することによって、航空機の位置・姿勢を1秒間に50～200回の高分解能で計測する。IMUでは計測データの積分によって航空機の位置・姿勢を求めているので、長時間の計測を行うと誤差が累積していく。従って、1秒間に1回計測されているGPSの位置データを用いて誤差を補正している。

IMUで計測された航空機の姿勢は、通常右手座標系のX、Y、Zの3軸で表現される軸の周囲の回転角として表される。航空機の座標系を、航空機の上向き方向をZ軸、航空機の進行方向をX軸、これら2つの軸と直交する方向をY軸とし、この内部座標系を外部の座標系に一致させるためのX軸、Y軸、Z軸の周りの回転角度をそれぞれ ω 、 ϕ 、 κ で表す(図2-2)。 ω はロール角、 ϕ はピッチ角、 κ はヨー角(ヘディング角)にそれぞれ対応する。レーザスキャナ本体はスキャンの方向がY軸と平行になるように取り付けられる。

2-1-3. 航空機の位置・姿勢の算出

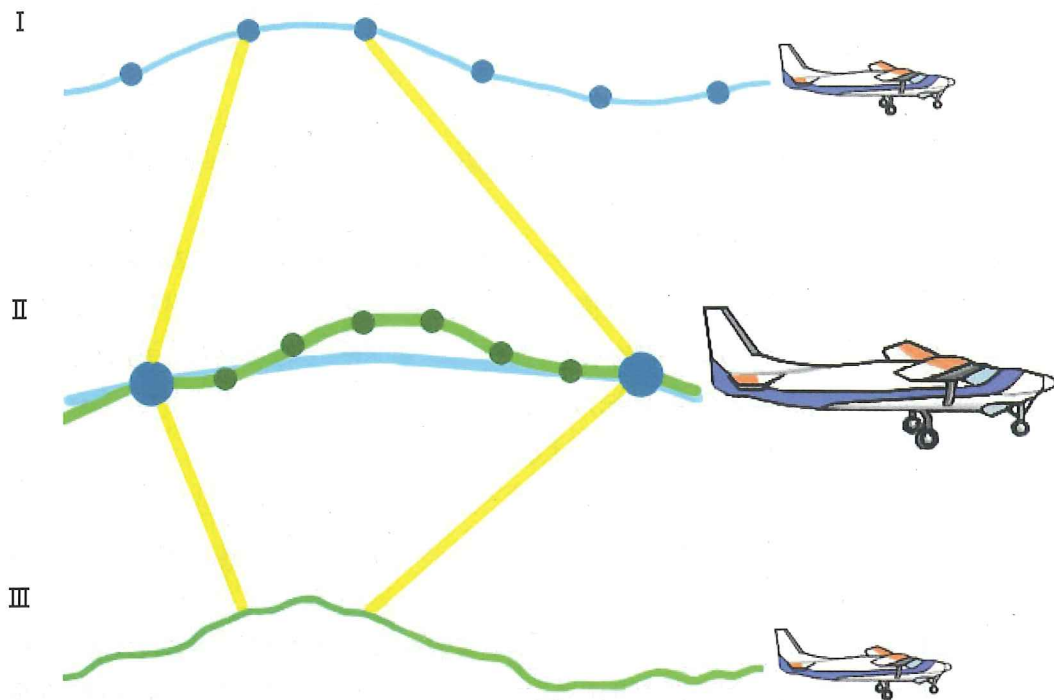


図 2-3 GPS と IMU データによるレーザスキャナの位置確定

- GPS により計測された1秒毎の座標点
- GPS 計測点のみを結んだ軌跡
- IMU により計測された座標
- IMU データにカルマンフィルタをかけて補間した軌跡

I : 1 秒間隔で計測された機上 GPS による位置データ

II : 1 秒を拡大表示。200Hz*で記録された IMU のデータにカルマンフィルタをかけて GPS データを補間

III : GPS と IMU データを元に解析したレーザスキャナの移動軌跡

* 数値は代表例である

1) 飛行軌跡の算出

位置については、GPS の計測結果の間を IMU データを用いて補間して求める。補間にはカルマンフィルタを利用し、計測誤差を推定して航空機の軌跡が滑らかになるような補間が行われる。姿勢については、GPS の計測結果と整合するようにジャイロのドリフトを補正する。この結果、GPS と IMU それぞれ単独で利用した場合に比べて時間分解能が高く、かつ位置・姿勢精度の高い航空機の軌跡を求めることができる。

また、航空機の位置はあくまで機上 GPS 観測局のアンテナの位置であるため、あらかじめ計測してあ

る、機上 GPS アンテナとレーザ反射中心部の位置・姿勢関係を加味して、レーザ反射中心部の位置・姿勢データを作成する。この過程を繰り返してレーザ反射中心部の正確な位置 (x, y, z) と傾き (κ , φ , ω) を常時決定する。(図 2-3 の II、III)

2) 取得データ位置の算出

レーザ反射点の 3 次元座標は、レーザスキャナによる測距結果、レーザ反射ミラーの角度、レーザスキャナの位置と姿勢をもとに求められる。

レーザ反射点の 3 次元座標 P は、レーザスキャナの位置を X_0 、レーザ反射点までの距離 (レーザスキャナによる観測値) を D 、レーザ反射ミラーの回転角を β (航空機を基準に真下方向が 0)、鉛直下向きの単位ベクトルを n 、レーザスキャナの姿勢を求めるためのレーザスキャナ座標系 (ここでは航空機の座標系と同じとする) の X、Y、Z 軸の周りの回転角度をそれぞれ ω , φ , κ として、次式で与えられる。ただし、姿勢を求めるための回転の順序は ω , φ , κ とする。

$$P = X_0 + R_z(\kappa) R_y(\varphi) R_x(\omega) R_x(\beta) Dn$$

このうち、 $R_x(\beta) Dn$ の項は、レーザスキャナ本体の計測により求めることが出来る。また $R_z(\kappa) R_y(\varphi) R_x(\omega)$ の項は、航空機の傾きを表し、IMU の計測により求めることが出来る。 X_0 の項は、航空機の位置を表し、GPS 計測により求めることが出来る (実際には、IMU データも利用して正確な位置を求める)。なお、航空機の周りの回転を表す回転行列と単位ベクトル n は以下の通りである。

$$R_z(\kappa) = \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad R_y(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

$$R_x(\omega) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}, \quad n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

上記の式を簡単に説明すると、以下のようになる (図 2-4)。航空レーザ測量で直接計測しているものは、レーザスキャナの位置 X_0 、レーザスキャナの傾き κ , φ , ω 、レーザ反射ミラーの回転角 β 、レーザスキャナと求める地点 (以下 P とする) の距離 D である。これらの計測値を使って、地点 P の座標を求めることを考える。

このために、まず初めに航空機に搭載されたレーザスキャナと地点 P との相対位置関係 (ベクトル X_{rel}) を求める。図 2-4 i は航空機、すなわちレーザスキャナが傾いていない場合である。このときレーザスキャナから鉛直方向への単位ベクトル n を考える。この単位ベクトルを D 倍し、次に回転角 β だけ傾ける (図 2-4 ii)。航空機に傾きがなければこのベクトルの先端は地点 P に一致する。しかし、一般に

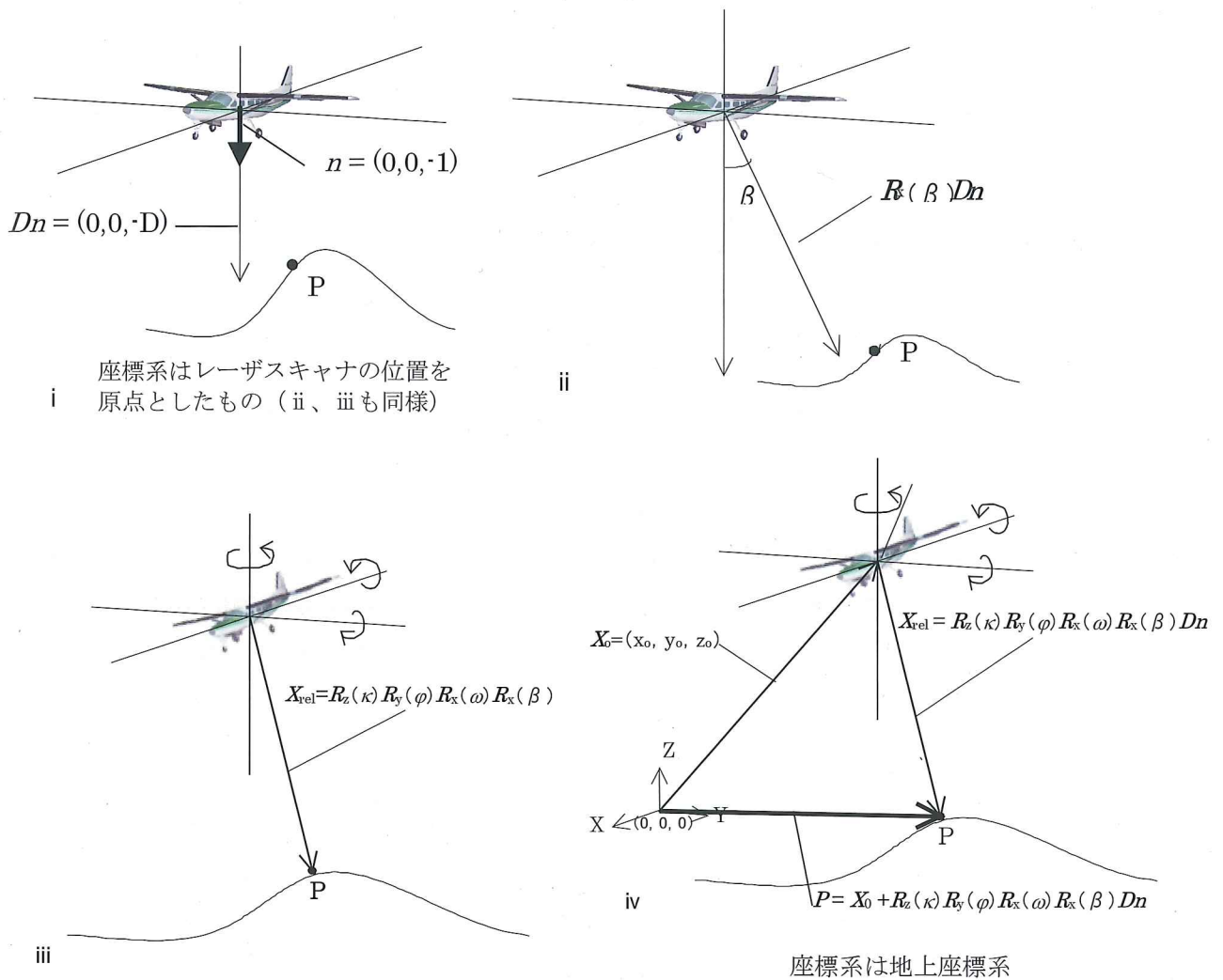


図 2-4 計測位置の算出原理

- i 航空機からレーザ反射点への相対的な鉛直下向きのベクトル Dn を求める
- ii 航空機を基準に真下方向を0とし、レーザ反射ミラーの回転角 β を与えて反射点 P の方向と距離を求める
- iii 航空機の姿勢情報から航空機とレーザ反射点 P の相対的な位置を求める
- iv GPS 測量の結果得られた機体の位置を加味し、レーザ反射点 P の絶対位置を求める

航空機は傾いているため、IMU で検出された分だけレーザスキャナを傾けることにより、このベクトルの先端は地点 P に一致する(図 2-4 iii)。このベクトル X_{rel} は、 $R_z(\kappa) R_y(\phi) R_x(\omega) R_n(\beta) Dn$ で表される。

最後に、レーザスキャナの位置として GPS 測量で得られた座標を与えることによって、地点 P の地上座標を求める。地点 P の位置ベクトル P は、レーザスキャナの位置ベクトル(X_0)とレーザスキャナと地点 P の間の相対ベクトル(X_{rel})の加算で求まる(図 2-4 iv)。

$$P = X_0 + X_{rel}$$

$$P = X_0 + R_z(\kappa) R_y(\phi) R_x(\omega) R_n(\beta) Dn$$

$R_x(\beta) Dn$ の項は、レーザスキャナ本体計測により求めることが出来る。また、 $R_z(\kappa) R_y(\varphi) R_x(\omega)$ の項は、航空機の傾きを表し、IMU の計測により求めることが出来る。 X_0 の項は、航空機の位置を表し、GPS 計測により求めることが出来る(実際には、IMU データも利用して正確な位置を求める)。

2-2. レーザ反射点における高さのジオイド補正

ジオイドとは「地球重力の等ポテンシャル面のうち、平均海水面に一致するもの」である。

測量及び日常生活では、ジオイドからの高さである標高が用いられる。しかし GPS 測量で求められるのは、準拠楕円体からの高さである楕円体高であり、標高を直接求めることが出来ない。航空レーザ測量で得られる高さは GPS 測量に基づくものである。従って航空レーザ測量の結果から標高を求めるためには、ジオイド補正を行って楕円体高を標高に変換する必要がある。

図 2-5 は標高、ジオイド高、楕円体高の関係を示したものである。ジオイド高は準拠楕円体に対するジオイドの高さを表すものである。標高は楕円体高からジオイド高を引いたものとして求めることが出来る。日本の測地基準体系と適合するジオイドモデルは、国土地理院によって作成されており、「日本のジオイド 2000」として国土地理院のホームページから入手することが出来る。

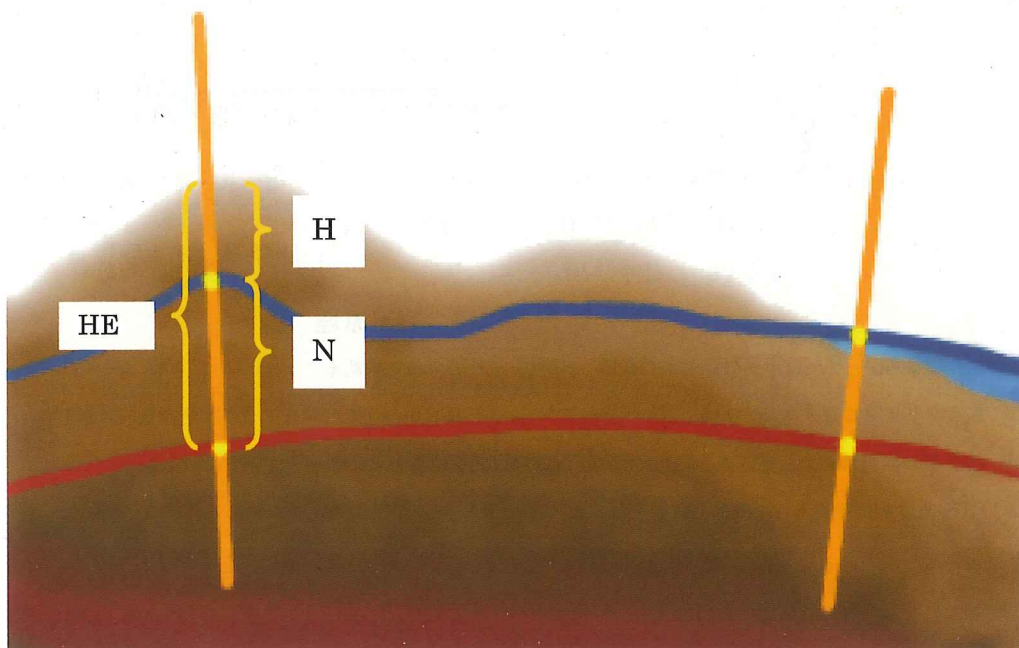


図 2-5 ジオイド

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

—— ジオイド ≡ 平均海水面

—— 準拠楕円体 (WGS-84 楕円体)

$H = HE - N$ (N : ジオイド高、 HE : 楕円体高、 H : 標高)

第3章 センサーのキャリブレーション

3-1. キャリブレーション概要

作業実施機関が精度管理のために行う点検は以下の5つに分類される。

- ①初期点検… 計測機器をプラットフォームに新規で設置する際の点検。
- ②日常点検… 測量作業を開始する前に作業実施機関が行う簡単な点検。機器の動作状態の確認など計測が正常に行えるかどうかの確認が主である。
- ③定期点検… 機器の構造等を理解した専門性の高い技術者が定期的に行う点検。測量機器によって異なるが3～6ヶ月周期で行われているのが一般的。
- ④保守点検… 機器を分解して部品単位までの点検を行う点検であり、測量ではなく、機器の専門家あるいはメーカーなどが行うことになる。測量機器によって異なるが、数年単位で行われる。
- ⑤臨時点検… 計測機器の異常時に、すみやかに行う。

本章で扱うキャリブレーションとは、③の定期点検をいう。

キャリブレーションとは、航空機に搭載したレーザスキャナなどの調整が不十分な場合に生じる系統誤差を適正な範囲に収めるための作業である。あらかじめ定められた方法に従ってキャリブレーションを行うことで、系統誤差を補正するために必要なパラメータを決定する。キャリブレーションを行わないとレーザスキャナによって計測されたデータに大きな系統誤差が生じてくる。航空機に搭載するGPS、IMU、レーザスキャナ本体は、細心の注意を払って正確に設置されるが、実際には製作・組み立て・設置に関わる誤差がわずかに生じる。航空レーザ測量では、キャリブレーションサイトでの計測を行った後、レーザスキャナの点検用データと実際に計測されたデータのずれから補正量を求めて、ソフトウェア上で補正計算を行っている。

具体的には、軸のずれの角度を直交座標系の3軸に分解した成分である κ （ヘディング）、 ϕ （ピッチング）、 ω （ローリング）と、レーザ反射ミラーのスキャン角の計測誤差である横縮尺の補正を行う。IMUなどの軸のずれによって生じる系統誤差は、 κ 、 ϕ 、 ω 軸の回転として観測されるが、いくつかの誤差要因が考えられ、それぞれの誤差要因の大きさを直接明らかにすることは難しい。これは横縮尺についても同様である。キャリブレーションは、これら4要素の補正值を決定し、機械精度内（例えばRAMSの場合高さ精度 $\pm 15\text{cm}$ 、水平精度 $\pm 30\text{cm}$ 、参照：表 1-1）に収まる高精度のデータを取得するために行う最も重要な作業である。

キャリブレーションでは、キャリブレーションサイトを特別な方法で計測することにより4つの要素を補正する。平面位置は、レーザ反射点の間隔程度の精度でしか同定できないため、多数の反射点の統計的性質を用いてキャリブレーションを実施する。

航空レーザ測量は多くの機器により構成されているため、全ての機器が正確に調整されていないと予想外の大きな誤差を生じることがある。そのため、キャリブレーションを実施して機器のメンテナンスを行っている。

レーザスキャナは継続して使用していると、航空機の振動やミラーの回転、その他の理由によって、

機器の位置や傾きが少しずつ変化してしまう可能性があるため、キャリブレーションは航空レーザ測量を継続していく上で必ず必要である。このようなずれ(系統誤差)があると、レーザスキャナ本体の傾きなどに誤差が生じることになり、結果として計測されたデータの精度が低下し、信頼性が低くなってしまう。そのため、作業実施機関は一定期間毎に定期点検を行い、未然に系統誤差が大きくなるのを防ぐことが大切である。定期点検の実施頻度は、機器メーカーによると1年に1回とされている。また、定期的なキャリブレーションの他にデータの信頼性を高める目的で作業計画機関が計測作業前にキャリブレーションを実施するよう作業実施機関に指示することができる。作業実施機関はキャリブレーションサイトにおいて航空レーザ測量を行うことによってキャリブレーションを実施する。キャリブレーションサイトはつくば市の土木研究所付近に設置された共通のサイトと、保有作業実施機関が独自に持つサイトがあるが、独自のサイトを利用する場合がほとんどである。同一のキャリブレーションサイトを繰り返し計測することによって、機器の設置当初からのずれや補正值が正確に算出される。作業計画機関が事前にキャリブレーションの実施を作業実施機関に求めないときは、最新のキャリブレーションの実施日とその結果を確認する必要がある。

なお、①の初期点検とは、計測機器をプラットフォームに新たに設置したときの初期設定のためのキャリブレーションを指す。これは必ず実施する必要がある。初期設定のためのキャリブレーションは設置された機器の取り付け位置や角度などの設定値を求めるために必要である。既存の機器をプラットフォームに再設置した時も初期設定を行う。この初期設定値からのずれが、定期点検時や臨時点検時の補正量となる。

また、⑤の臨時点検は、計測機器に異常が生じたときに機器のずれをチェックしてパラメータを補正するために行われる。ずれが生じる原因には多くの要因が複雑に関与するため原因が特定できない場合が多いが、何らかの原因で機器に衝撃が加わり、大きな誤差を生じると考えられる。突発的な原因によるため実施頻度は不定期となる。

第4章 飛行計画と計測の実施

4-1. 飛行計画

飛行計画を作成する際には、目的に応じたレーザ反射点密度が得られるように計画諸元を設定する。その際、計測時期や計測地域の植生、地形特性を十分考慮した飛行計画でなければならない。また、計測データに欠測やノイズが生じる可能性についても考慮する必要がある。さらに、計測地域での飛行空域が制限される場合もあるので事前の注意が必要である(表 4-1)。

要求するレーザ反射点密度を得るためには、計測ごとに適切な計測諸元を設定する必要がある。計測に関するパラメータの設定範囲は、作業実施機関の保有機器によって規定されている。1秒間におけるレーザ発射点数であるパルスレートに関しては、計測機器の性能によって設定範囲に上限があるため、飛行高度、計測コース(方向・間隔)、スキャンレート、スキャン角度を調節することによって目的の計測密度を満たすような飛行計画を立案する。

飛行計画立案時には、使用する GPS 基準局についても考慮しておく。

表 4-1 空域制限

施設や場所	留意点
原子力発電所上空	2,000 ~ 3,000ft (667~1,000m) の低空飛行不可
自衛隊基地上空	飛行不可の場合が多い
航空自衛隊管轄の空域	訓練時など進入不可
空港離着陸空路	使用時進入不可

4-1-1. 計測諸元の設定

1) 計測コース

他のパラメータを固定して考えた場合、計測コースの間隔が狭いほど、隣り合うコースのオーバーラップが大きくなる。オーバーラップした地域では、単独コースの場合と比較してレーザ反射点密度が大きくなる。高いレーザ反射点密度が要求される場合は 100m 以下のコース間隔を設定することもある。これによって隣接コース間のオーバーラップを増やしレーザ反射密度を高くすることができる。また、計測方向として片方向、クロス方向のいずれかを選ぶことによって、レーザ光が照射される向きや角度が異なるため、レーザ反射点データの取得結果が異なる。対象地域に高い建物や急崖がある場合、クロス方向に計測することで、レーザ光が当たらずに影となる部分を減らすことができ、結果としてレーザ反射点密度を高くできる場合がある。また、同じコースを複数回計測することで、レーザ反射点密度を高くすることも可能である。ただし、一般には重複して 3 回以上飛ぶことはあまりない。

図 4-1 は片方向計測とクロス方向計測の違いを示している。色の違いは標高の違いを表し、標高の最も低い部分が水色で表され、標高が高くなるにつれて緑色、黄色、赤色で表されている。明るさの違いはレーザ計測点密度の違いを表し、明るい部分ほどレーザ計測点密度が高い。左図は北西～南東方向の 6 コースにおいて計測を行った結果、右図はこれと直角に交わる方向にも飛行して計測を行った結果である。片方向で計測を行った場合、隣り合うコースと重なり合う部分では計測密度が高いが、そ

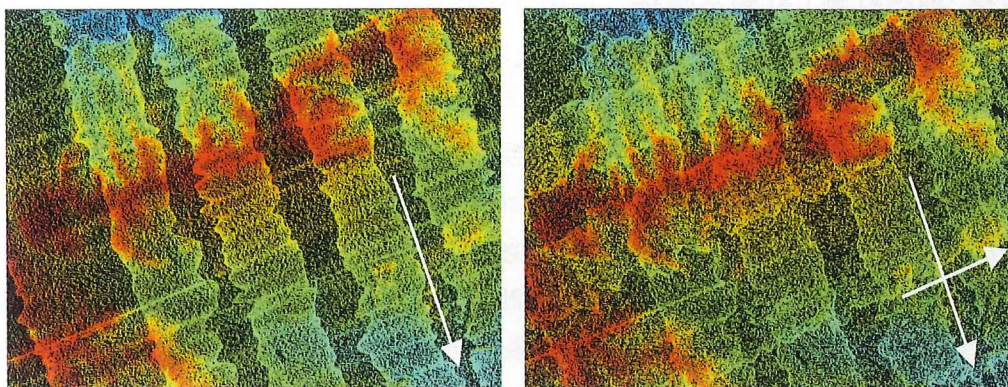


図 4-1 片方向計測とクロス方向計測におけるレーザ反射点密度の違い

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

左:片方向計測、右:クロス方向計測。色の違いは標高の違いを表し、水色、緑色、黄色、赤色の順に標高が高くなる。白色の矢印は計測飛行の方向を示す。明るさの違いはレーザ反射点密度の違いを表し、明るいほどレーザ反射点密度が高い。片方向計測では、隣り合うコースとオーバーラップした領域ではレーザ反射点密度が高いが、オーバーラップしていない領域ではレーザ反射点密度が低く、領域によってレーザ反射点密度に大きな違いがある。一方クロス方向計測では、どの領域でもレーザ反射点密度はほぼ均質である。レーザ反射点密度の低い部分が少なくなるため、尾根や谷の微細な形状をよりよく認識することが出来る。

れ以外の地域では計測密度が低い。この結果、飛行コースと平行に計測密度が高い部分と低い部分が交互に表れ、場所によって計測密度に大きな違いがあることがわかる。一方、クロス方向にも計測を行った場合、片方向計測の図と比べてコースと平行な明暗の差は少なく、計測密度にむらがないことがわかる。極端にレーザ反射点が少ない領域がなく、計測密度にむらがないことにより、どの領域でも得られるデータの品質が一定になることが期待できる。

また、コース設定の際には地形状況も考慮する必要があり、特に山地斜面を計測する場合、斜面に沿って基準面を数段設定して複数回計測するなど、計測対象地域の地形条件にあわせたコース設定を行う(図 4-2)。しかし、広範囲で標高差のある急傾斜地においてはクロス方向の計測が困難なことが多い。レーザ反射点をなるべく均質に配置するためには、図 4-2 に示すように地表からの高度をなるべく一定に保つ必要があり、そのためには尾根や谷となるべく平行に飛ぶ必要がある。尾根や谷を横切るように飛行すると、尾根ではレーザ反射点密度が高くなり、逆に谷ではレーザ反射点密度が低くなってしま(図 4-5 参照)。これを避けるために航空レーザ測量中に姿勢や高度を急激に変化させると、レーザ反射点密度に大きな濃淡がでたり、レーザが全く当たらない地域が生じたりする。

図 4-3 は山間部で計測を行った際の飛行高度の例を示す。飛行コースはデータ取得地域を走る主要な尾根とほぼ平行になるように設定された(図

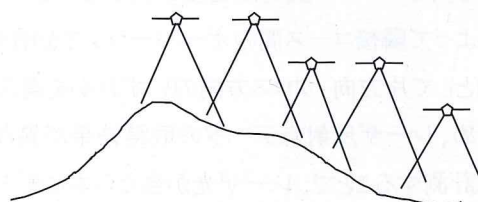


図 4-2 山地斜面における
計測コースの設定の例

(国土地理院・朝日航洋株式会社
2000 より引用)

計測対象地域に高低差がある場合は、レーザ反射点密度がなるべく等しくなるように、地表面からの高さがなるべく一定になるように計測コースを設定する。

4-3a)。この地区では、計測範囲の西側に主稜線が北東—南西方向に走っている。計測コースは主稜線と平行になるように設定されている。レーザ反射点密度に濃淡ができるのを避けるため、それぞれのコースを飛行している間は飛行高度はほぼ一定に保たれている。各コースの飛行高度は、コース直下においてもっとも標高が低い地点からの高度になるべく同じになるように計画されている。図4-3b は計測時の飛行高度を示したものである。図の横軸は飛行機の軌跡の測地座標系 Y 座標を、縦軸は飛行高度を示している。また赤色は1回目の計測飛行時の軌跡を、青色は2回目の計測飛行時の軌跡をそれぞれ表している。大局的に見て、この計測地域は北西側が高く南東側が低くなっており、計測高度も地形の起伏に合わせて西側のコースで高く東側のコースで低くなっている。

飛行場から計測地域までの距離と飛行時間によってコストは変動する。計測地域の面積が同じであっても、計測地域の形状や計測地域の起伏の大小などによってコース数や飛行時間が変化する。計測地域の形状が複雑であっても、航空機(特に固定翼機)はその形状に合わせて細かく航路を変

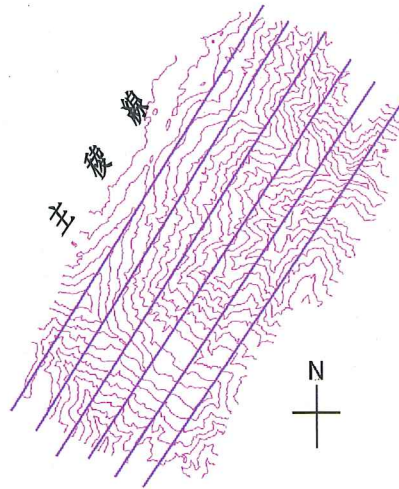


図 4-3a 山間部における計測例
(国土地理院・朝日航洋株式会社 2000
を改変)

静岡市口坂本地すべり地区において、地表の高低に合わせて飛行高度を設定した例。赤色で示されているのが等高線。青色で示されているのが計測コース。この地域の西側には北東—南西方向に主稜線が走っており、コースは主稜線に沿う方向に設定されている。コースごとにコース直下の地表の平均標高を計算し、平均標高からの高さが一定となるように計測高度を変化させている。各コース内では飛行高度は一定である。またこの例では、レーザ計測点密度を高くするため、各コースを2回ずつ飛行している。

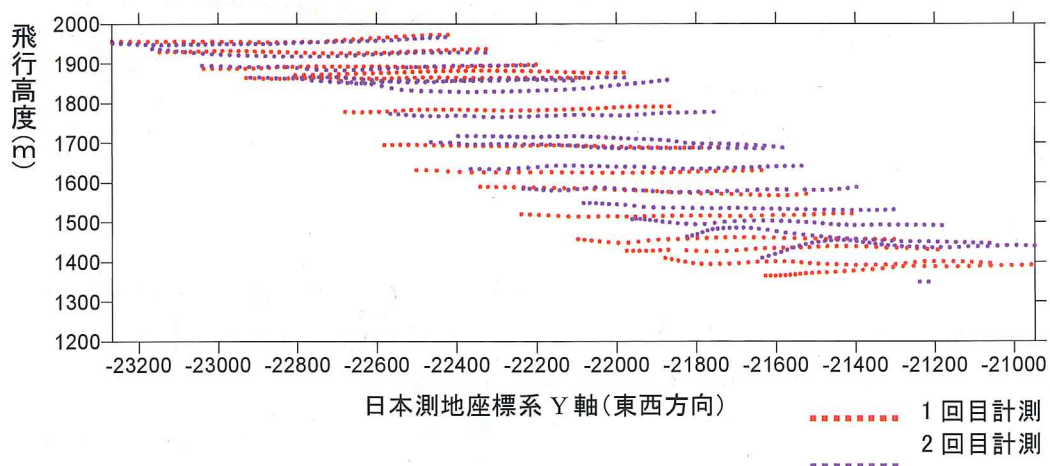


図 4-3b 山間部における飛行高度の実例
(国土地理院・朝日航洋株式会社 2000 より引用)

更することができないので、通常計測地域は長方形になるように設定される。

計測地域の形状が同じであっても、地形の起伏が激しい場合はレーザ反射点密度が一定になるように計測コースを設定するので、一般にはコース数が増加し、飛行時間は増大する。

2) 飛行高度(対地高度)

飛行高度の設定とは、計測地域内の平均的な地表面の標高(基準面)に対して、飛行機が飛行する高さを設定するものである。固定翼機の場合、レーザ光の安全基準(P.12 「レーザスキャナの安全性確認」参照)と最大計測可能距離を考えて、飛行高度は基準面より 600 ~ 2,000m で設定する場合が多い。他の条件が同じであれば低い高度で計測するほど進行方向と直交する方向のレーザ反射点間隔が狭くなり、その結果レーザ反射点密度が大きくなる。図 4-4 はその様子を模式的に示したものである。スキャン角度が θ で一定とすると、計測幅 S 、 S' の比は飛行高度 h 、 h' の比と同一である。しかし 1 秒間に発射されるパルス数は一定なので、1 回のスキャンで得られるレーザ反射点の数は同じである。従って結果として得られるレーザ反射点密度は、高度 h 、 h' の比に反比例する。例えば高度を 2 倍にするとレーザ反射点密度は 0.5 倍になる。逆に高度を 2 倍にすると 1 回のスキャンでデータが得られる幅(図 4-4 中の S 、 S')は 2 倍になる。なお、一般的にレーザ光は円錐状に広がるために発射位置から計測地域の基準面までの距離が近いほどフットプリント(レーザ光が照射される楕円形の領域)は小さくなる。また距離が近いほうが距離計測の精度は高い。一方、フットプリントの大きな方が、ファースト・ラスト両パルスを取得しやすいという特徴がある。

3) パルスレート

パルスレート(レーザパルス周波数)とは単位時間あたりのレーザ照射数を表すものであり、こ

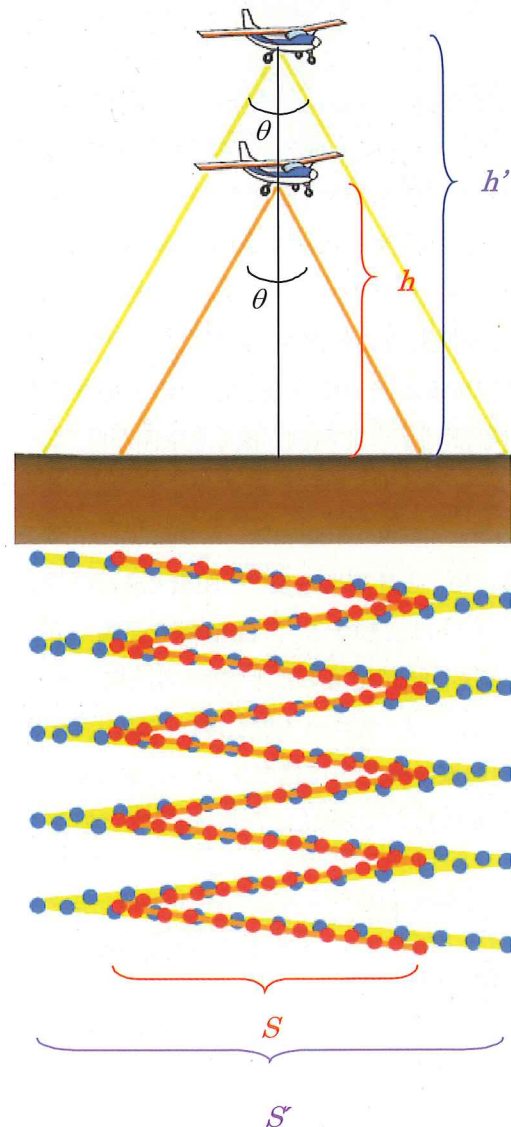


図 4-4 飛行高度の違いと計測結果

(国土地理院・国際航業株式会社 2002

より引用)

- — 飛行高度 h' のレーザ反射点群
- — 飛行高度 h のレーザ反射点群
- θ : スキャン角度(固定)
- h 、 h' : 飛行高度
- S 、 S' : 計測幅

の設定範囲は計測機器ごとに最大値が決まっている。値が大きいほど照射されるレーザ点が多いため、レーザ反射点密度は大きくなる。通常パルスレートは最大として計画を立てる。

4) スキャンレート

スキャンレート(スキャン周波数)とは1秒間にミラーが往復する回数のことである。スキャンレートが大きいほど進行方向のレーザ反射点間隔が短くなる。一方、スキャンレートと1スキャンあたりのレーザ反射点数(進行方向と直交する方向のレーザ反射点数)の積であるスキャンレートには、上限があるために1スキャンあたりのレーザ反射点数は減少する。

また、スキャンレートが大きければ進行方向でのレーザ反射点密度は増加し、1スキャンあたりのレーザ反射点数は減少する。小さければ進行方向でのレーザ反射点密度は減少し、1スキャンあたりのレーザ計測点数は増加する。飛行速度も進行方向の反射点間隔に影響を与えるが、固定翼機の場合最低速度の制限がある。そのため、スキャンレートを大きくすることで、進行方向の反射点間隔を狭くし、進行方向のレーザ反射点密度を高くできる。

5) スキャン角度

スキャン角度とはレーザ反射ミラーが往復する角度(最大振幅角)であり、進行方向と直角方向のデータ取得範囲とレーザ反射点間隔に影響を与える。つまり、スキャンレートとパルスレートが一定の場合、スキャン角度が狭いほど飛行方向に直行する方向のレーザ反射点密度は大きくなるが、計測幅は小さくなる。その場合、計測幅が小さくなるためコース数を増やしてコース間隔を狭く設定する必要が出てくる。逆にスキャン角度が大きくなると計測幅は広くなるが、飛行方向に直行する方向のレーザ反射点密度は小さくなる。またコースの端では地表に対してレーザパルスが斜めに当たることになるため、高い建物などがある場合には陰になる部分が多くなる。

6) レーザ反射点密度

レーザ反射点密度は飛行計画を作成する際に最も重要なパラメーターである。レーザ反射点密度は航空レーザ測量業務の目的に応じて飛行計画の作成前にあらかじめ決定されるものである。他のパラメーター(飛行高度、スキャンレートなど)は要求されるレーザ反射点密度を満たすよう現地の地形特性などに基づいて決定する。この項ではレーザ反射点密度から計測時のパラメーターを決定する方法について説明する。

レーザ反射点密度が適切であるかを評価する方法には2種類ある。1つは存在確率による方法、もう1つは単位面積あたりのレーザ反射点数を用いて評価する方法である。このうち存在確率による方法は、目的のレーザ反射点密度を得るために理論上の数式にレーザ反射密度を当てはめてレーザ反射点間隔を決定する手法である。全てのレーザパルスで計測可能であり、かつ一定間隔で計測できるならば、平均的なレーザ反射点間隔 dx 、 dy が与えられたとき、辺の長さ a の正方形領域にレーザ反射点が存在する割合は以下の式で与えられる。

$$P = 1 - \left(1 - \frac{a^2}{dx \cdot dy} \right)^n$$

ただし、 $a < dx$ 、 $a < dy$ a : 正方形領域の一辺の長さ

P : 存在確率、 n : 計測回数、 dx : 航空機の進行方向のレーザ反射点間隔、

dy : 航空機の進行と直交方向のレーザ反射点間隔

例えば、レーザ反射点が 1.00m^2 に 1 点以上存在する範囲が計測範囲全体の 80% 以上であるという条件で計測を行う場合を考える。航空機の進行方向とこれに直交する方向でのレーザ反射点間隔を同一にすると仮定すると、数式に $P=0.80$ 、 $a^2=1.00$ 、 $n=1$ を代入して、 $dx=dy \doteq 1.118$ となる。ただし、計測時に計画どおりの飛行速度や飛行高度で飛行することができないことが考えられる。そこで、データ取得時に飛行コースの変動などでレーザ反射点密度が低下しても計画どおりのレーザ反射点密度が得られるように 1.4 倍のレーザ反射点間隔でデータを取ることを考える。この場合、 $dx = dy < 0.8\text{m}$ ($1.118 / 1.40$) となる。

飛行方向のレーザ反射点間隔 (dx) は、1 回のスキャンが行われる間に航空機が進行する距離と等しい。従って、飛行方向のレーザ反射点間隔は航空機が 1 秒間に進む距離をスキャンレートで割ることによって求めることができる。表 4-2 は、スキャンレート、航空機の対地速度、航空機の飛行方向のレーザ反射点間隔の関係を示したものである。まず初めに、表 4-2 から飛行方向でのレーザ反射点間隔が dx より小さくなるようなスキャンレートと対地速度の組み合わせを決定する。例えば、スキャンレートを 35Hz に設定した場合、対地速度が 200km/h 以下の時にレーザ反射点間隔が 0.80m 以下となり、条件を満たすことができる。

次に、要求されたスキャン方向 (進行方向と直角方向) のレーザ反射点間隔を満たすパラメーターの組み合わせを考える。スキャン方向のレーザ反射点間隔は、計測幅を 1 回のスキャンで発射されるレーザパルス数で割ったものとして定義される。表 4-3 はスキャンレート、計測幅、スキャン方向のレーザ反射点間隔の関係を示したものである。ただし、4-1-1. 2) 飛行高度の項で述べたように、計測幅はスキャン角に応じて変化する。この表はスキャン角 12° の場合の表である。スキャン角度を決定 (12°) したら、表 4-3 からスキャン方向のレーザ反射点間隔が dy より小さくなる対地高度を決定する。この例では、スキャンレートを 35Hz に決定した場合、対地高度を 650m 以下とすればよいことが分かる。またその場合の計測幅は 276m となる。

表 4-2 飛行方向レーザ反射点間隔
 〈国土地理院・朝日航洋株式会社 2000 を改変〉

対地速度		スキャンレート(単位:Hz)											
km/h	knot	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
130	70	3.61	1.81	1.20	0.90	0.72	0.60	0.52	0.45	0.40	0.36	0.33	0.30
140	76	3.89	1.94	1.30	0.97	0.78	0.65	0.56	0.49	0.43	0.39	0.35	0.32
150	81	4.17	2.08	1.39	1.04	0.83	0.69	0.60	0.52	0.46	0.42	0.38	0.35
160	86	4.44	2.22	1.48	1.11	0.89	0.74	0.63	0.56	0.49	0.44	0.40	0.37
170	92	4.72	2.36	1.57	1.18	0.94	0.79	0.67	0.59	0.52	0.47	0.43	0.39
180	97	5.00	2.50	1.67	1.25	1.00	0.83	0.71	0.63	0.56	0.50	0.45	0.42
190	103	5.28	2.64	1.76	1.32	1.06	0.88	0.75	0.66	0.59	0.53	0.48	0.44
200	108	5.56	2.78	1.85	1.39	1.11	0.93	0.79	0.69	0.62	0.56	0.51	0.46
210	113	5.83	2.92	1.94	1.46	1.17	0.97	0.83	0.73	0.65	0.58	0.53	0.49
220	119	6.11	3.06	2.04	1.53	1.22	1.02	0.87	0.76	0.68	0.61	0.56	0.51
230	124	6.39	3.19	2.13	1.60	1.28	1.06	0.91	0.80	0.71	0.64	0.58	0.53

表 4-3 スキャン方向レーザ反射点間隔
 〈国土地理院・朝日航洋株式会社 2000 を改変〉

対地高度		スキャンレート(単位:Hz)											
M	m	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
400	170	0.07	0.14	0.20	0.27	0.34	0.41	0.48	0.54	0.61	0.68	0.75	0.82
450	191	0.08	0.15	0.23	0.31	0.38	0.46	0.54	0.61	0.69	0.77	0.84	0.92
500	213	0.09	0.17	0.26	0.34	0.43	0.51	0.60	0.68	0.77	0.85	0.94	1.02
550	234	0.09	0.19	0.28	0.37	0.47	0.56	0.65	0.75	0.84	0.94	1.03	1.12
600	255	0.10	0.20	0.31	0.41	0.51	0.61	0.71	0.82	0.92	1.02	1.12	1.22
650	276	0.11	0.22	0.33	0.44	0.55	0.66	0.77	0.88	0.99	1.11	1.22	1.33
700	298	0.12	0.24	0.36	0.48	0.60	0.71	0.83	0.95	1.07	1.19	1.31	1.43
750	319	0.13	0.26	0.38	0.51	0.64	0.77	0.89	1.02	1.15	1.28	1.40	1.53
800	340	0.14	0.27	0.41	0.54	0.68	0.82	0.95	1.09	1.22	1.36	1.50	1.63

(スキャン角は 12° に固定して計算)

4-1-2. 計測諸元の代表値と関係式

計測パラメータの代表値は表 4-4、パラメータ同士の関係は概ね表 4-5 の通りである。

表 4-4 計測パラメータの代表値

主なパラメータ	代表値
レーザパルス周波数（パルスレート： f ）	2～33 kHz
スキャン周波数（スキャンレート： f_s^* ）	5～60 Hz
スキャン角度（FOV:Field of View: θ^* ）	0～60°
レーザビームの拡散度合い（フットプリントの大きさ）	0.2～2.5 mrad
計測幅（ S ）	～2,000m
計測可能高度範囲（ h ）	50～2,000m(回転翼機) 175～3,000m(固定翼機)
対地速度（ v ）	50～200 km/h(回転翼機) 180～340km/h(固定翼機)

* 一定の制限内で可変

表 4-5 計測パラメータの関係

	往復ミラーの片側スキャン、 回転ポリゴンミラーの場合	往復ミラー両側スキャンの場合
1スキャンラインあたりのレーザ反射点数	$N = f / f_s$	
計測幅	$S = 2h \tan(\theta / 2)$	
進行方向と直交する方向のレーザ反射点間隔	$dy = S / N$	
進行方向のレーザ反射点間隔	$dx = v / f_s$	$dy = 0 \sim v / f_s, \overline{dx} = v / 2f_s$
観測点密度	$\rho = 1 / (dy \times dx) = f / Sv$	$\rho = 1 / (dy \times \overline{dx}) = 2f / Sv$

* $\overline{dx}$ は dx の平均

4-1-3. GPS 基準局

GPSに関する注意点は通常のGPS測量の場合と同様である。地上GPS基準局は上空の視界が開けている計測地域からなるべく近い地点に設置する。

連続キネマティック測位の場合は、常時4つ以上の衛星からの信号を受信している必要がある。衛星の組み合わせが変わっても必要な衛星数さえ確保されていれば精度に問題はない。従って同一の衛星を測量の開始から終了まで常に観測する必要はない。また、連続キネマティック測位では、ある位置での観測は1回しか行われず、事実上再計測は不可能であるので、PDOP (Position Dilution of Precision: 精度低下率) の値には特に注意する必要がある。PDOP が5以上になると予想される場合には観測を実行するべきではない。(PDOPの詳細については4-2-2を参照)

電子基準点データは国土地理院の1秒読み観測データの利用申請を行うことで簡単に入手可能である。電子基準点が整備されてから10年経過しているために、その選定には周辺樹木の生長や建物の建設などにより、周辺環境が変化し、観測の際にノイズが発生する可能性も留意しなければならない。従って、使用する電子基準点の周辺状況を事前に確認することが望ましい。

4-1-4. 計測地域の特性

飛行計画を立てる際には、計測地域の植生状況や計測時期、地形特性を考慮しなければならない。これらは反射点密度に影響を与えるため、計画段階で十分検討しておく必要がある。

1) 植生状況

航空レーザ測量によるDTMデータ取得可能性は、主に下層植生の発達度や樹冠密度に依存する。また、樹木域に関しては、落葉性の植生が繁茂する地域では、レーザ光が地表面まで到達するための障害となる葉の状況が夏と冬とでは大きく異なるため、季節的な影響も無視できない。従って、高密度のDTMデータの取得が目的ならば、事前に計測地域の植生を調査・予測して対処策を考えなければならない。植物の葉が繁茂している地域では地表面まで届くレーザ反射点密度は減少し、作成されるグリッドの精度は落ちるため、できるだけ樹勢の弱い時期(落葉広葉樹林地域では落葉期)に計測を計画すると同時に、レーザ反射点密度が大きくなるような計測諸元を設定するとよい。

また、樹木域や草本域では、葉や枝に当たって戻ってくるレーザ反射点データと地表面まで達して戻ってくるレーザ反射点データが取得される。下記の点に留意しつつ全レーザ反射点データをこの2つに分類するフィルタリングを適用することにより、樹高や地表面の標高(すなわち地形)を計測することが可能となる。

- 落葉性の植物が繁茂する地域においてDTMが必要な場合は、できるだけ樹勢の弱い落葉期から翌年の新芽が開く展葉期までを選んで計測する。逆にDSMが必要な場合は、樹勢の強い時期が有利である。
- 樹高を高精度に把握するためには夏季と冬季の2時期のレーザ反射点データを取得し、それらを比較することが望ましい。しかし、計測コスト削減のためには、樹木と地表両方からのレーザ反射点

データが適度に得られる春や秋の葉の状態を見計らって1回だけ計測を行い、このレーザ反射点データをフィルタリングによってDSMデータとDTMデータに分離する方法もある。

- 常緑樹、草、竹が密生している区域では、レーザスキャナによるDTMの取得は困難である。ただし、これは空中写真測量においても同様である。
- 高精度のDTMが取得可能な樹種として次のようなものが挙げられる。冬季の落葉広葉樹林、樹冠密度が低い落葉広葉樹林、下層植生の発達が少ない単一な落葉広葉樹林や人工林。
- 地表面からのレーザ反射点データの精度が劣る樹種として次のようなものが挙げられる。樹幹密度の高い針葉樹林や竹林、常緑広葉樹林、下層植生がシダや笹のように密生している場合。
- 混合林/複層林では、地表面に到達するパルス数が減少することや、樹高のばらつきが大きいためにフィルタリングの設定が難しくなることなどから、地表面からのレーザ反射点密度が低下する。

2) 地形状況の影響

地形と飛行方向の関係によって、地表面からのレーザ反射が異なり、計測の陰になる部分も出てくる。また、急傾斜地ではレーザ反射点データがコース間でオーバーラップせずに欠測箇所が生じてしまう可能性が高くなる。これらの問題を解消し、高密度のレーザ反射点データを得るためには、斜面に沿って飛行高度を数段階設定する、進行方向と直交する方向に飛ぶなど、欠測を補う対策を講じなければならない。

山地斜面においては、斜面の上部と下部ではレーザ反射点データの斜距離が異なる(図4-5)。4-1-1の飛行高度の項で述べたように、山裾側では地表面までの斜距離が長くなり反射点密度は低くなる。特に急傾斜地の場合は複数のコースで同一の高度を飛行するのでなく、地表面の起伏に応じて基準面を数段設定し、地表面までの距離がなるべく同じになるように飛行計画を立案する必要がある。

特に、地形特徴把握の観点からデータ取得をする場合、段丘やのり面などの斜面地形においては、レーザの照射角度を調整しないとレーザ反射点密度が不十分で遷急線や遷緩線などの位置が明瞭に取得できず、斜面形状をうまく表現できないことがある。図4-6のように、斜

面の傾斜が急な地域においては、斜面を真上から見た場合の面積(地図のような平面に投影した場合の面積)に比べて立体的な形状を考慮した表面の面積は大きい。従って急斜面で真上から計測を行うと、緩斜面の場合に比べて表面の面積あたりのレーザ照射密度は小さくなってしまふ。このような地域を計測する場合は、事前の計画段階で斜面の傾斜方向を考慮してコース間隔やスキャン角度の設定をする

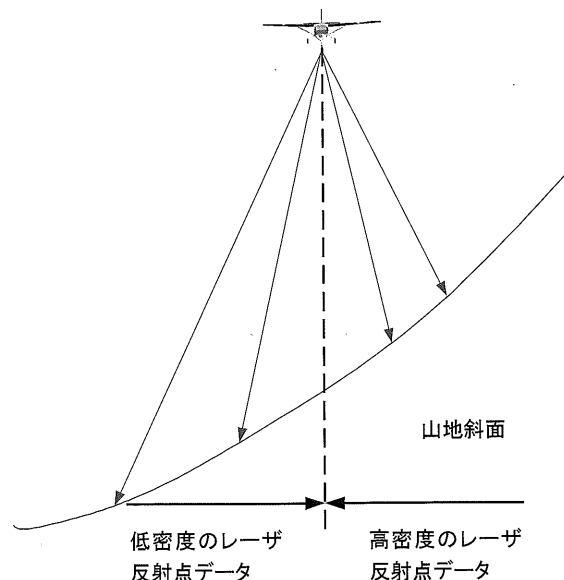


図 4-5 山地斜面における計測状況

ことや、隣接するコースとのオーバーラップを大きくしてレーザ反射点データを取得することにより、レーザ反射点密度を増やすといった対策が重要となる。また、斜面の傾斜方向に飛行コースを設定する(図 4-6 の例では紙面の左右方向)と、真上からのみしかレーザ光が照射されないで急傾斜部では表面の面積あたりのレーザ反射点密度が低くなる。そのため等高線と平行にコースを設定し(図 4-6 の例では紙面と垂直な方向)、斜面に対してレーザ光がなるべく垂直に当たるように計画する。

あるいは対象物がオ

ーバーハングやそれに近い立体形状の場合、地上型のレーザスキャナで取得したレーザ反射点データと組み合わせたり、現地補足測量を行ったりすることによって低密度のレーザ反射点データを補足することも考慮する。また、航空レーザ測量のレーザ反射点間隔は 2m 程度であることが多く、擁壁など構造物のデータ取得は難しい。これらのレーザ反射点データを得るためには、上述した急傾斜地での計測と同様に、レーザ反射点密度が高くなるような飛行計画を意識的に立案しなければならない。

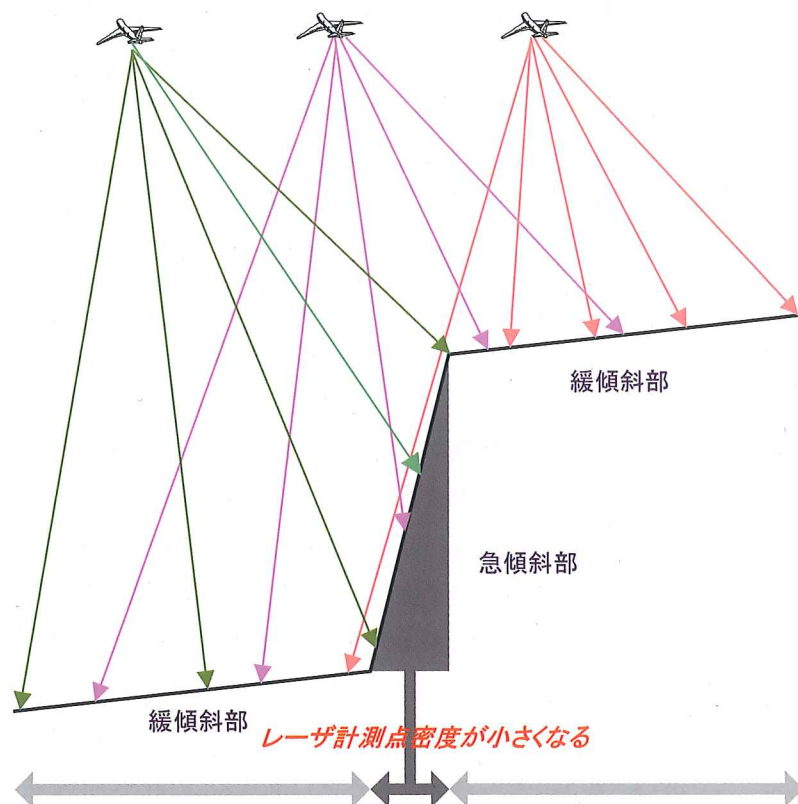


図 4-6 のり面など急傾斜部を含んだ場合

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

急傾斜地では、真上から見た場合の面積に比べて立体的な形状も考慮した実際の表面の面積は大きくなる。従ってレーザ光を真上から照射した場合、急傾斜地では実際の表面の面積あたりのレーザ計測点密度は低くなってしまう。レーザ計測点密度が低いと、遷急線や遷緩線など地形を計測する上で重要な特徴が得られない場合がある。レーザ計測点密度を高くするためには、斜面に対してより垂直にレーザ光が当たる飛行コース(緑色)を設定して計測を行う必要がある。

3) 計測時期(気象条件、季節的な影響)

季節的な影響として、積雪が存在する場合は、雪がうっすらと積もった状態の方が、地表でのレーザ反射率は良く、計測に有利である。しかし、積雪深が大きいと、地表面と雪面の高さの違いが問題となり、DTM の計測には不向きである。逆に DTM が既知ならば、計測値と DTM との標高差から積雪深を知ることができる。

4-1-5. レーザ反射点データの欠測およびノイズ

航空レーザ測量で使用されるレーザ光の波長は $1.06\mu\text{m}$ であり、これは近赤外線領域 ($0.77\sim 1.5\mu\text{m}$) になる。可視光域に近いので、肉眼で見えるものであれば概ね計測が可能である。つまり、航空機から見える範囲内に雲があれば雲でレーザ光が反射され、樹木が疎で地面が見えれば樹木と地面でレーザ光が反射される。この点においては写真測量と同様であるが、計測状況によっては、必要なレーザ反射点群が得られない「欠測」や、不必要なものを計測してしまう「計測ノイズ」が生じる場合がある。計測を行う地域に欠測の可能性がある対象物が見られる場合にはコース間隔を狭くすることにより、欠測を補足するような飛行計画を立てる必要がある。

1) レーザ反射点データの欠測

レーザ反射点データが欠測である場合として次のようなケースがある。

水面: 水面でのレーザ光の反射は(散乱がない)鏡面反射であり、レーザスキャナの方へ反射光が返らない。従って、以下の例外を除き、水面でのデータ取得はできない。

- ① 飛行コースの直下では、鏡面反射による反射光がレーザスキャナの方に向かうため、計測が可能である。
- ② 水面が波立っている場合は、光の入射角が0となる部分があり、その部分からの鏡面反射による反射光がレーザスキャナの方に向かうため計測できる可能性がある(飛行コース直下に近いほど計測可能性が高い)。
- ③ 表面に浮遊物が存在する、または水が濁っている場合、これらの物体による反射のため、計測できる場合がある(感度を上げると水底からの反射を拾う場合があるので注意を要する)。

水面に関しては、レーザ反射点データの欠測が顕著であるため、レーザ反射点密度を計算する際に、水部の面積は除外した範囲で計算を行うことが多い。

河川や水面の凍結した場所: 乱反射ではなく、鏡面反射が起こる可能性があり、この場合は受光部分にレーザ光が返りにくい。

アスファルト: 純粋なアスファルトは、レーザスキャナが用いる近赤外光をほとんど吸収してしまうため、計測できない。しかし、使用されて表面が汚れてくると、この問題は解消する。なお、アスファルト道路に描かれた白線などは計測可能である。また、降雨後は水面と同じような状態となり、鏡面反射を起こすためにレーザ光が返らないことがある。

住宅の屋根: 新興住宅地などに多く見られる黒色の屋根(アスファルトシングル:フェライトにアスファルトをしみ込ませた屋根材)の場合に、レーザ光が吸収されてしまい返らないことがある。

建物: 急傾斜地と同様に飛行方向によってはレーザ光の陰の部分が発生する。

2) レーザ反射点データのノイズ

計測ノイズが発生する場合として次のようなケースがある。

煙・排気ガス: 自動車の排気ガスや煙等に含まれるエアロゾルがレーザ光を反射すると、その粒子の位置が計測されてノイズが発生する。たとえば交通量の多いトンネルの入り口付近では路面上数 m 付近にノイズデータが多数発生することがある。

建物: ガラスのカーテンウォールなど、建物の壁材によっては鏡面反射を起こして擬似透過ノイズが発生する(図 4-8)。レーザ光の照射方向は固定されており、反射して戻ってきたレーザ光の距離を測るために、このような現象が起こると考えられ、実際よりも斜距離が長く計測される。その結果、本来は建物の内側である場所に見かけ上の計測点(擬似透過ノイズ計測点)が生じてしまう。

水際: 河川計測の際に水面の境界部分にごくまれにノイズが生じる。原因は、建物の場合と同様水面の鏡面反射による擬似透過ノイズと推定される。

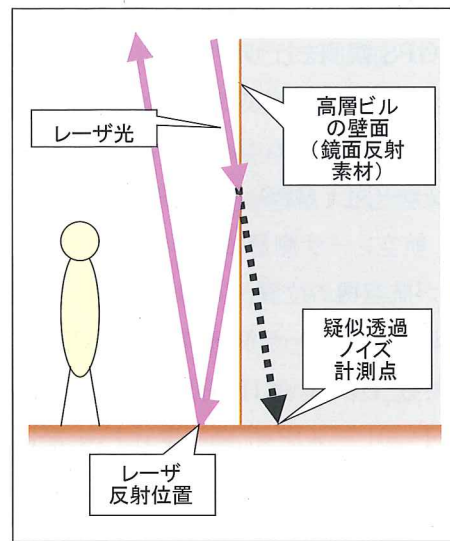


図 4-8 擬似透過ノイズ

4-2. 計測の実施

飛行計画に則して、計測を実施する段階においては、GPS 基線距離とデータ精度、GPS 観測を行う時間帯(GPS 衛星配置、PDOP に関連)、サイクルスリップについてチェックを行う。これらの3項目を配慮しないで計測を実施すると、計測データが全く取得されなかったり、レーザ反射点データの精度が劣ったりする場合が生じる。

4-2-1. GPS 基線距離とレーザ反射点データの精度

地上 GPS 観測を行う際の基準局の位置は、航空機の位置と姿勢を算出する際の精度を高く保つために、計測対象地域からあまり離れていないほうがよい。地上 GPS 基準局と機上 GPS 観測局の距離(基線長)が長すぎると、電離層や大気中の水蒸気による電波遅延等の誤差を十分消去できず、基線解析の誤差が大きくなってしまいます。また、地上と機上で同じ衛星を捉えていなければならないが、基線長が長くなるとその数が減少し、計測後の GPS 観測データの処理において、測位できない、あるいは衛星の配置が悪く処理結果の精度が大きく低下してしまう可能性がある。実験によると、基線長の増加とともに観測精度は低下するが、少なくとも基線長 50km 程度までは必要な精度を十分確保できることが分かっている。また、実験レベルでは VRS 方式を用いてかなり長い基線長においても計測が成功しているため、今後ますますこの距離は延びていくことが予想される。

4-2-2. GPS 観測を行う時間

GPS 観測を行う時間帯は、GPS 衛星の配置状態を示す PDOP (Position Dilution of Precision: 位置精度低下率) が良好である必要がある(図 4-9)。GPS 衛星の配置状況を調べるには、Trimble 社のホームページ(<http://www.trimble-j.com/gps/satinfo/index.htm>)から専用の解析ソフトをダウンロードし、GPS 衛星軌道暦ファイルを利用すると、衛星数や衛星の配置状況を確認することができる。航空レーザ測量においては、GPS の連続キネマティック測量によって計測を行っているため、衛星数が航空機の位置決定精度に影響してくる。

また、航空レーザ測量終了後に GPS 解析を行う際、計測時における DOP の状況を確認することができる。DOP には HDOP (水平位置精度低下率)、VDOP (高さ位置精度低下率)、TDOP (時間精度低下率)、PDOP (位置精度低下率: HDOP と VDOP を組み合わせたもの) の4種類があるが、測位では PDOP の状況から判断する。PDOP の値が最大でも 2.4 程度である場合は GPS 衛星の観測は良好であると言える。PDOP の状況を判断する数値としては、1 が最適であり、数値が大きくなるにつれて衛星配置状態が悪くなる。一般に数値が 5 以下であれば実用上問題がない。

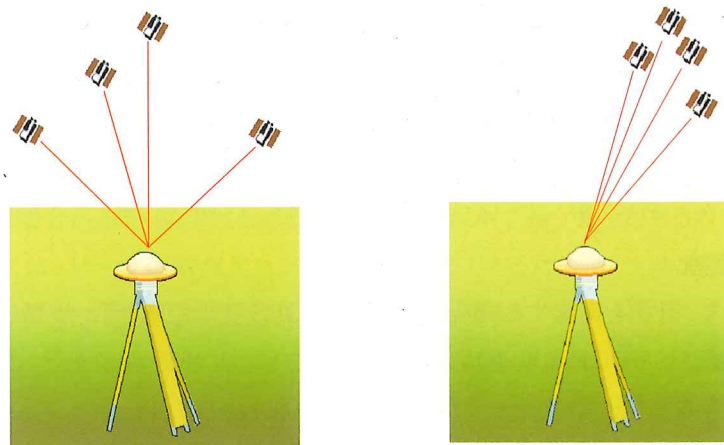


図 4-9 PDOP の良い状態と悪い状態

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

観測可能な衛星数が同じでも衛星の配置によって PDOP は異なり、観測精度も異なる。左図は衛星が上下左右に散らばっており、PDOP は低く、観測精度は高い。右図では衛星が特定の方向に偏っており、PDOP は高く観測精度は低い。

第5章 レーザ反射点密度の点検

必要なレーザ反射点を得るためには地形や建物など影響を考慮して適当な飛行計画を作成する必要がある。しかし、計測地域全域で適切な計画点密度になるように飛行計画を作成し、これに従って飛行してレーザ反射点を取得したとしても、いくつかの要因のため取得されたレーザ反射点の密度に濃淡が生じる。レーザ反射点の密度が低い領域では、目的のレーザ反射点の精度が達成できない可能性があるため、計測終了後に要求を満たすレーザ反射点密度を満足できたかどうかを検証する必要がある。

5-1. レーザ反射点密度に粗密を生じさせる原因

レーザ反射点密度に粗密を生じさせる原因はいくつかある。1 番目の要因として、計画された飛行コースと実際の飛行コースのずれが考えられる。一般に気流の影響などにより計画どおり飛行することは困難である。コース間でレーザ反射点の取得できない領域が生じないように隣り合うコースとのレーザ反射点の取得地域はある程度重なるように飛行計画は設計されるが、実際の飛行コースが計画されたコースからずれた場合には隣り合う飛行コースとの間でレーザ反射点を取得できない領域が生じる可能性がある。

2 番目の要因としては地形の起伏や大きな構造物の影の影響が考えられる。地形の起伏が激しい個所や、大きな構造物が建っている個所では、尾根の影、建物の陰になる個所が生じてしまい、レーザ反射点を取得することができない。飛行計画作成時には、陰になる領域がなるべく少なくなるように飛行計画を作成する。例えば、急峻な尾根が存在する場合は尾根の斜面の両側からレーザ反射点の取得を行うように飛行コースを設定し、陰になる領域が存在しないように飛行計画を設定する。しかし方向の違う尾根が組み合わせているような山岳地域や、大きな構造物が密に存在しているような都市地域では、陰になる部分を完全に無くすことは難しい。陰になった部分では反射点が存在しないため、陰になる領域が大きく広がっているような場合にはその部分で最終データの信頼性が低下することになる。また、地形の傾斜角度とレーザ照射角度の関係によっては、レーザ光が斜面に垂直に照射されるような領域ではレーザ計測点密度は高くなり、逆にレーザ照射角と斜面の傾斜が平行に近くなるとレーザ反射点密度は低くなる。

3 番目の要因として、レーザ照射角度の違いによるレーザ反射点密度の違いが考えられる。レーザスキャナの種類によっては、レーザ照射角度の小さい飛行コースの直下でレーザ反射点の密度が低く、逆にレーザ照射角度の大きい個所ではレーザ反射点の密度が高くなる(1-2-3.「レーザ反射ミラーの種類」参照)。この場合は、平均的なレーザ反射点密度を評価するだけでは不十分で、それぞれの地点ごとにレーザ反射点密度の評価を行う必要がある。

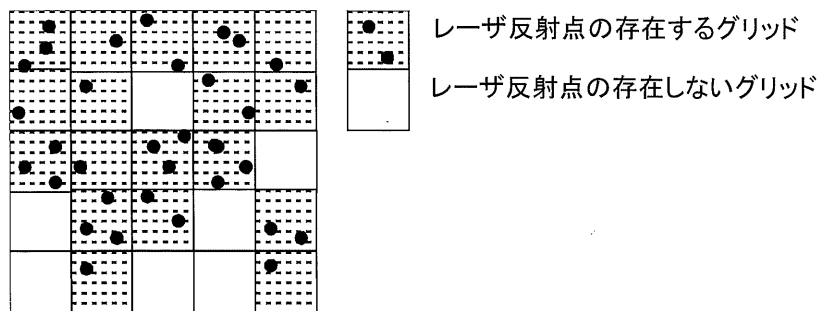
以上のように、様々な要因のため、全ての地域において均質な密度でレーザ反射点を取得することはできない。飛行計画時に考慮する点密度は、取得されるレーザ反射点の密度が一様であると仮定して算出されたものであり、実際のレーザ反射点の取得密度には局所的なばらつきが存在する。レーザ反射点の密度が低い場所では最終的に作成される等高線や数値標高モデルの精度が低下するため、レーザ反射点が存在しない地域をなるべく少なくすることが望ましい。従って取得されたレーザ反射点

を点検し、所定のレーザ反射点密度が得られているかどうかを確かめなければならない。

5-2. レーザ反射点密度の点検方法

レーザ反射点データの密度点検には、計測地域を最終成果となる DEM のグリッドサイズ程度の小さな四角形(グリッド)に区切り、それぞれのグリッド内にレーザ反射点があるかどうかを調べて、レーザ反射点が存在するグリッド数と計測地域内の全てのグリッド数との割合を計算するのが望ましい。

図 5-1 はレーザ反射点の存在するグリッドの割合を計算する方法を示している。図中の黒い点はレーザ反射点を示している。レーザ反射点があるグリッド内に 1 点以上存在する場合には、そのグリッドは存在するグリッドと判定される。図中では網がけされたグリッドとして示されている。この例の場合、レーザ反射点が存在するグリッドは18グリッド、全体のグリッド数は25グリッドであるので、レーザ反射点の存在するグリッドの割合は 72%となる。



$$\text{レーザ反射点群の存在するグリッドの割合} = \frac{[\text{レーザ反射点群の存在するグリッド数}]}{[\text{全体のグリッド数}]}$$

図 5-1 存在点群グリッドによる手法

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 を改変)

作業範囲全体を区切った各グリッドにレーザ反射点群が存在するかどうかを判定し、全グリッドに対する点群の存在するグリッドの割合を計算式により算出する。

領域全体でのレーザ反射点の総数が多くても、レーザ反射点が偏って存在してレーザ反射点の存在しないグリッドが多いと、レーザ反射点密度が十分でない部分で DEM の精度が確保されない可能性が高くなる。逆にレーザ反射点の存在しないグリッドが少ない場合は、場所の違いによるレーザ反射点密度の差が小さく、均質な精度を得ることができ、データの品質が高いといえる。東京都八王子地区において、斜面の地形特徴把握を目的として計測を行った事例(国土地理院、2003)では、レーザ反射点の存在するグリッドの割合が 85%以上という条件で計測を行い、良好な結果を得ることが出来た。また茨城県つくば地区において建物や地物などの変化抽出を目的として計測の行った事例(国土地理院、国際航業株式会社、2001)では、レーザ反射点の存在するグリッドの割合が 85%以上という条件で計測を行い、建物などの材質の影響による欠測はあったもののほぼ良好な結果を得ることが出来た。以下に事例を示す。

1m²に1点以上レーザ反射点が存在する確率が85%以上という仕様により、山間部斜面3地区に対して計測を行った。斜面A、B、C地区はともに山間部斜面地域であるが、斜面下部や周辺を開拓されて住宅地が広がっている。計算の結果得られたレーザ反射点の存在するグリッドの割合は、A地区：92.05%、B地区：86.62%、C地区：90.54%となり、いずれも85%以上の割合になった。一方、単位面積当たりの平均レーザ反射点密度を計算すると、A地区：2.74、B地区：2.26、C地区：2.81となった。つまり、全体を平均して見ると、単位面積当たりでは1m²に2点以上の反射点が存在している。またレーザ反射点の偏りを考慮して1m²に1点以上という存在条件を与えてもその条件を満たすグリッドの割合は85%以上であり、データの取得状況は良好であるといえることができる。

表 5-1 反射点密度の点検結果

対象 地区	計測面積 ①(m ²)	レーザ反射 点群数 ②	グリッド数 ③	レーザ反射点の存 在するグリッド数 ④	レーザ反射点の存 在するグリッドの割 合 ④/③(%)	レーザ反射点の 平均反射点密度 ②/①(点/m ²)
A	2,000,000	5,485,181	2,003,001	1,843,773	92.05	2.7426
B	1,981,854	4,481,253	1,977,795	1,713,164	86.62	2.2611
C	2,309,999	6,488,156	2,306,202	2,088,097	90.54	2.8087

* 計測面積とグリッド数が合致しないのは、計測地域が不定形のためである

第6章 取得データの精度検証に関する検討

6-1. システムの精度と誤差要因

航空レーザ測量システムはレーザスキャナ、機上 GPS 受信装置、IMU、地上 GPS 基準局などを組み合わせた、いわば総合的な測量システムである。このため、それぞれの測量機器に起因する誤差の累積が最終的なレーザ反射点座標の計測誤差となる。また、DTM を求めるためには、レーザ反射点のうちで地上点のみを識別する処理(フィルタリング)が必要である。フィルタリングが適切に行われなかった場合、樹木などの標高が地表面標高として採用されることになり、十分な利活用が出来ないデータとなる。

この章では前者の点計測誤差について述べる。フィルタリング処理については第7章で述べる。

6-1-1. GPS 測量に起因する誤差

連続キネマティック測量により、レーザスキャナ本体の位置が求められるため、位置の誤差は通常の連続キネマティック測量と同じく対象地域と GPS 地上基準局との距離(基線長)や電波状態に依存する。

データ取得時のセンサの位置計測は、移動体の連続キネマティック測量を用いている。このため、正常に連続キネマティック測量が行われた際の誤差は数 cm 前後と期待される。ところで、航空レーザ測量の精度劣化に対する最も大きな要因は、サイクルスリップである。サイクルスリップが発生した場合には観測の連続性が失われるが、IMU 計測データで補間し、整数値バイアスを決定することができる。しかし、いつでも再決定がうまくいくとは限らず、計測誤差を生じる場合もある。その他の GPS の精度に影響を及ぼす要因としては、GPS 衛星の数と配置、電離層や大気の状態、マルチパスの影響などが挙げられる。これらは通常の GPS 測量と同様である。連続キネマティック測量はキネマティック測量技術の延長線上にあり、精度などについてもそのまま適用できると期待される。キネマティック測量自体の誤差については、GPS 測量に関する文献に述べられている。

キネマティック測量では、計測開始前に整数値バイアス決定のために初期化を行う必要がある。この初期化の方法にはいくつかの方法があるが、最近開発された高速バイアス決定技術 OTF (On the Fly の略称。移動局のいかなる運動形態にも対応できるという意味であり、任意の場所で短時間で整数値バイアスを解く方法の総称)の登場が、キネマティック測量の汎用性を飛躍的に高めた。すなわち、OTF 以前の初期化の方法では、計測途中にデータ受信が短時間でも切断された場合(サイクルスリップなど)、一つ前の観測した点まで戻って再計測を行うことが要求されたが(航空機では不可能)、OTF の実用化によってキネマティック測量の弱点であった短時間の受信切断によるデータの使用不能の問題がほぼ解決された。ただし、OTF を用いるには計測距離に関わらず2周波数型受信機の使用が要求される。この OTF の実用化によってはじめて、連続キネマティック測量、ひいては航空レーザ測量が確立されたといっても過言ではない。

6-1-2. IMU による姿勢データの誤差

IMU システムの計測誤差は主に、3 軸まわりの傾きと加速度の計測の分解能およびデータ取得のた

めの飛行高度に依存する。IMU 計測誤差は主に水平位置の計測精度に大きく影響する。仕様によれば、一般的に航空レーザ測量に用いられている IMU の角度の精度は、ローリングとピッチング 0.02 度、ヘディング 0.05 度である。ただし、IMU による計測では、正しく計測が行われていても時間が経過すると測定値が次第にずれていき(ドリフト)誤差が生じる。従って一定時間毎に GPS 計測によって得られた座標値を用いてドリフト誤差を補正する必要がある。

その他に、取り付け時の IMU の位置と姿勢の計測誤差に起因する誤差が考えられる。

6-1-3. レーザスキャナによる距離計測の誤差

地上型レーザ測距儀と異なり、航空レーザ測量では同一点を複数回計測してその平均値を採用するなどの処理ができないため、精度を向上させることが難しい。レーザスキャナによる距離計測の精度は、主として高さ方向の精度に大きな影響をもたらす。

航空レーザ測量で用いるレーザスキャナの計測原理は、地上で用いるノンプリズム型光波測距儀とほぼ同じであるが、スキャンをしながら距離を計測するため、誤差要因として、①測距の誤差、②レーザ発射方向(スキャン角)の計測誤差の二つが挙げられる。

距離の測定誤差は 1 パルスあたり数 cm であり、通常のレーザ測量と同様に、反射地点までの距離が長くなるにつれて測定誤差は増大する(国土地理院, 1999)。レーザ発射方向の誤差は、対地飛行高度が高くなるほどレーザ反射点の水平方向の計測精度に大きく影響する。

レーザ光を利用して距離を測定する方法には大別して二つの方法がある。

1. レーザパルスを用い、光の往復にかかる時間を測定し、距離に換算する方法
2. 振幅変調された連続レーザ光を用い、射出光と反射光の間の変調の位相差を計測する方法。位相差の整数部分はわからないので、複数の変調周波数を用いてこれを決定する。

これらのうち、航空レーザ測量で利用されているのは、「1」の方法である。この方法では、1 回の計測で達成できる距離の測定精度は、数 cm 程度である。地上の計測においては測定回数を増加して測定値を積算し、平均値を用いることにより測定精度を向上させるが、航空レーザ測量の場合、プラットフォームが高速で移動するため、全く同じ点を複数回計測することはほぼ不可能である。

6-2. 精度検証手法の種類

航空レーザ測量のデータ精度に影響を及ぼす要因は非常に多岐にわたる。そこで、場合によっては、要求精度を保たっているかどうかについて、レーザ反射点データの精度検証を行うことも必要となる。検証を行った結果が機器精度に準じている場合は良好な結果であり、大きな誤差がある場合は調整が必要である。ここでは、精度検証手法について説明する。

航空レーザ測量によって得られたレーザ反射点データは、必要に応じて高さと平面位置についてコース間の整合と絶対精度を検証する。主な精度検証方法として、高さ方向については現地水準測量を

実施し、その結果と航空レーザ測量の高さを比較する方法がある。また、水平方向についてはレーザ反射点から等高線を発生させ、建物の形状を数値地図と比較して検証する手法がある。検証手法によってコストや検証可能な精度に違いがあるので、発注時には成果に求められる精度を明確にした上で、必要に応じてこれを確保できる最も容易な検証手法を選択するとよい。

6-2-1. コース間の整合検証

1) 重複コースの整合性検証

必要な範囲のデータを作成するには、通常複数の計測コースから得られたデータを利用する。そのため、コース毎のデータの間の整合性を確認しなければならない。そこで、隣り合うコースのレーザ反射点データが重複する部分において、高さおよび水平方向の整合性の点検を行い、点検結果からそれぞれの整合性がメーカー公称値よりも悪かった場合は調整を行う(例:図 6-1)。

2) コース間の高さ方向の整合性の点検

レーザ反射点データは、キャリブレーションによって設定値を補正しても、機器の設定値の違いや機体の姿勢、計算値の誤差などにより、接合するコース間で高さが異なる場合がある。この場合はコース間の高さ方向の整合性をとらなければならない。点検の方法は、断面による点検と面的な点検の2種類があり、点検によってコース間の高さ方向の整合が取れていない場合は高さを調節する。水平な面上、またはほぼ同一の地点で反射したと考えられるレーザ反射点を利用し、コースの違いによる高さの差を求めた場合、高さの差の標準偏差は 10cm 以内に収まるのが普通である。

断面による点検は、隣り合うコースにおいて重複する部分のレーザ反射点データを切り取り、この範囲内において、2コースのレーザ反射点データの断面図を作成し、断面図から高さ方向の値のズレを読み取る(図 6-2)。この図の場合は、C4コースとC5コースの高さの間に飛行コースと平行にほぼ一定の差が生じており、その違いは約 80cm である。これは通常の航空レーザ測量で期待される精度を大きく上回っている。従って、この場合は κ (ヘディング)、 ϕ (ピッチング)、 ω (ローリング)の補正などを行って系統誤差により生じた高さ方向の違いを修正し、コースの境界などで段差が生じるのを防ぐ必要がある。

断面図を作成する方法は 2 次元での検証であり、この方法で大きな誤差が発見された場合には面的な検証も行ってどのような原因で大きな誤差が生じたのかを詳しく検証することが必要となる。面的な整合性を点検するには、切り出した範囲内の標高をコース間で比較することによって、高さ方向の検証を行う(図 6-3)。この場合は、飛行コースと平行に、ある側では C4 コースよ

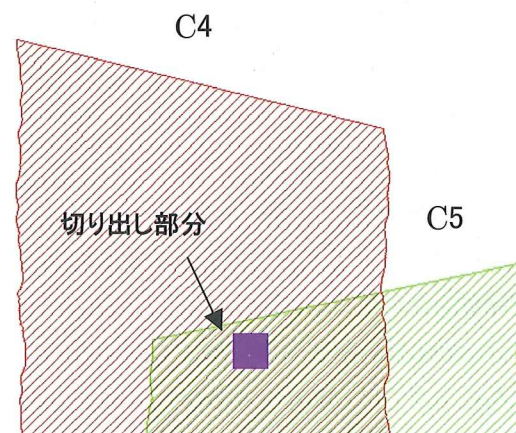


図 6-1 重複コースの切り出し部分
(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

り C5 コースの方が高く、逆の側では C4 コースより C5 コースの方が低くなっている。従って横揺れ(ローリング)の補正が不十分で鉛直方向が飛行方向と直交する向きに傾いていることがわかる。

以上の例からもわかるように、断面図を利用した方法により大きな誤差が発見された場合には、引き続き面的な整合性のチェックも行なって誤差が発生した原因を調査し、必要であれば系統誤差の補正や再度の計測飛行を行う必要がある。断面図を利用した方法により大きな誤差が発見されなかった場合には、面的な整合性のチェックを行う必要性は低い。

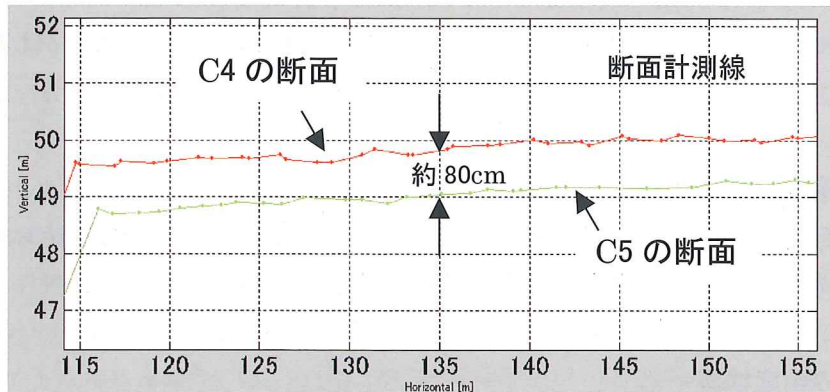


図 6-2 断面図による高さ方向の点検
(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

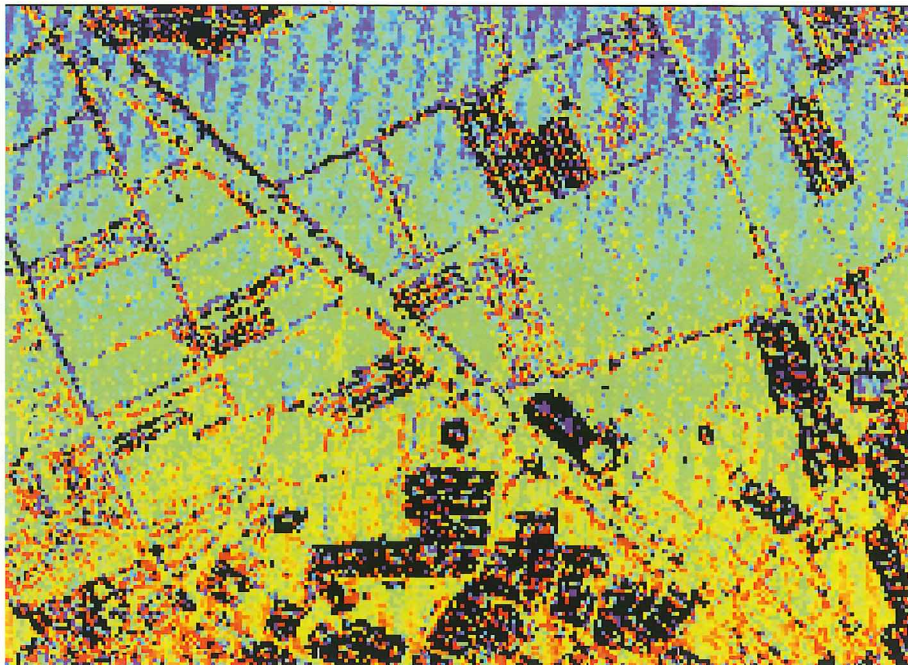


図 6-3 面的な整合性のチェックの例
(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

C4から C5の高さを引いたとき、プラスの場合が赤、マイナスの場合が青、差がない場合は緑で示される。飛行コースは図の左右方向であり、両コースの高さの差は飛行コースと平行な方向ではほぼ一定である。従ってこの場合ローリングの補正が必要である。

3) コース間の水平方向の整合性の点検

計測データについて水平方向の整合性を確認するために、重複する部分を切り出し、それぞれのコースで等高線を作成して重ね合わせて点検を行う。隣り合うコースにおいて重複する部分の反射点データを切り取り、両コースの反射点データに対して個別に等高線を作成する。それぞれの等高線を重ね合わせて、建造物を表現していると思われる等高線などを比較して等高線が一致していれば、隣り合うコースにおいて水平方向の整合性は良好であるといえる。レーザ計測点密度やデータの用途にもよるが、等高線のずれが1次元方向のレーザ計測点密度の半分程度であれば十分整合が取れているといえる。

6-2-2. 高さの精度検証

コース間の接合検証は、相対的なもので現地作業が不要な簡便な手法であるが、絶対的な高さを検証することが出来ない。ここでは、絶対的な高さを検証する手法について述べる。

1) 高さ方向の精度検証

高さ方向の精度検証は、「水準測量結果との比較」、「1 / 2,500 都市計画図との比較」などの手法が挙げられるが、水準測量を実施してその結果とレーザ反射点の高さを比較する手法が確実である（表 6-1）。水準測量には標尺と水準儀を用いる直接水準測量と、トータルステーションで斜距離と鉛直角を計測して標高を測量する間接水準測量がある。

表 6-1 高さ方向の精度検証手法
(国土地理院・国際航業株式会社 2002 を改変)

手法	図例	検証内容	備考
水準測量結果との比較		水準測量結果と、レーザ反射点の高さを比較し、メーカー公称値内に収まっているかを検証する。	水準測量実施箇所周辺のレーザ反射点の標高を平均して比較する。水準測量には直接水準測量と間接水準測量がある。
既存の地図との比較		都市計画図など既存の地図上で高さが示された箇所において、レーザ反射点の高さを比較する。	地図自体の精度も考慮する必要がある。

2) レーザパルスが地表面で反射されたことが明らかな場所での実測検証点との比較

国家水準点の標高を用いて、直接水準測量で実測検証点を高精度に設置する。国家水準点は、国土地理院のホームページ (<http://cpservice.gsi.go.jp/kijunten2k/>) から検索できる。現地の状況など

に応じ、間接水準測量、GPS 測量を利用する場合もある。高橋(2000)によると、上空視界の開けた平坦な道路上に 28 点の実測検証点を直接水準測量で設置し、実測値を真値としてレーザスキャナの高さの計測誤差を調べたところ、平均二乗誤差は 0.2 m であった。

高さの精度に関して最も高精度の検証方法は、直接水準測量結果との比較であるため、この検証方法が現在の主流となっている。しかし、この方法は現地作業を行うため、時間も人件費もかかる。内訳としては、現地までの交通費、現場作業員の人件費(現地水準作業は通常は 2 人以上で行う)、水準測量のための機材準備などが挙げられる。計測対象範囲が広範囲になるほど、現地水準測量の実施箇所も多くなる。また、現地作業は天候によっても影響を受けるため、滞在期間も長くなる場合がある。このような理由により、直接水準作業による検証法は、精度は高いが費用や時間を要する。

3) レーザパルスが地表面で反射されたか疑わしい場所での実測検証点との比較

これまでの調査・研究では、上空視界の開けた場所において実測検証点の標高と近傍のレーザ反射点(すなわち DTM データ)の標高の較差を調べた例が多い。この較差は、6-1 に述べたような航空レーザ測量システムを構成する測量機器の計測誤差の累積と捉えられる。しかし、実際には航空レーザ測量の全範囲で上空視界が開けているとは限らないこと、そして、7-2 で後述するフィルタリングによってレーザ反射点データが DSM と DTM に分類されることを考えると、上空視界が開けていない平坦地において、フィルタリング後のレーザ反射点(DTM)の標高が実測検証点の標高と、どの程度の較差があるか考慮する必要がある。以下にこの調査(佐藤、2003)の例を示す。

東京・八王子地区において間接水準測量で設置した実測検証点の標高と、実測検証点の近傍にあって、2002 年 8 月に対地高度 2,500m で計測された平坦地におけるレーザ反射点(DTM)の標高の較差を、3 つの土地被覆(落葉広葉樹、灌木・笹、草地)に分けて調べた。傾斜地(20° 未満)についても同様に較差を調べたが、反射点の平面的な位置は正しいと仮定している。間接水準測量を利用した理由は、直接水準測量が困難な山道を測量して実測検証点を設置する必要があったからである。間接水準測量で、実測検証点を誤差 3 cm 以内の精度で求めた。その数を、表 6-2 に示す。

表 6-2 実測検証点の点数

	落葉広葉樹	灌木・笹	草地
平坦地	1	7	27
傾斜地	1	14	2

平坦地と傾斜地における 3 種類の土地被覆ごとの平均二乗誤差を図 6-4 に示す。航空レーザ測量の標高の計測誤差は 15cm 程度であるので、平坦地の草地では、概ね航空レーザ測量システム自体の計測誤差の範囲内でレーザ反射点が計測できたと考えることができる。15cm よりも平均二乗誤差が大きい場所については、植生の表面で反射したレーザ反射点が DTM に混在していることを示唆している。とりわけ、落葉広葉樹よりも灌木・笹のほうが平均二乗誤差は大きく、レーザ光の地表面への透過が妨

げられていることを示唆している。

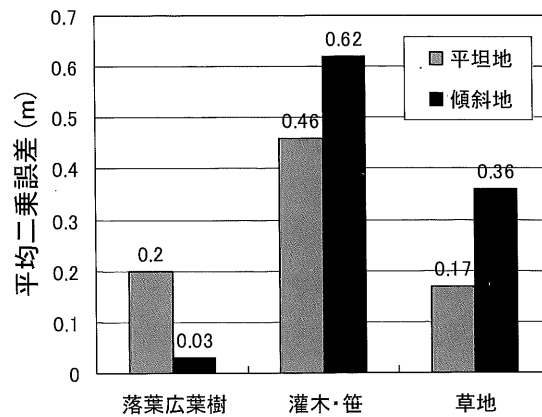


図 6-4 地形・土地被覆の違いによる標高較差の平均二乗誤差

4) 既存の地図との比較

都市計画図等の大縮尺地図を用い、図上で高さが示された箇所において、レーザ反射点の高さと比較することで検証を行う。ただし、地図の作成方法によるが、一般に地図の精度はレーザスキャナの公称精度より低く、大誤差の発見にしか利用できない。

6-2-3. 水平位置の精度検証

1) 水平精度の検証手法

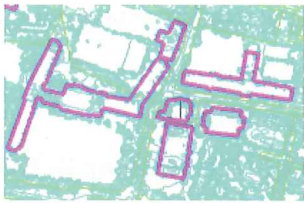
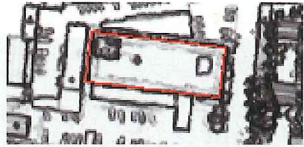
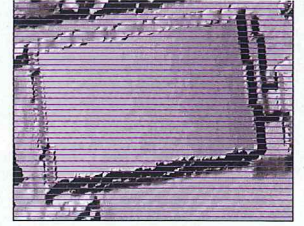
水平座標の位置精度を正確に評価することは難しい。これは、レーザ光の当たった位置を正確に知ることができないからである。

先に述べたように、レーザスキャナの計測誤差にはセンサの取り付け位置などのずれに起因する系統的な誤差と、計測時のGPS位置決定誤差やIMUの計測誤差に起因するランダムな誤差がある。このうち、系統的な誤差については計測開始前のキャリブレーションによって評価を行い補正することができる。また、レーザ反射点データがある特定の方向にずれていないかどうかを検証することで、計測後にも評価・補正を行うことができる。これは一般に系統的な誤差がある場合は、レーザ計測で得られた全ての点の座標が一定の規則性をもってずれるためである。従って個々のレーザパルスの当たった位置を正確に知ることが出来ない場合でも、後述するような方法で複数のレーザ反射点の座標のずれを統計的に評価することで系統的な誤差の評価を行うことができる。

レーザ計測の水平位置の精度検証を行う場合には、多数の反射点から建物の縁の水平位置などを統計的に求め、得られた値と実際の計測により求められた値とのずれを求めることにより間接的に精度を評価する方法が一般的である。一方、各点ごとのランダムな誤差の評価は、ほとんど不可能である。

検証手法としては、現地作業が必要なく短時間で検証可能な数値地図データを用いた手法が最も容易である(表 6-3)。すなわち、航空レーザ測量による等高線と数値地図の比較、航空レーザ測量による陰影図と数値地図との比較、建物の直線部分の比較などの手法が挙げられる。レーザデータから等高線や陰影図を作成し、ベクタデータである縮尺 1/2,500 の数値地図データや、縮尺 1/2,500 の地形図に記載されている、工場や学校などひさしのついていない垂直な壁面を持った建物との整合性を判断する検証方法である。こちらもデータが整備されていない地域が存在し、整備されていても入手のための手続きに時間がかかる場合がある。また、数値地図データと建造物の形状比較には個人の判断基準によるため、個人差が生じる。このように、精度検証は作業実施機関が独自の方法で検証を行って結果を判断しているため、厳密な比較ができないのが現状である。

表 6-3 水平方向の精度検証手法一覧
(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

手法	図例	検証内容	備考
等高線とDM		レーザ反射点から作成した等高線図と、DM*データの堅牢建造物の位置を検証する。水平精度がメーカー公称値内であれば良好な結果である。	DM*が整備されていない地域もある。
陰影図とDM		レーザ反射点から作成した陰影図の堅牢建造物の外形と、DM*データを比較する。	DM*が整備されていない地域もある。
その他 (建物の直線部分の比較)		レーザ反射点データから陰影図を作成し、大きな建造物の直線部分の誤差を検証する。	大きな建造物で実施。レーザ反射点間隔が小さい場合に有効な検証法である。

<参考>

数値地図: 水平精度の検証に多く用いられる数値地図は、DM(Digital Map)とも呼ばれる。数値地図には多くの種類があるが、表 6-3 では、縮尺 1/2,500 の「数値地図 2500(空間データ基盤)」を使用した。この数値地図は、縮尺 1/2,500 図(一般に都市計画基図と呼ばれている)に表示されている、行政区画・海岸線・道路中心線、鉄道、内水面、建物、基準点群の項目をデジタル化したものである。一般にこのデータは、地理情報解析システム(GIS)の利用において必要なデジタル地図であり、GISに適したデータ形態をしている。

第7章 取得データの加工(フィルタリング)

7-1. フィルタリングとは

航空レーザ測量でいうフィルタリング処理とは、反射点データに含まれるノイズを除去し、更に DSM と DTM を分類することである。レーザ反射点データには、構造物や植物などのさまざまな地物が含まれているほか、雲や排気ガスなどのノイズも含まれている。これらのノイズを処理した後、地表面からのレーザ反射点と建物等の地物表面からのレーザ反射点を分離するフィルタリングを行う。(図 1-2 参照)。

DSM に含まれる点と DTM に含まれる点を適切に分類するためには、地域特性や地形特性に適応した的確なフィルタリング処理を行うことが重要である。

7-1-1. ノイズ処理

ノイズ処理の最初の段階では、雲や空気中の塵、煙、排気ガスなどに反射した点を、計測対象地区の最高標高(Z_{max})、最低標高(Z_{min})を基準に計測標高がこの範囲に入らない点を全て除去する。特に空気中に水分が多い場合にはこのノイズは発生しやすい。次に水際、建物などの詳細なノイズデータの除去を行い、その後、地域特性に適したフィルタリング手法を選択して処理を行うことになる。

1) 最高標高以上、最低標高以下の点の除去

計測範囲内を一定の範囲で区切り、その範囲内の Z_{max} 以上、もしくは Z_{min} 以下の点を全て除去する。ここで除去されるノイズは、主に空中の塵や雲などにより反射された点、建物や樹木に数回バウンドして距離が長くなった点など、実際にはあり得ないような極端に標高値が異なる点であり、容易に除去できる。

図 7-1 A にこのようなノイズが生じている例を示す。このデータでは地表のはるか上空に、雲により反射されたノイズが発生している。また、地表の近くには空中の塵により反射されたと思われるノイズも発生している。高度が Z_{max} と Z_{min} 内に収まらないレーザ反射点を処理することで、図 7-1 B のように雲で反射された点を容易にノイズとして除去することができる。なお、空中の塵によるノイズは、2) に述べる詳細なノイズ処理によっても除去される。

対象地域が広い範囲であれば、国土地理院発行の「数値地図 50m メッシュ(標高)」を使用して Z_{max} 、 Z_{min} の

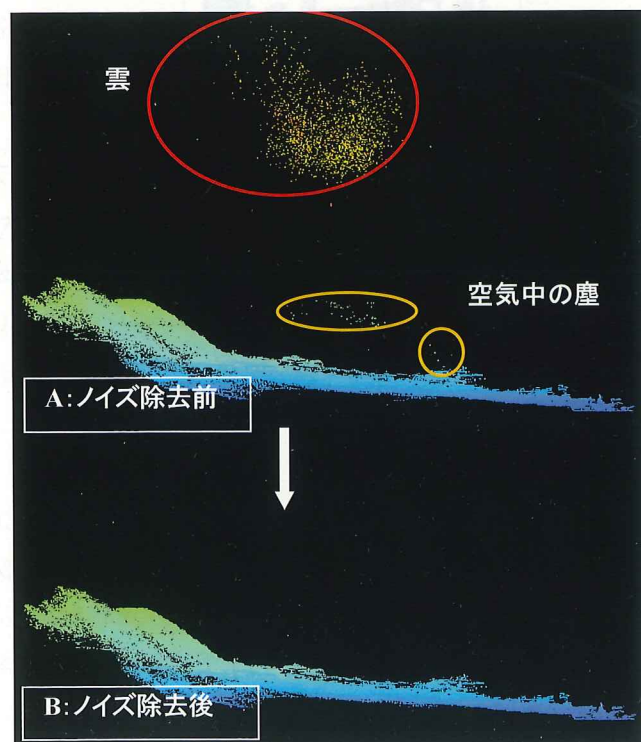


図 7-1 ノイズの除去処理の前後

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

閾値を設定すればよい。

2) 詳細なノイズ処理

ある一定の範囲を一つのタイルとし、1タイル内のレーザ反射点群に対して統計処理を行う。詳細なノイズ処理は、この統計量を利用して高さの偏差がある値よりも大きいレーザ反射点をノイズとして除去する処理法である。

7-1-2. フィルタリングの種類と特徴

フィルタリングにはラストパルスを使用する手法と統計的手法の2種類があげられる。現在の主流は統計的手法によるものであるが、地域特性に合わせて手法を選択しながら処理を行う必要がある。また、作業実施機関独自のフィルタリングも開発されているが、その計算アルゴリズムの詳細は公開されていないことが多い。

1) ラストパルスを使用する手法

ラストパルスを使用する手法では、ファーストパルスとラストパルスの2つのパルスを利用し、地表面まで到達したラストパルスのみを抽出する。この手法は、データの処理が単純であるという利点がある。しかし、ラストパルスのレーザ反射点群が実際の地表面以外からのレーザ反射点である可能性も高い。逆に地上で反射されたファーストパルスがあった場合にもこれらを利用することが出来ない。さらに、ラストパルスによるレーザ反射点群データが非常に少ない場合は、地表面を再現できない場合もある。

2) 統計的手法

統計的手法は、最も多く利用されているフィルタリング処理法である。この手法は植生などがまばらで地表面の起伏がなだらかな地域に向いている。この手法では、まず、ある大きさのタイルを設定する。次にそのタイル内にサーチ範囲を設定し、サーチ範囲内に存在するレーザ反射点群を、残差が最小となるような曲面をあらわす n 次の多項式で近似する。さらに近似面からの閾値を設定し、その閾値を超えるレーザ反射点をDSMとして除去する(図 7-2)。閾値は対象となる地形の種別などを考慮して設定される。この処理は、サーチ範囲の境界付近の整合性を保つため、タイルを全面的にカバーするようにサーチ範囲を25%オーバーラップさせて東西南北にシフトして行う。タイルに対してもサーチ範囲と同じく境界付近の整合性を保つため、オーバーラップ領域を設ける。大きな建物の上部や植生の表面が地表面と見なされるのを防ぐため、周囲のサーチ範囲と滑らかにつながらない場合は、その部分は除去される。

統計的手法は、全てのレーザ反射点を利用するため、地表面の再現性が高くほとんどの地域のフィルタリングに対応できる。しかし、処理が複雑であり適切な閾値を設定しないと植生の表面が地表面と見なされたり、地表面の起伏が激しい場合には地表面の起伏が削除されたりしてしまう危険性がある。また閾値の設定も規定がないため、作業実施機関ごとに結果や精度が異なる。

3) その他：作業実施機関における独自のフィルタリング開発

フィルタリング処理は、作業実施機関独自のアルゴリズムを用いて行っている場合と、メーカーが開発・提供したものを使用している場合がある。そのため、同じ地域をフィルタリング処理した場合でも、処理結果や精度が異なってくる。さらに、フィルタリング処理の精度は地形・植生・地物などの要因に依存するため、対象範囲に応じて、適切な処理パラメータを設定する必要がある。

フィルタリングの精度向上を図るために、同時に撮影したデジタル画像データをデジタルステレオ図化システムに展開し、フィルタリング処理後のデータと比較検証(ステレオ編集)を行うことがある。特に、植生が繁茂している地域では、地表面まで到達するレーザ反射点データの数が減少することが予想され、フィルタリング処理結果にはばらつきが見られる場合がある。したがって、山地斜面におけるフィルタリング処理結果は、デジタルステレオ図化機によって検証を行うことが望ましい。

フィルタリングを行う場合は、地表面の起伏、建造物が高層か低層かによって閾値を変える必要がある。この場合は、処理を分割して段階的に地物を除去していく。図 7-2 は様々な大きさの建物がある場合のフィルタリング処理を示したものである。大きさが異なるサーチ範囲を利用し、大きなサーチ範囲か

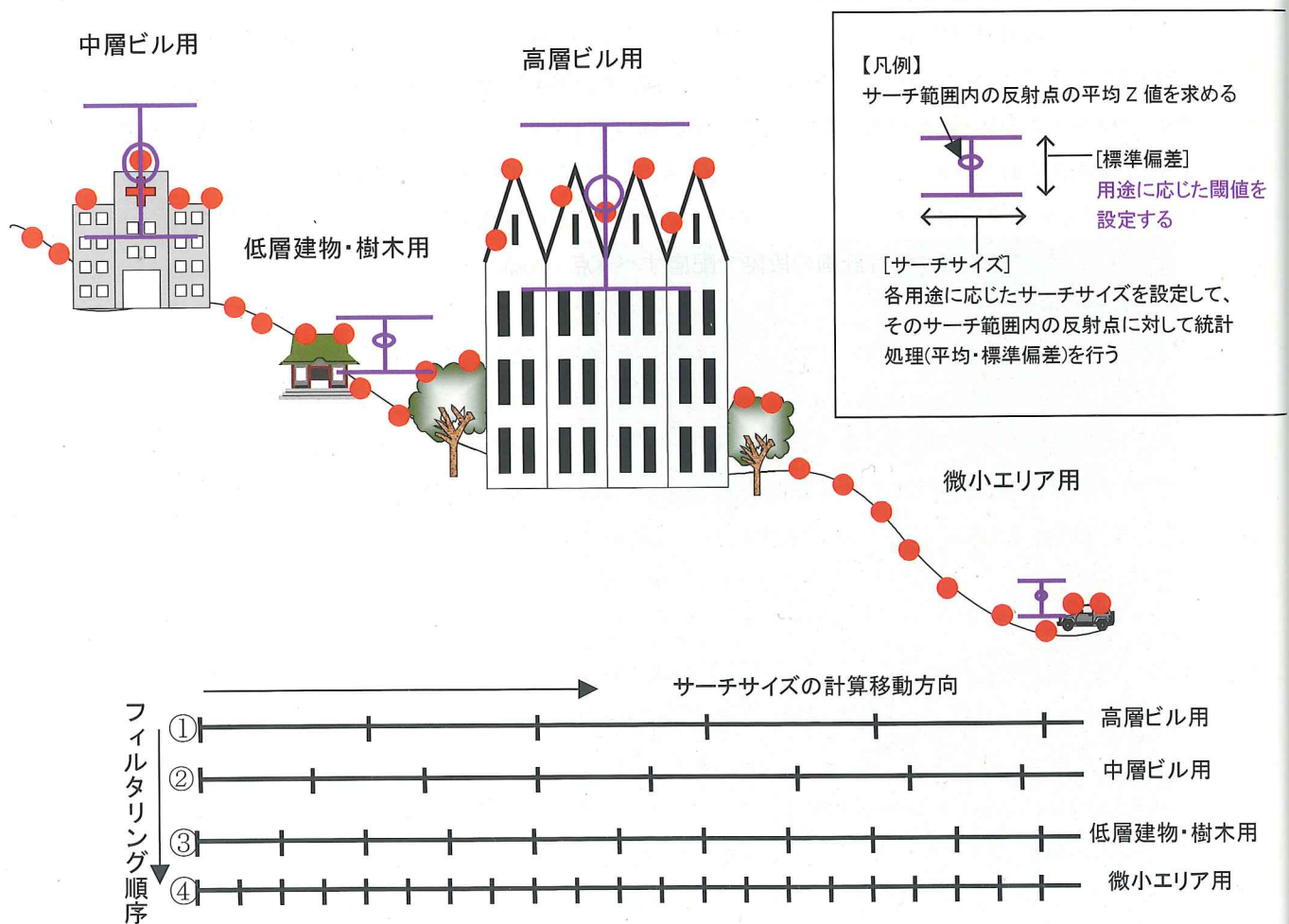


図 7-2 多様なサイズの地物に対するフィルタリング処理(統計的手法)

ら順番にフィルタを適用する。大きな建物がサーチ範囲に含まれる場合、サーチ範囲を大きくしてもサーチ範囲内のレーザ反射点高度の標準偏差は大きくならない。しかし地表面が含まれる周囲のサーチ範囲との平均高度の差は大きくなる。従ってサーチ範囲内の標準偏差が小さく、かつサーチ範囲内の平均標高が周囲のサーチ範囲と比べて高くなる部分を大きな建物として除去する。小さな建物の場合は、大きなサーチ範囲を利用するとその内部に建物と地表面の両方のレーザ反射点が含まれるため、サーチ範囲内の標高の標準偏差が大きくなる。従ってそのサーチ範囲は建物と見なされないで除去されない。大きなサーチ範囲を用いて大きな建物を除去した後に、サーチ範囲のやや小さな中層ビル用のサーチ範囲を用いて同様の処理を行う。中層建物の場合、周辺の地表面が含まれない程度の大きさのサーチ範囲を用いると、サーチ範囲内の標高の標準偏差が小さくなり、かつ周囲の地表面が含まれるサーチ範囲との平均標高の差が大きくなるのでそのサーチ範囲は建物と見なされて除去される。同様に大きさの違うフィルタを大きいものから順番に適用することにより、大きい建物も小さい建物も除去することが出来る。

7-2. フィルタリングの限界と対策

フィルタリング処理の結果は、対象範囲の地理的条件(地形、植生、地物)によって大きな影響を受ける。現在の主流である統計的手法によるフィルタリングにおいて閾値を設定する際、この閾値は地形条件を十分反映したものでなければならない。地表面により多くのレーザ反射点群が存在すれば、フィルタリングの精度が向上することから、フィルタリング精度に影響を与える要因のうち、地形や植生による影響については、できるだけ飛行計画の段階で配慮すべき点である。

7-2-1. 地形

山地斜面においては、標高の変化点が地形によるものなのか、構造物によるものかという自動判定が難しい。たとえば、図 7-3 のように山地斜面に建造物が存在する場合、この建造物は独立した建物とみなされず、斜面の一部と捉えられる場合がある。そのためフィルタリングの結果は、右側の図のように実際の地形面よりも盛り上がった形状になってしまう。このような場合、デジタル画像を併用し、目視によ

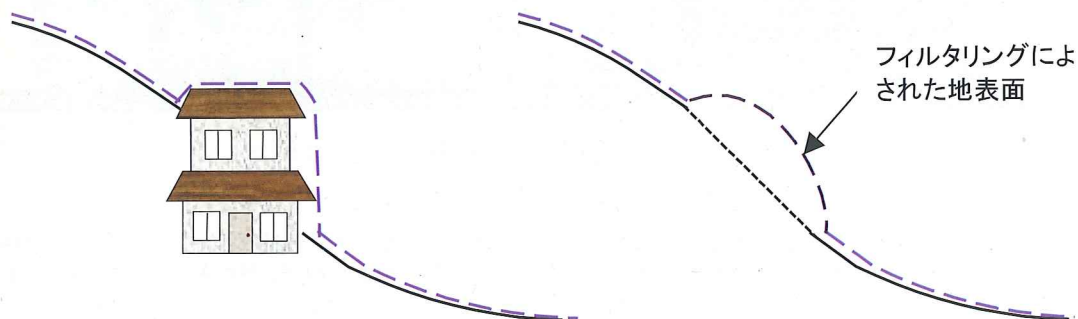


図 7-3 山地斜面において地形と構造物を判別するのが困難な例
(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

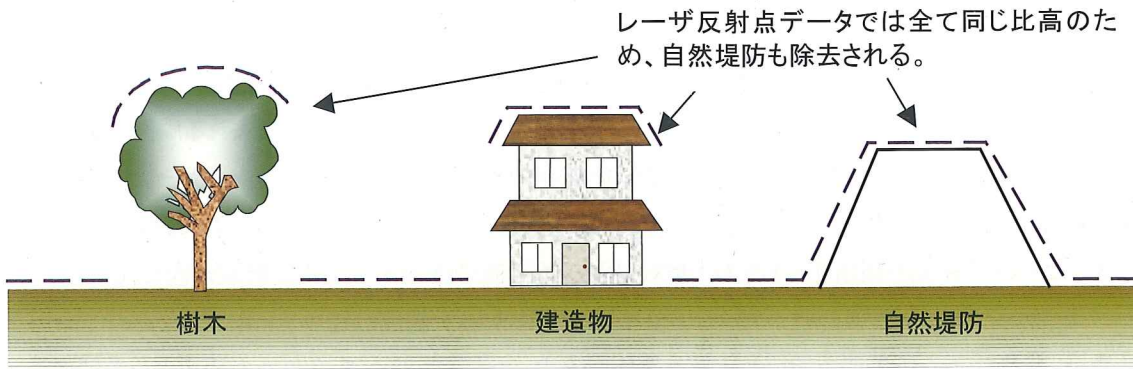


図 7-4 フィルタリングによって除去される地物
(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

て判読して建物を除去する必要がある。

フィルタリングの閾値を設定して、地表面と対象とするレーザー反射点の比高とを比較して、対象点を除去するか残すか判断する。したがって、堤防などの除去してはならない場合でも、この閾値より比高の大きな樹木、建造物、堤防は全て除去される(図 7-4)。このような場合は、デジタル画像を参照して、除去してしまった点を埋め戻す処理を行う必要がある。

7-2-2. 植生

植生密度が高くなると、レーザー光は樹冠で反射しやすくなり地表に届きにくくなる。従って、フィルタリング処理の結果、地表面に反射点データがないため樹木が除去されず、樹上が地表と誤認される可能性が高くなる。このような植生による影響を最小限に抑えるには、計測諸元を変更して、レーザー反射点密度を上げる、レーザー光の入射角を小さくする、落葉樹林帯のように季節的な樹勢の変化が見られる地

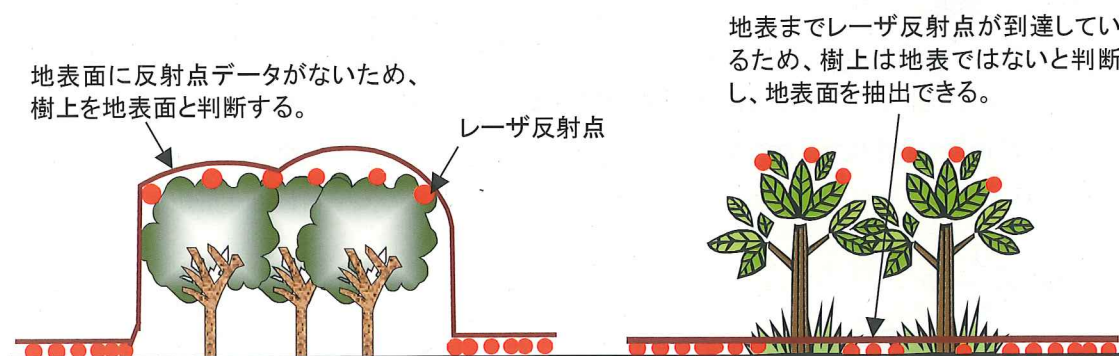


図 7-5 地形と樹木の自動判読が困難な例

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

左図の場合、樹木の密生した場所で地表面で反射されたレーザー計測点が全くないため、フィルタリング手法あるいは閾値の設定によっては植生の上で反射されたレーザー計測点が地表と見なされてしまう場合がある。右図のように植生がまばらで地表面で反射されたレーザー計測点が多数ある場合には、一般的にフィルタリングの正確度は高く、植生がある個所でも DTM を精度よく作成することができる。

区では落葉時に計測を行う、などの対策を講じる。地表のレーザー反射点が得られれば、樹上に当たったレーザー反射点は地表ではないと判断され、正確に地表を抽出できる可能性が高い(図 7-5)。したがっ

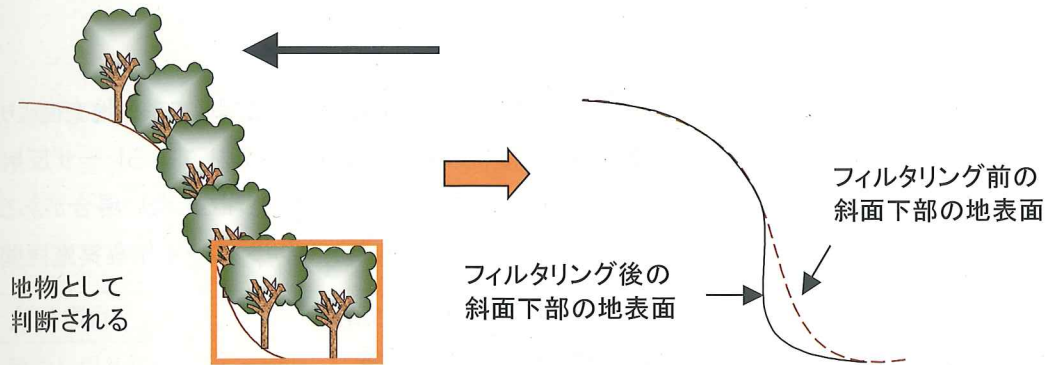


図 7-6 斜面下部が除去された例

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

谷底と斜面下部に密な植生がある場合、斜面下部の地表面が谷底の植生に誤って分類されてしまう場合がある。その場合右図のように谷底は広く、斜面下部の傾斜は急なものとして認識される。

て、植生の影響を防ぐには、少しでも多く地表面にレーザ反射点群が到達するように飛行計画を立てることが重要である。

植生が豊かな日本の山地斜面においては、レーザ反射点密度が大きくなるような計測諸元を設定しても、地表面の反射点は少なくなるため、山間部傾斜地において航空レーザ測量を行う場合は、フィルタリングに工夫が必要である。さらに、統計処理によるフィルタリングの特徴として、斜面下部や谷部のレーザ反射点データが除去される現象が生じることがあるため、山地斜面では地表面に到達する反射点が少ない上にフィルタリングによってレーザ反射点密度はかなり減少する。斜面下部の平地と斜面の境

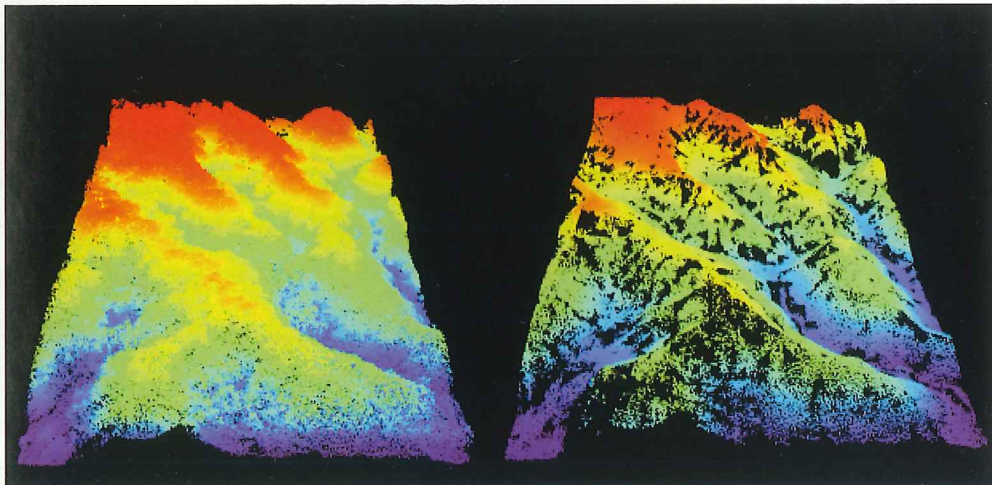


図 7-7 フィルタリングによって斜面下部や谷の反射点が除去されてしまった例

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

植生が密な山地では、谷部の地表面までレーザ光が到達しにくいいため、フィルタリング処理後の DTM に斜面下部や谷底の反射点がほとんど存在しない場合がある。左図はフィルタリング前のレーザ反射点群を、右図は地表面を表すフィルタリング後のレーザ反射点群をそれぞれ示す。フィルタリングによって植生が密な部分の反射点が除去されてレーザ反射点がほとんど存在しない領域があることが分かる。

界付近でフィルタリング処理を適用した場合、サーチ範囲の大きさによっては、斜面の地表面と平地に生えている植生が似たような高さになるため、斜面の地表面で反射したレーザ反射点データが除去され

てしまう場合がある。(図 7-6)。そのため、フィルタリング後の斜面下部の地表面は、本来の地表面よりも急傾斜となりやすい。また、植生が密な山地においては、谷部の地表面まで到達しているレーザ反射点がかかなり少ないため、フィルタリング処理後に谷部のレーザ反射点がほとんど存在しない場合がある(図 7-7)。このような特徴ある山間部斜面に適応した、山地斜面専用のフィルタリングも作業実施機関独自で開発・利用されている。

7-2-3. 地物

地物を除去する場合は、一回のフィルタリング処理で全ての地物を除去することは困難であり、除去対象となる建造物が高層か低層かによって閾値を変える必要がある。この場合は、処理を分割して大きな建造物から段階的に地物を除去していく。

地表面の地物は、マンションのような大きな地物から樹木や一般住宅のような小さな地物、車両のような微小な地物にいたるまで、その種類は非常に多い。そのため、一様な閾値ではフィルタリングによっては除去されない地物もでてくる。対策としては、フィルタリング処理を分割し、大きい地物から小さい地物までを段階的に閾値を設定して除去する方法が取られる。また、閾値とともにサーチ範囲も段階的に設定値を変えて処理する。大きな地物に対してはサーチサイズを大きく、微小な地物に対してはサーチサイズを小さく設定する。

山地斜面においては段階的にフィルタリング処理を行っても、自動フィルタリングだけでは不完全な場合が多く、手動で編集していくことが必要になる。

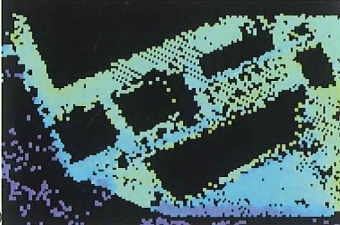
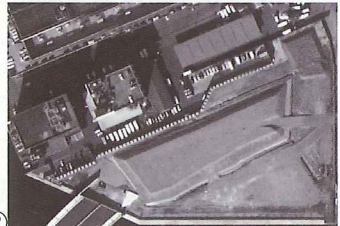
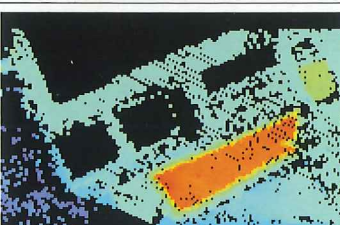
7-3. フィルタリング処理後の点検

フィルタリング処理は基本的に自動処理であるが、実際の業務においては自動処理では対処できない部分が多い。そのため、自動処理後の結果を目視で確認し、自動では処理できないものを手作業で編集することが必要となる。手作業での点検は、フィルタリングによって除去すべきレーザ反射点(建造物や樹木)、除去してはならないレーザ反射点が正常に処理されているかどうかを確認する。除去する点か残す点かどうかは、業務の目的によって異なる。航空レーザ測量によって作成されたカラー陰影図、等高線図などを用いてレーザ反射点を残すべきかどうか判断するが、その際、建造物などを確認するには、正射影画像、数値地図データなどを参照する。

手作業による編集は自動フィルタリング処理と比べ、作業に必要な時間が長く、参照する図面や計測データも必要である。例えば、フィルタリング処理全体にかかる時間を10とすると、自動処理と手作業による編集の比率は3:7ほどであり、手作業による編集作業が大部分の時間を占めることがわかる。ところが、処理するレーザ反射点群数の比率を見ると、自動処理と手作業による編集は約9:1にもなり、手作業によって処理するレーザ反射点データは1割にも満たない場合が多い。

表 7-6 に手作業によるレーザ反射点データが必要な処理の例を示す。

表 7-6 フィルタリング処理後に行う手作業の例
(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

点検項目	現象と対策法の具体例	
除去し切れなかったレーザ反射点を手作業によって取り除く。		建物のレーザ反射点が除去されなかったために不自然な等高線が生成された。 デジタル画像を参照して、不要なレーザ反射点を除去する。
除去してしまった必要なレーザ反射点を埋め戻す作業を行う。		必要な盛土がフィルタリングによって除去されてしまった。
		デジタル画像を参照して、データの埋め戻し処理を行う。 ①自動フィルタリング処理を行ったデータ。
		②必要な盛土であることをデジタル画像より確認。 ③レーザ計測点を埋め戻した結果。

7-3-1. 除去すべき反射点の確認

フィルタリング処理を実行した後に除去すべきレーザ反射点が残っている場合、自動処理の結果を等高線で確認したときに不自然な等高線の渦が見られる。等高線にデジタル画像を重ね合わせてその地点の地物を検証すると、これが地物のレーザ反射点がフィルタリングによって除去されなかったために生じた渦であるかどうか確認できる。除去すべきレーザ反射点であることが確認できた場合は、手作業にて除去すべきレーザ反射点群を抽出し、1点ずつ除去する。地物の他に、山地斜面においては樹冠で等高線が渦を巻く例が見られる。これは、フィルタリング処理によって樹幹のレーザ反射点が除去されていない場合に生じる。特に針葉樹林や竹林など、樹冠の密度が高く、地表面までレーザ反射点が到達しない場合に樹上を地表面と判断してフィルタリング処理が行われ、擬似的な丘として等高

線が形成される。山地斜面においてはこのような原因により、等高線が不自然になることがしばしば発生する。

7-3-2. 除去してはならない反射点の確認

残すべきレーザ反射点データである盛土や堤防、道路、線路など、除去してはならない点が自動処理で除去されたために、手作業によって反射点を戻す作業を行わなければならない場合もある。これは、レーザ反射点データを河川氾濫シミュレーションに活用する場合に多い。このような作業では、デジタル画像やカラー陰影図を参照する。

<参考>

ステレオエジット処理: (空間情報技術の実際; (社) 日本写真測量学会 編 2002, 6 による)

フィルタリング処理を施すことで、ノイズ・樹木・地物などのデータはかなり正確に除去され、DTM が生成されるが、ステレオエジットは、フィルタリング処理によって算出した DTM データの品質をさらに高めるための手法である。ここで紹介するレーザスキャナシステム(RAMS)は、航空レーザ測量と同時に 1,600 万画素のモノクロデジタル写真を撮影することができ、GPS・IMU を用いて航空機の空間位置(写真の撮影位置)と傾きを基に写真主点ごとの外部標定要素が容易に算出される。そのため、対空標識の設置、スキャナによる写真の読み込み、空中三角測量を省略でき、モノクロデジタル画像から直接ステレオモデルが容易に作成される。このステレオモデルはデジタル図化機上に表示される。

ステレオエジットとは、作成されたステレオモデルとフィルタリング処理されたレーザ計測データをデジタル図化機上で重ね合わせて表示し、フィルタリング処理の過程で除去しきれなかった樹木、構造物などのレーザ反射点を取り除き、DTM データの最終的な確認を行うものである。詳細な等高線データ作成が必要とされる場合などは、この手法により最終的な等高線表現の精度が高められ GPS・IMU データをレーザ計測データと画像データの双方に同時に利用することで実現可能となり、データの品質管理・保証の新しい手法であると言える。

第8章 出力図サンプル

この章では、レーザ反射点データから作成することのできる出力図のサンプルを示す。レーザ反射点データを様々な形式に加工し、目的に適した出力図を作成することで、微細な地形や急傾斜地などの特徴をより視覚的に把握することができる。また標高データから等高線や傾斜の大きさなどを計算して表示することも可能である。さらに航空写真画像やGISデータなど他のデータと重ね合わせることもできる。

8-1. 出力図サンプルと利用事例

8-1-1. 等高線図

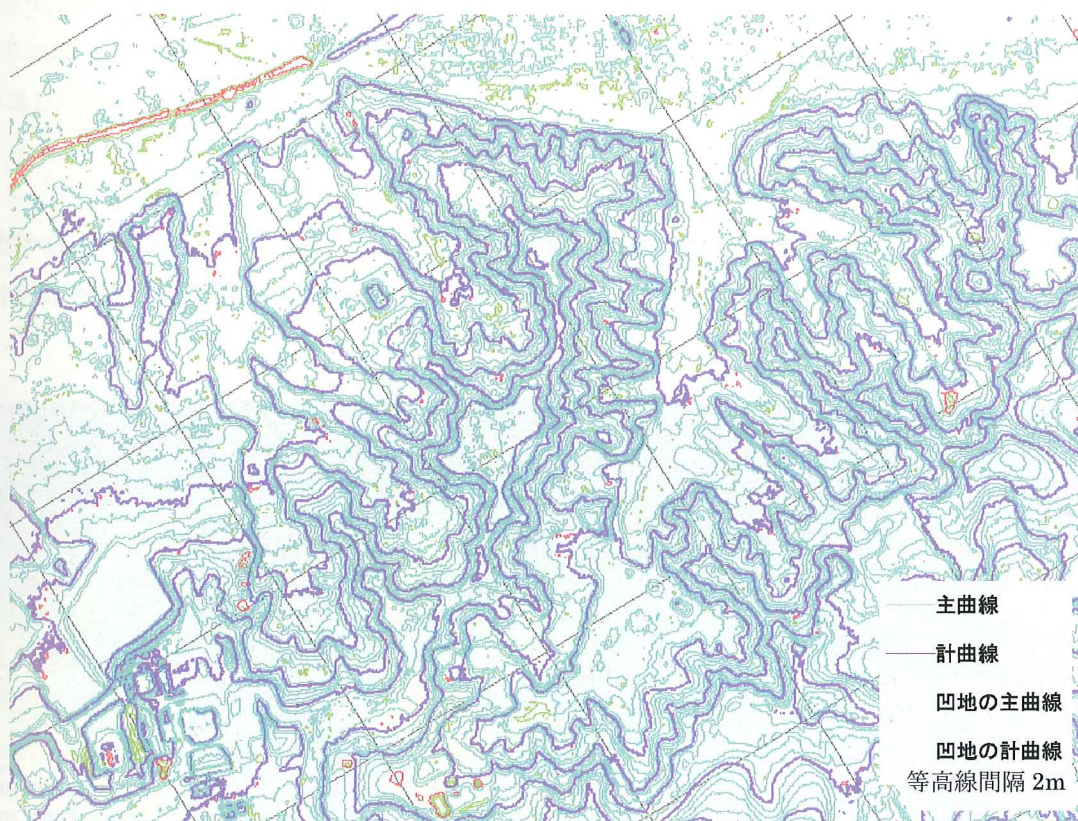


図 8-1 等高線図

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

1) 作成手順

レーザ反射点データから TIN 法による標高モデルを作成する。TIN 法による標高モデルでは、3 点の標高点で囲われた三角形で地表面がくまなく覆われる。標高点以外の場所では、3 点の標高点を通る平面により標高が近似される。図 8-1 ではこの TIN モデルからグリッド間隔 2m のグリッド標高モデルを作成する。次に、市販の CAD ソフトを用いて高さ間隔 2m の等高線を自動的に作成させ、主曲線と計曲線の色や太さを設定した。

2) 注意事項

小さいグリッドサイズの標高モデルを用いて等高線間隔が小さい等高線図を作成した場合、崩壊地や地すべりなどの微地形が等高線で表現できる場合もある。ただし、レーザ反射点データには計測誤差による微小な凹凸が存在する。また地表面以外の地物で反射されたレーザ反射点データ(下草や背の低い地物で反射された点データ)による微小な凹凸もノイズとして存在する。このためグリッドのサイズをあまり小さくすると、細かな凹凸が強調されて地形形状が逆に分かりにくくなる。したがって、グリッドサイズと等高線間隔を何通りかに変えて設定した等高線図を数種類作成し、最適なものを採用する必要がある。また、フィルタリングによって除去することができなかった樹木などによるレーザ反射点がある場合はその場所で等高線が不自然な形状になってしまう。この場合手作業によりレーザ反射点データの編集を行い再度等高線の作成を行う必要がある。

8-1-2. 段彩図

1) 作成手順

図 8-2 ではレーザ反射点データから TIN 標高モデルを作成し、これからグリッド間隔 1m のグリッド標高モデルを作成した。次に、市販の GIS ソフトを使用し、高さ 10m 毎に 11 区分された段彩図を作成した。

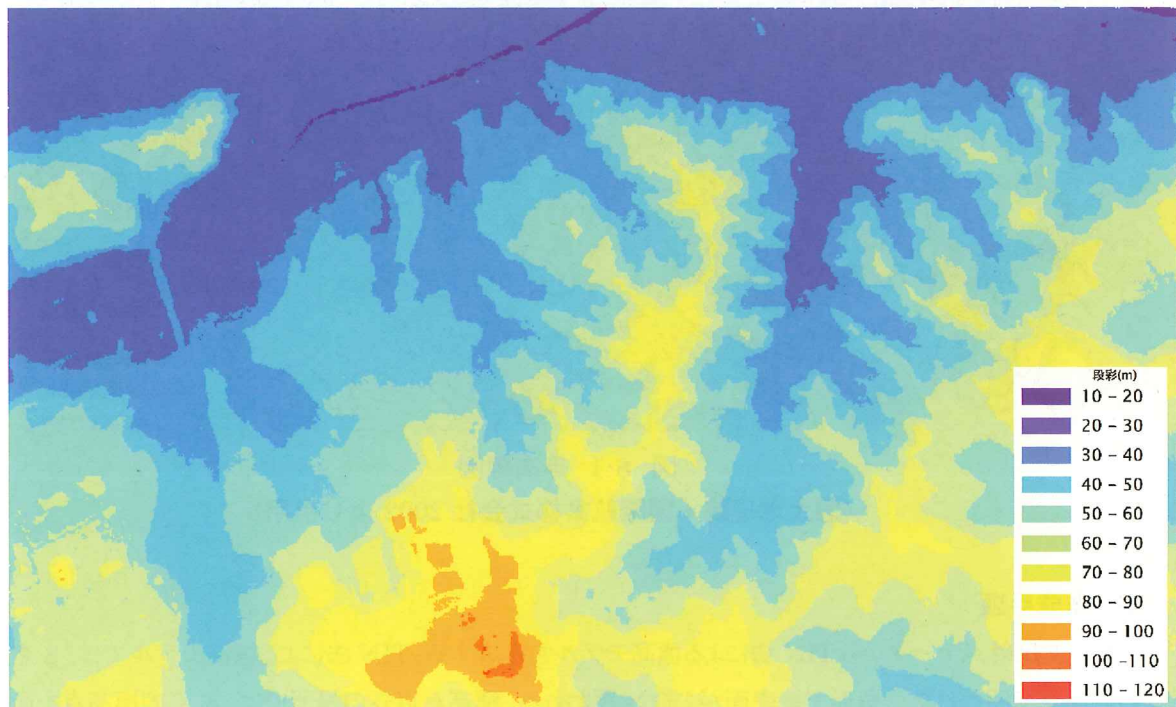


図 8-2 段彩図

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

2) 注意事項

段彩図の場合は、どのような標高の分割を行うかによって出力図のイメージが変化する。標高の分割方法には、均等な標高幅で分割する方法、対象地域全体の標高値の統計情報を作成し、標高値の標準偏差に基づいて分割する方法、度数分布を用いてそれぞれの標高区分で表される面積が同一になるように分割する方法などいくつかの種類がある。一般的には均等な標高幅で分割する方法が用いられるが、対象地域の全域について地形の特徴を表現するためには、均等な標高割りで色分けする方法よりも、度数分布を用いて各々の色が同じピクセル数になるように色分けを行う方法のほうが、段丘面や小さい谷の地形判読がしやすい場合もある。これは段丘などの標高がほぼ一定の平面的な地形が広がっている場合、均等な標高幅で段彩図を作成すると段丘上の微細な地形は段丘本体と同じ区分に入ってしまうことが多いのに対して、度数分布を利用した場合は地形変化が大きい場合は大きな標高区分になり地形変化が小さな場合は細かい標高区分になるので微小な地形の違いでも異なる区分に分類される場合が多くなるからである。

8-1-3. 傾斜区分図

作成手順

レーザ反射点データから TIN 標高モデルを作成し、これからグリッド間隔 1 m のグリッド標高モデルを作成した。グリッド標高データから GIS ソフトの傾斜計算機能を利用して 3×3 グリッド内の平均勾配を計算し(図 8-3 参照)、傾斜の緩急により 16 区分(5° 毎)された傾斜区分図を作成した(図 8-4)。

a	b	c
d	e	f
g	h	i

$$\begin{cases} X1 = c - a \\ X2 = f - d \\ X3 = i - g \end{cases} \quad \begin{cases} Y1 = a - g \\ Y2 = b - h \\ Y3 = c - i \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta X = (X1 + X2 + X3) / (3 \times x_mesh_size) \\ \Delta Y = (Y1 + Y2 + Y3) / (3 \times y_mesh_size) \end{cases}$$

$$\text{度単位の傾斜角度} = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}}{2} \right) \times \frac{180^\circ}{\pi}$$

図 8-3 傾斜角度算出方法

ピクセル e における平均勾配は、このピクセルの周囲 9 ピクセルの標高値 a-i を用いて以下の式で計算することができる。ただし、x_mesh_size、y_mesh_size はそれぞれ x 方向、y 方向のピクセルの大きさである。

1) 注意事項

傾斜区分図は、急傾斜地、地すべり地、崩壊地の判読などに活用できる。また、平野部においても、傾斜の区分を適切に設定することで、扇状地などの土地条件を簡易に把握することが可能である。ただし傾斜区分図では人工的な法面なども急傾斜地として表現されてしまう。また、フィルタリングが不十分な場合、建造物の壁面が急傾斜地として表現されてしまうことがあり、利用に当たっては注意が必要である。

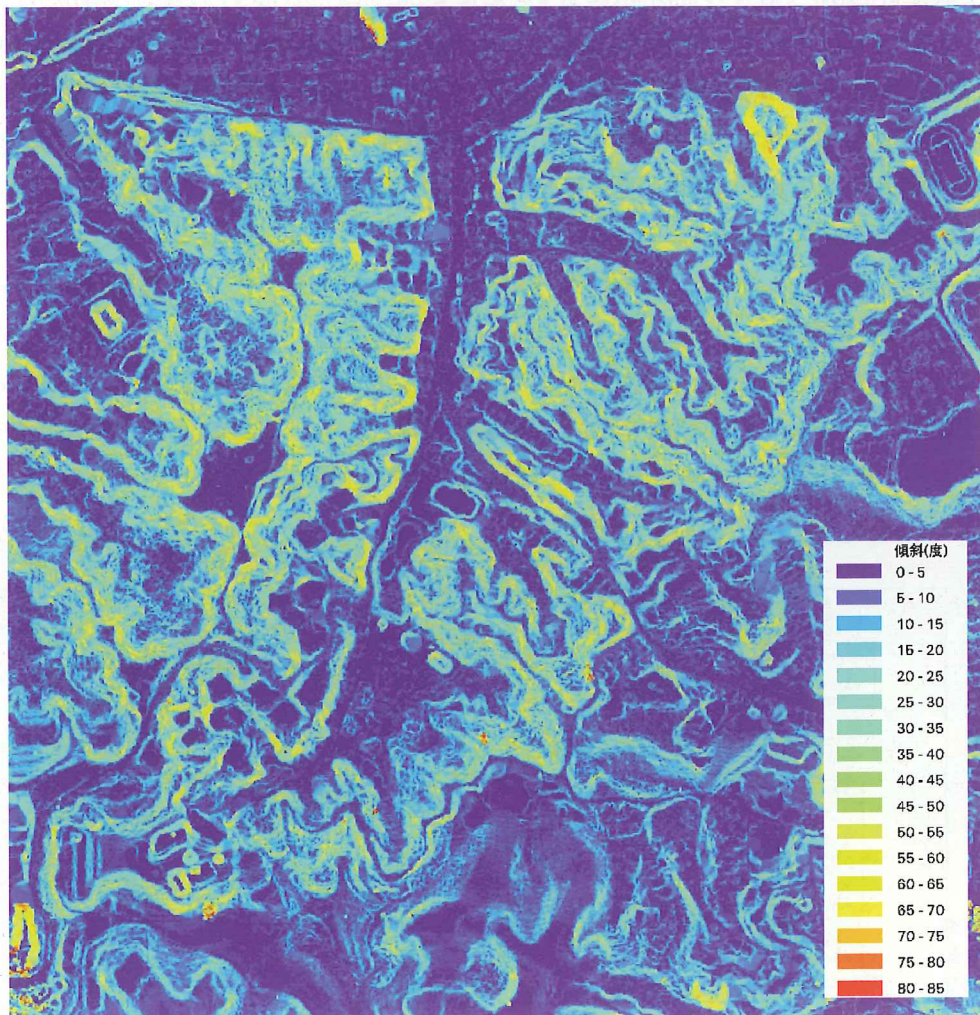


図 8-4 傾斜区分図

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

8-1-4. 陰影図

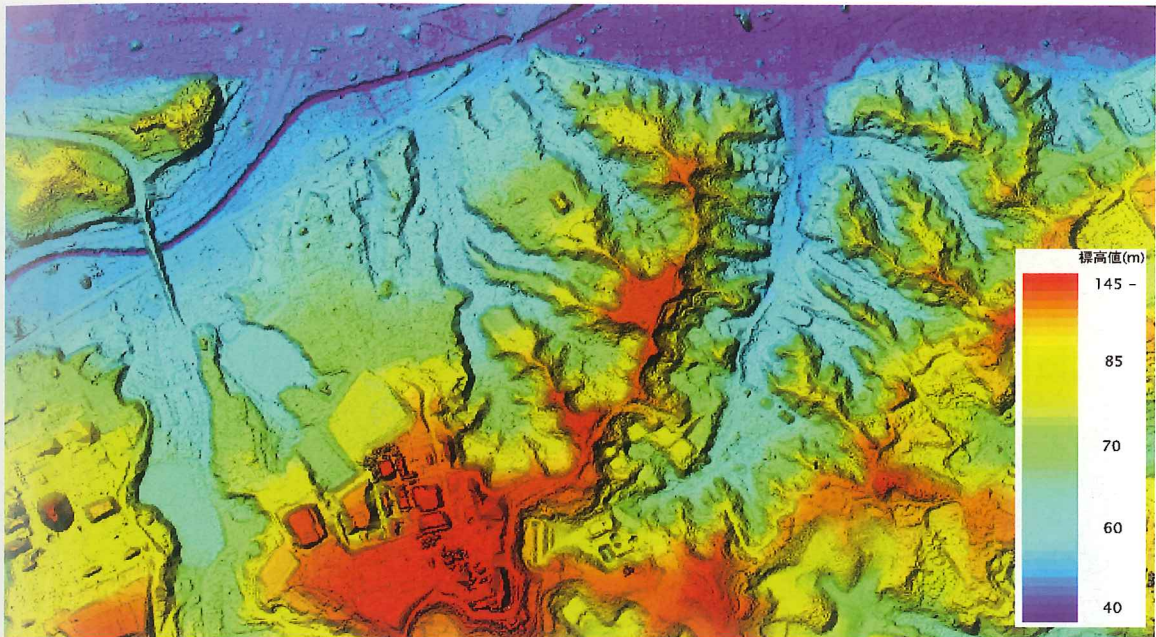


図 8-5 陰影図

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

1) 作成手順

図 8-5 では、市販の GIS ソフトを用いてレーザ反射点データから TIN 標高モデルを作成し、これからグリッド間隔 1m のグリッド標高モデルを作成した。グリッドの標高値に基づいて標高区分を行って彩色した。さらに一定方向から光を当てた場合の影を計算してデータに陰影(比高感)をつけた。

2) 注意事項

段彩図と同様に、カラー陰影図は標高の違いによって色分けされている。カラー段彩図との違いは、陰影をつけて立体感を表現している点である。立体感を持たせることにより対象地域の地形をより視覚的に捉えることができる。この陰影図では、河川沿いの段丘崖や急傾斜地、大きな建物の輪郭などがよく表現されている。表 6-3 で示したように、陰影図を用いて建造物の形状を抽出し、レーザ反射点の精度検証に用いる場合もある。

8-1-5. 等高線と正射影画像重ね図

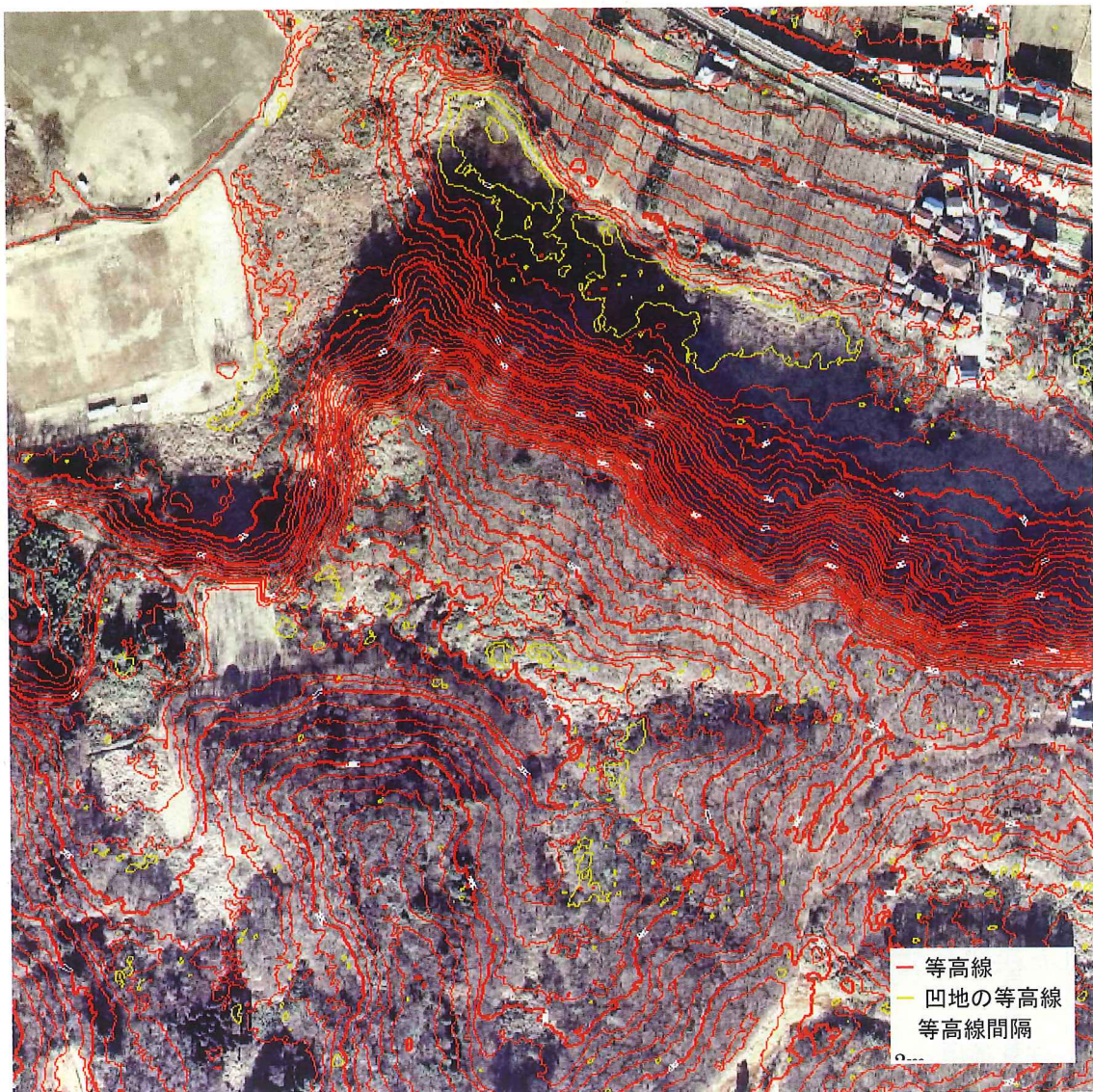


図 8-6 等高線と正射影画像
(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

1) 作成手順

図 8-6 ではレーザ反射点データから TIN 標高モデルを作成し、これからグリッド間隔 2 m のグリッド標高モデルを作成した。このグリッド標高モデルから等高線間隔 2 m の等高線図を作成し、別途作成した正射影画像を重ね合わせた。

2) 注意事項

等高線だけでも地形的な特徴が判読できるが、正射影画像と重ね合わせることで、地形と土地利

用を合わせて判読することが可能となる。見やすい出力図とするためには、正射影画像の色調と重ね合わせる等高線の色合いを考慮する必要がある。

8-1-6. 等高線とカラー一段彩図

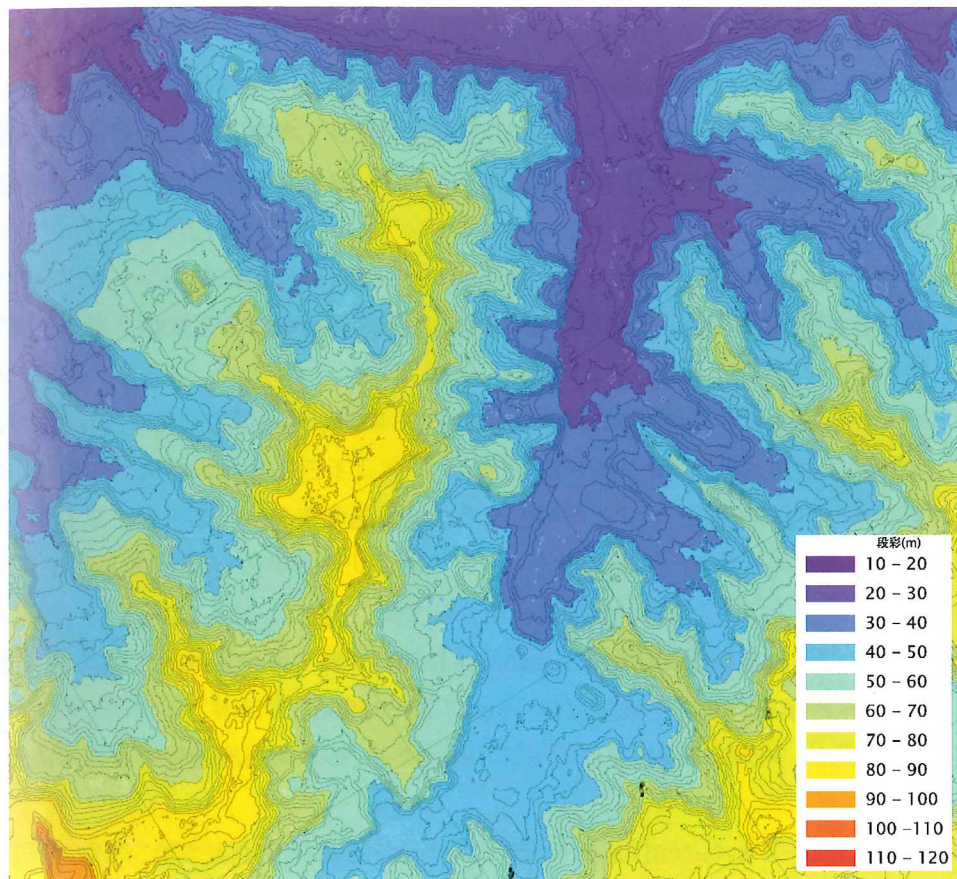


図 8-7 等高線とカラー一段彩図

(国土地理院・国際航業株式会社 2002 より引用)

1) 作成手順

図 8-7 ではグリッド間隔 2m、等高線間隔 2m で作成した等高線図にカラー一段彩図を重ね合わせた。

2) 注意事項

等高線からは判読できない標高差が段彩で表現されている場合もある。重ね合わせる等高線は、モノクロの方が見やすい。

参考文献

- 秋山幸秀：空中レーザー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，Vol.39，No.2，pp.25-28，2000.
- 秋山幸秀、高貫潤一、藤原輝芳：空中レーザー計測システムの火山砂防への応用，写真測量とリモートセンシング，Vol.4，No.4，pp.50-55，2002.
- 石原伸晃、趙卉菁、柴崎亮介：レーザスキャナを用いた通行人トラッキングに関する研究，日本写真測量学会，平成14年度年次学術講演会発表論文集，pp.305-308，2002.
- 今井靖晃、瀬戸島政博、赤松幸生、船橋学、天野正博、他2名：航空機レーザスキャナによる森林域での計測に関する検討，日本写真測量学会，平成13年度秋季学術講演会発表論文集，pp.207-210，2001.
- 岩男忠明、寺田秀樹、金子正則、中村三友、織茂郁、松田宏：航空機搭載型レーザプロファイラを用いた積雪調査，日本写真測量学会，平成14年度年次学術講演会発表論文集，pp.317-320，2002.
- 岩男弘毅：レーザースキャナを用いた3D建築物モデルの構築，測量，2月号，pp.28-31，2003.
- 大坪和幸、政春尋志、長谷川裕之：レーザスキャナデータによる三宅島雄山の火口陥没量の算出，日本写真測量学会，平成12年度秋季学術講演会発表論文集，pp.147-149，2000.
- 大坪和幸、政春尋志：レーザースキャナデータフィルタリング手法の丘陵地への拡充，日本写真測量学会，平成14年度秋季学術講演会発表論文集，pp.121-124，2002.
- 岡川正臣：Algorithm of multiple filter to extract DSM from Lidar data，日本写真測量学会，平成13年度年次学術講演会発表論文集，pp.175-180，2001.
- 岡川正臣：LIDARデータからの地表面標高モデル作成手法，日本測量調査技術協会学術講演会，pp.65-70，2002a.
- 岡川正臣：LIDARデータからの3D建物モデルについて，日本写真測量学会，平成14年度秋季学術講演会発表論文集，pp.125-128，2002b.
- 岡崎亮太、瀬戸島政博、船橋学、今井靖晃：航空機レーザスキャナの異なるFoot Printによる樹冠把握の検討，日本写真測量学会，平成15年度年次学術講演会発表論文集，pp.199-202，2003.
- 織田和夫、沼田洋一、斉藤和也：レーザースキャナによる自動都市モデル構築，写真測量とリモートセンシング，Vol.4，No.4，pp.46-49，2002.
- 小田三千夫他：レーザプロファイラを用いた横断測量，応用測量論文集，Vol.12，pp.91-97，2001.
- 小野田敏：レーザ計測及びGISによる斜面防災への応用，APA，No.82，pp.98-105，2002.
- 加藤哲、瀬戸島政博、浅井健一：大規模斜面の防災対策における応用計測技術，測量，1月号，pp.26-29，2000.
- 神谷泉：航空機搭載レーザスキャナによる観測密度の事前評価について，国土地理院時報，96

- 集, pp.53-68, 2001.
- 神谷泉: 位置ずれを考慮した 2 時期の DSM による建物変化候補の抽出, 日本写真測量学会, 平成 14 年度年次学術講演会発表論文集, pp.309-310, 2002a.
- 神谷泉: レーザスキャナの反射強度を用いた道路の抽出の可能性, 日本写真測量学会, 平成 14 年度年次学術講演会発表論文集, pp.311-312, 2002b.
- 国土地理院: ヘリ搭載型スキャナによる三次元データ作成作業 報告書, 95p, 1999a.
- 国土地理院: 地形測量へのレーザープロファイラー技術の利用手法(案), 78p, 1999b.
- 国土地理院: 地形測量に航空レーザー技術を用いる研究作業 報告書, 59p, 2000a.
- 国土地理院、朝日航洋株式会社: レーザスキャナを用いた地すべり地形計測作業 口坂本地区 報告書, 52p, 2000.
- 国土地理院、国際航業株式会社: レーザスキャナー等による標高データ作成作業 報告書, 28p, 2001.
- 国土地理院: G I S 世代情報基盤の構築手法及び活用に関する調査研究作業 報告書, 211p, 2001.
- 国土地理院: G I S 世代情報基盤の構築手法及び活用に関する調査研究作業Ⅱ 報告書, 219p, 2002 a.
- 国土地理院: 航空レーザ測量による斜面地形計測・解析作業 作業実施報告書, 105p, 2002b.
- 国土地理院、国際航業株式会社: 平成 14 年度 レーザスキャナによる斜面計測マニュアル, 166p, 2002.
- 国土地理院: 航空レーザスキャナ測量による斜面地形計測・崩壊予測箇所自動抽出に関する検討作業 (八王子地区) 報告書, 100p, 2003.
- 笹川正、橘菊生: 空中直接定位システム (GPS/IMU) の現状と課題, APA, No.82-14, pp.92-97, 2002.
- 佐藤浩、関口辰夫、織茂郁、中島保: 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に関する研究, 日本写真測量学会, 平成 15 年秋季学術講演会発表論文集, pp.91-94, 2003.
- 柴崎亮介: レーザスキャナと三次元計測, 写真測量とリモートセンシング, Vol.39, No.2, pp.6-7, 2000.
- 下井田実、有澤俊治、黒田竜二、津留宏介、板屋勇、藤原輝芳: 砂防調査における航空レーザ測量の可能性, 測量, 6 月号, pp.26-30, 2001.
- 瀬戸島政博、赤松幸生、船橋 学、今井靖晃、天野正博: 航空機レーザスキャナによる森林域の計測とその適用性, 写真測量とリモートセンシング, Vol.41, No.2, pp.15-26, 2002.
- 瀬戸島政博、今井靖晃、船橋 学、岡崎亮太: 森林計測へ航空機レーザスキャナの利用, 写真測量とリモートセンシング, Vol.4, No.4, pp.41-45, 2002.
- 高橋佳昭: 航空機レーザープロファイラーの地形測量への利用, 写真測量とリモートセンシング, Vol.39, No.2, pp.14-18, 2000.

- 高橋博将：航空レーザー測量における標高精度の検証，APA，No.77-9，pp.66-74，2000.
- 田村正行、高橋幸枝：航空機レーザースキャナーによる樹高計測，写真測量とリモートセンシング，Vol.39，No.2，pp.8-13，2000.
- 都留宏介、中嶋保、藤原輝芳：航空レーザスキャナの品質評価，写真測量とリモートセンシング，Vol.41，No.1，pp.21-27，2002.
- 徳永光晴、VU T. Thuy：航空機レーザースキャナーデータに対するウェーブレットクラスタリング法の提案，日本写真測量学会，平成 14 年度秋季学術講演会発表論文集，pp.113-116，2002.
- 豊山洋子、高橋博将、沼田洋一、藤井紀綱、斎藤和也：レーザスキャナを利用した森林地帯の地形計測手法の検討，日本写真測量学会，平成 12 年度秋季学術講演会発表論文集，pp.131-134，2000.
- 沼田洋一、小熊宏之：レーザスキャナと航空写真による林分構造計測手法の開発，日本写真測量学会，平成 12 年度秋季学術講演会発表論文集，pp.135-138，2000.
- 沼田洋一・田村正行：レーザープロファイラによる広域樹高分布の計測手法の研究，APA，pp.52-62，2001.
- 長谷川裕之、黒木貴一：レーザスキャナデータ取得効率に対する植生被覆の影響，日本写真測量学会，平成 12 年度年次学術講演会発表論文集，pp.313-314，2000.
- 藤井紀綱：航空レーザ測量の計測精度とデジタルカメラとの融合による利点，応用測量論文集，Vol.13，pp.35-42，2002.
- 船橋学、瀬戸島政博、今井靖晃、赤松幸生、天野正博、他 3 名：航空機レーザスキャナの複数コースデータによる森林計測—効率的なデータ取得に関する検討—，日本写真測量学会，平成 14 年度年次学術講演会発表論文集，pp.313-316，2002.
- 船橋学、瀬戸島政博、今井靖晃、赤松幸生、天野正博、他 3 名：航空機レーザスキャナの複数コースデータによる森林計測—森林域データ取得密度と DEM 精度に関する検討—，日本写真測量学会，平成 14 年度秋季学術講演会発表論文集，pp.109-112，2002.
- 政春尋志：ヘリコプター搭載レーザースキャナーによる都市三次元情報の計測，写真測量とリモートセンシング，Vol.39，No.2，pp.19-24，2000.
- 政春尋志、大坪和幸、長谷川裕之：レーザースキャナーデータのフィルタリング手法の比較検討，日本写真測量学会，平成 13 年度年次学術講演会発表論文集，pp.181-184，2001.
- 政春尋志、大坪和幸：レーザースキャナーデータのフィルタリング，日本写真測量学会，平成 13 年度秋季学術講演会発表論文集，pp.197-202，2001.
- 政春尋志：レーザースキャナーと SAR，日本写真測量学会講演会資料，2002.
- 吉川由里子、沼田洋一、大堂仲二、原田政司：道路設計業務におけるレーザプロファイラの利用，APA，pp.67-74，2001.

用語の整理

Laser = レーザ Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation

Laser profiler = レーザプロファイラ = スキャニング機能がなく、航空機の直下軌跡のデータ取得のみを行う

Airborne Laser scanner = 航空機レーザスキャナ = 航空機の直下軌跡だけでなくスキャニングにより面的にデータを取得する

LiDAR, LIDAR = Light Detection And Ranging ライダー = 光検出測距法
= Light radar の短縮形 = 航空機レーザ測量

DEM = Digital Elevation Model 数値標高モデル = デジタル標高データ一般、DSM、DTM の総称

DTM = Digital Terrain Model 数値地形モデル = 地物・植生を取り除いた地表面形状を示す

DSM = Digital Surface Model 数値表層モデル, 数値地表モデル = 地物・植生を含む地上の表面形状を示す

TIN = triangulated irregular networks 不規則三角網、不等三角網

GRID = グリッド

Raster = ラスタ

breaklines = ブレークライン

datum = 測地基準面

tidal datum = 潮位基準面

vertical datum = 垂直(鉛直)基準面

spheroid = 回転楕円体

geoid = ジオイド

coordinate system = 座標系

projective method = 投影法

geographic coordinates = 地理座標

terrestrial latitude = 緯度

longitude = 経度

photogrammetry = 写真測量法

vertical accuracy = 垂直精度

digital contours = 数値等高線

contour interval = 等高線間隔

GPS = Global Positioning System 汎地球測位システム、全地球測位システム

IMU = Inertial Measurement Unit 慣性制御装置

INS = Inertial Navigation System 慣性制御装置

Quality assesment = 品質評価

発注時項目チェックリスト

■ 事前準備 ■

計測実施予定日:

天気:

空域制限の有無:

◇計測作業時期

計測実施季節:

植生状況:

地形状況:

気象状況(天気、風、気温、積雪など):

◇要求仕様

対象地域の面積:

対象地域の形状:

対象地域の地形(高低差):

計測データ点密度:

◇地上GPS基準局の設置位置

計測地域までの距離:

上空視界の広さ:

国土地理院の電子基準点データの利用可能性:

■ 航空レーザ計測レポート ■

計測諸元・処理フロー

計測日:

計測時間(開始と終了):

計測時の天気:

調査地概況(植生・地形・季節的な状況):

作業要員:

<航空レーザ測量システム>

飛行高度:

飛行速度:

飛行前後の機器の高さ:

走査角:

スキャンレート:

パルスレート:

内臓アンテナの補正值:

キャリブレーション値:

計測コースの重複幅:

計測ルート(飛行軌跡):

<GPS>

PDOPの値(全て):

GPS基準局サイト内における任意の障害物:

地上GPS基地局のサイト名と復元性:

航空機GPSの受信機のタイプ:

地上GPS基地局の受信機のタイプ:

<データ処理>

処理と成果物の責任者:

* 解析処理実行者:

* 手動編集実行者:

全データ処理過程:

除去された地物:

除去しなかった地物:

<成果物>

投影法・座標系・測地基準:

GRID作成方法・設定パラメータ:

等高線作成方法・設定パラメータ:

計測データ精度:

その他の使用データ(数値地図 1/2500、河川データなど)と精度:

納品された成果物に関する補足情報:

データ保存形式:

データボリューム:

■ 納品 ■

・航空レーザ測量 生データ

・計測レポート

計測業務・解析業務フロー

1. 目的の明確化と計測計画
2. 計測の実施
 - ①GPSデータ取得
 - ②IMUデータ取得
 - ③レーザデータ取得
 - ④画像撮影
3. 計測データの解析(GPS・IMU解析、レーザデータ解析)
4. 取得データの点密度の点検
5. 精度検証(コース間の整合性、高さ精度、水平精度)と補正
6. データのノイズ除去
7. フィルタリング処理
8. フィルタリング処理後の点検と補正
9. DEM作成(等高線、TIN、GRID)
10. 正射影画像の作成
11. 出力図整備
12. 報告書作成(メタデータ、業務フロー)
13. 納品の確認(報告書、納品データ(生データ、DSM、DTM、GRID、等高線)、各種出力図)

作業実施機関の保有機器

作業実施機関	名称	水平精度 (m)	高さ 精度 (m)	メーカー	スキャナ	プラット フォーム	計測用カメラ	レーザ計測点密度に影響を与える要素				
								パルス レート (Hz)	スキャン レート(Hz)	スキャン 角度(°)	対地高度 (m)	対地速度 (km/h)
朝日航洋	ALMAPS	＜対地高度 /2000	±0.15	Optech	平面鏡	回転翼	DVビデオ	25000	25	22.6	150～750	60～90
	ALMAPS II	＜対地高度 /2000	±0.15	Optech	平面鏡	回転翼 固定翼	デジタルカメラ(カラー)	25000	25,50	0～40	150～ 2000	60～200
アジア航測	LASER BIRD	＜対地高度 /1000	±0.15	Optech	平面鏡	回転翼 固定翼	アナログビデオ(カラー)	2000～ 5000	0～90	0～40	330～ 1200	40～200
	LASER BIRD II	＜対地高度 /2000	±0.15	Optech	平面鏡	固定翼	デジタルカメラ(カラー)	25000,3 3000	28	0～40	175～ 3000	180～270
パスコ	RAMS	±0.3	±0.15	EnerQuest	平面鏡	固定翼	デジタルカメラ(モノクロ)	15000	12.5～29.1	0～45	600～ 3000	180～270
国際航業	RAMS	±0.3	±0.15	EnerQuest	平面鏡	固定翼	デジタルカメラ(モノクロ)	15000	12.5～29.1	0～45	600～ 3000	180～270
	RAMS II	±0.3	±0.15	EnerQuest	平面鏡	固定翼	デジタルカメラ(カラー)	24000	24.9～50.0	0～45	600～ 3000	180～270
中日本航空	N-TOMS I	±0.5	±0.2	NEC	平面鏡	回転翼	ビデオ	20000	24	0,10,45,60	50～400	50
	N-TOMS II	±0.5	±0.2	NEC	平面鏡	回転翼	CCDラインセンサ(カラー)	20000	24	0,10,45,60	50～500	50
三菱商事	ALTMS	1	0.15	TerraPoint	回転鏡	固定翼	アナログビデオ(カラー)	0～ 30000	58	36	450～ 1500	240