

I-10 自動属性判別法によるレーザ計測データの有効活用について

About effective use of the laser measurement data
by the automatic attribute distinction method

山本一浩¹・小林一郎²・上野幹夫³・橋本淳也⁴

Yamamoto Kazuhiro, Kobayashi Ichiro, Ueno Mikio, and Hashimoto Junya

抄録：近年、航空機にレーザスキャナを搭載し広範囲に標高データを取得する、航空レーザ計測が実用化され、3次元空間情報を容易に得られるようになった。航空レーザ計測で得られたデータは、様々な分野での利用が期待されている。本論文は、レーザ計測データを分析し、各分野において使用されるべき最適なデータ加工の手法の提案として、レーザ計測データのみによる自動属性判別法を提案する。また、提案した解析手法を用い適用事例によりその有効性について考察する。

Abstract: The laser measurement to acquire the altitude data widely was put to practical use by the aircraft equipped with the laser scanner. And it came to be able to acquire three dimension data easily. As for the data acquired in the laser measurement, use in various fields is expected. This thesis analyzes the laser measurement data. And, it proposes the automatic attribute distinction method only by the laser measurement data as a proposal of the technique of the best data processing that should be used in each field. The analysis method of the proposal is applied, and the effectiveness is considered.

キーワード：レーザ計測データ、自動属性判別、三次元都市モデル、氾濫解析

Keywords : Laser measurement data, Automatic attribute distinction, 3D city model, Flood analysis

1. 序論

近年、航空機にレーザスキャナを搭載し広範囲に標高データを取得する、航空レーザ計測が実用化され、3次元空間情報を容易に得られるようになった^{1),2)}。航空レーザ計測とは、航空機にスキャン式レーザ測距儀、GPS 及び IMU(Inertial Measurement System)を搭載し、レーザ照射の位置や姿勢を制御しながら、照射したレーザ光が地表面に反射して戻ってくるまでの時間を計測し、位置情報(緯度、経度、標高)を取得する計測方法である(図-1)。



図-1 航空レーザ計測イメージ¹⁾

このようにして得られたデータの利用は、航空写真画像と組み合わせ、都市三次元モデルを自動構築し高品質の都市三次元モデル生成に成功している事例^{3),4)}が報告されるなど、都市計画、GIS、防災などの様々な分野での利用が期待されている。特に、近年の台風・集中豪雨・地震など大きな災害が多発し、防災に関する意識が高まっている中で、このレーザ計測データの有効利用の研究は、避難勧告(指示)や自主避難等に対する支援といった、ソフト対策に寄与するものと考えられる。

本論文は、レーザ計測データを分析し、防災や各分野において使用されるべき最適なデータへの加工の手法として、レーザ計測データのみによる自動属性判別法を提案し、その可能性について研究したものをとりまとめたものである。なお、本研究で使用するレーザ計測データの計測仕様を表-1に示す。

表-1 レーザ計測データの計測仕様

項目	仕様
運用高度	175~3000m
パルス周波数	25/33kHz
高さ精度(1σ)	15cm(対地高度1000mにおいて)
水平精度(1σ)	1/2000×対地高度
スキャン角	0° ~ ±20° (可変)

1 : 正会員 博(工) 国土交通省 福井河川国道事務所

(〒918-8015 福井市花堂南2丁目14番7号, Tel :0776-35-2661, E-mail : yamamoto-k86mx@kkr.mlit.go.jp)

2 : 正会員 工博 熊本大学 教授 工学部環境システム工学科(〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)

3 : 正会員 (株)構造計画研究所 建設ソリューション営業部(〒164-0011 東京都中野区中央4丁目5番3号)

4 : 正会員 博(工)八代工業高等専門学校 講師 土木建築工学科(〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

2. レーザ計測データの特徴

ここでは、レーザ計測によって得られた座標データの自動属性判別に先立ち、地形や土地利用との間にどのような特徴や関連が見られるかを考察した。

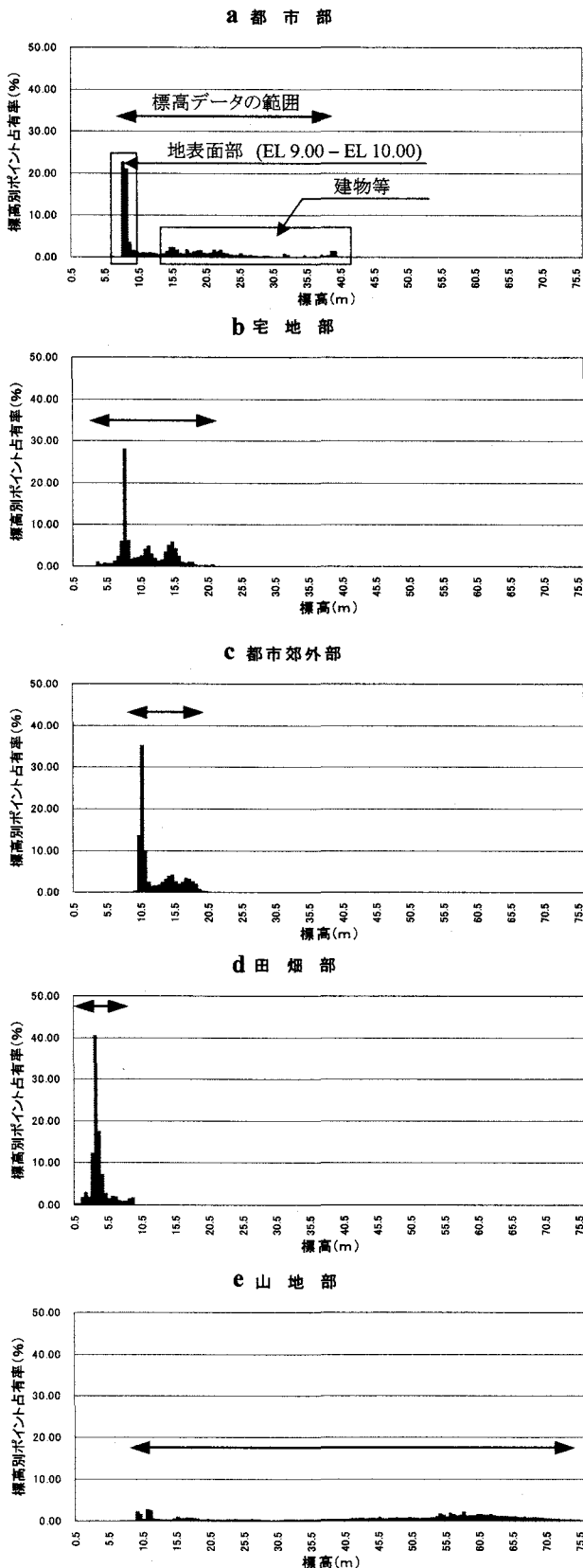


図-2 地域別標高データ分布状況

(1) 地域別によるデータの特徴

地形や土地利用状況により地域の種類を次の a~e の5 つに大別する。a 都市部、b 宅地部、c 都市郊外部、d 田畑部、e 山地部の各地域からそれぞれ任意に1ヶ所ずつ解析エリアを選定し、そのレーザ計測データを分析することで、地域別にどのような特徴があるかを考察した。

地域ごとに標高の分布状況をグラフ化したものを図-2 に示す。横軸は標高、縦軸は計測点数の相対度数を表しており、これを標高別ポイント占有率と定義している。

a 都市部及び b 宅地部では、ある一定の標高範囲でデータが分布している。このことから、データ内に低標高部などに代表される道路や中標高部などの建物のデータが存在していることがわかる。なお、都市部と宅地部の違いとして、標高範囲の差で比較することができる。つまり、都市部では比較的高いビル等が存在し、宅地部では住宅と比較的低い建物等が存在していると言うことである。また、一部の標高部分で占有率が突出しているが、これは、道路や公園等の地表面部であると判断できる。この地表面部の突出度合いにより、データ内における建物等の有無の度合いがわかる。突出度合いが小さい場合はこの建物の存在率が高く、逆に大きい場合は存在率が低いと思われる。

c 都市郊外部では、宅地部と同じような状況となっているが、標高範囲は若干狭くなっている。また、このデータにおいても、一部の標高で占有率が突出しており、道路や田畑の部分であると判断できる。

d 田畑部では、標高範囲がより狭くなっており、平地部で標高差が小さい地域であることがわかる。

e 山地部では、低標高部から高標高部にかけての広い標高範囲でデータが分布しており、他のデータで見られるような占有率が突出した標高部分は見られない。

このように、標高別ポイント占有率から、地形や土地利用を大まかな判断ができるものと思われる。また、地域によって分布状況が異なっているということは、この特徴を考慮した上で、その地形に応じたデータ処理方法を考える必要があるといえる。

(2) 都市部におけるデータの特徴

前項では地域別の特徴を標高の分布から考察した。本項では、都市部に焦点を当てさらにその特徴を見る。

レーザ計測による座標データの取得状況を、真上(平面)からと、側面(正面)から確認した。

- ① 真上(平面)から見た場合、全体的に計測点が配置され、対象区域でまんべんなくデータが取得されていることがわかる(図-3a)。なお、この図の中央部の濃く表現されている部分はデータ取得時の重複部である。
- ② 側面(正面)から見た場合、データが集中して取得されている部分と逆に取得データが少ない部分とに分かれている(図-3b)。

これは、レーザ計測が上空からの計測であり、航空写真のように上空から見える部分が計測されるためである。した

がって、**図-3b** で見られるような、データが集中している部分とは、上空から目視できる道路やビルの屋上といった部分である。特に都市部のような、ビルが多く存在する場所では、道路部分も含めてフラットな場所が多いということも容易に判断できる。

図-3c は、**図-3b** の地表面部と思われる部分の一部を拡大し標高を記したものである。そして、それぞれの標高値よりも低い部分の点群データをそれぞれ抽出し航空写真と重ね合わせた (**図-4a,b,c**)。この図から、地表面部データと建物部データとの境界が、9.50m~10.00m の

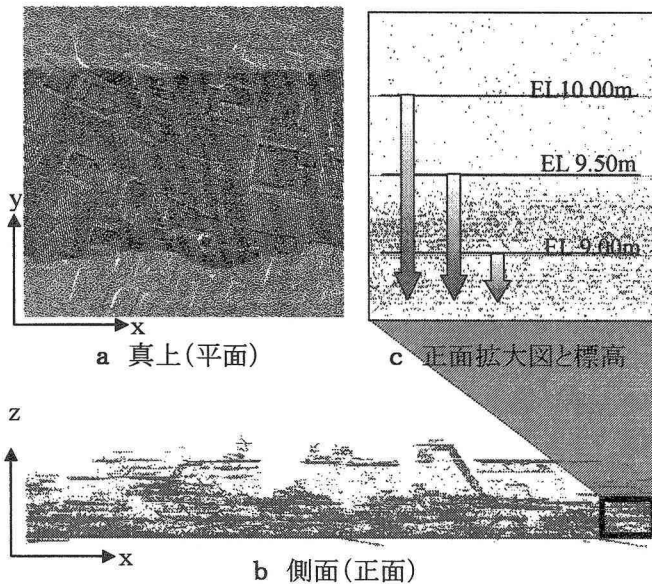


図-3 取得データの分布状況

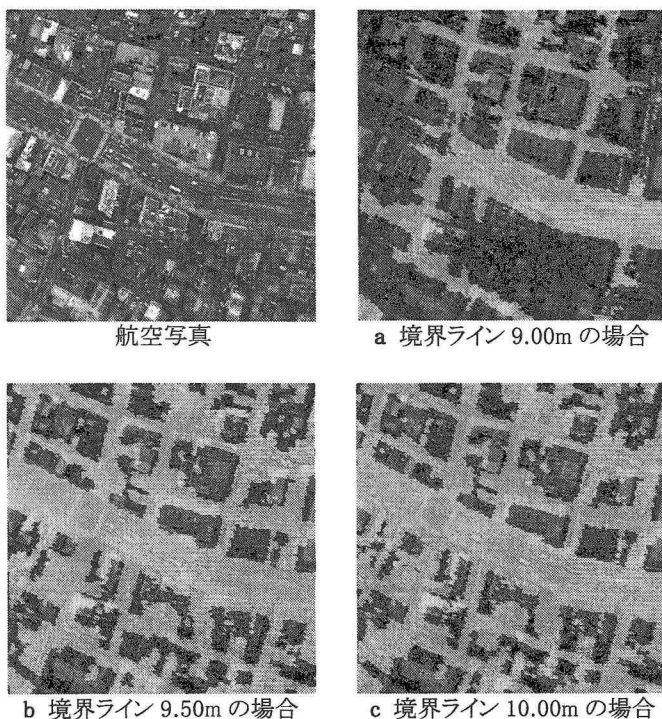


図-4 Ground Data の抽出

間にあると推測される。**図-2a** に示される地表面部データと建物部データとの境界となるラインを、データの分布状況等から解析し自動的に境界ラインを検出することで、瞬時に地表面部データと建物部データを分離することが可能と考えられる。なお、本論文では、地表面部データを「Ground Data」、建物部データを「Top Data」と呼ぶこととする。

このように、レーザ計測データの特徴を利用した、Ground Dataと Top Dataとの分離は、自動属性判別の第一歩となるものである。以降に、自動属性判別法の詳細について述べることとする。

3. 自動属性判別法について

ある任意のポイントの属性を判別するには、周辺の点群データの位置や標高との関連性をチェックすることが重要となる。しかし、全てのポイント毎に周辺の点群データとの関連性を把握しようとする、元となる点群データがランダムデータであることからデータ解析が困難となる。

そこで、本研究ではあらかじめメッシュサイズを任意に決め、メッシュ毎に標高を分割し、分布状況をチェックしながら走査していく手法を採用した。具体的には、メッシュ内にある全ての標高を平均し、その平均値を基準として解析するものである。したがって、この手法をメッシュ平均法と呼ぶ。

解析用パラメータとして、x方向のメッシュサイズを S_i 、y方向のメッシュサイズを S_j 、フラット形状の条件としてのメッシュ内データ基準値を m 、レーザ計測時の高さ方向の精

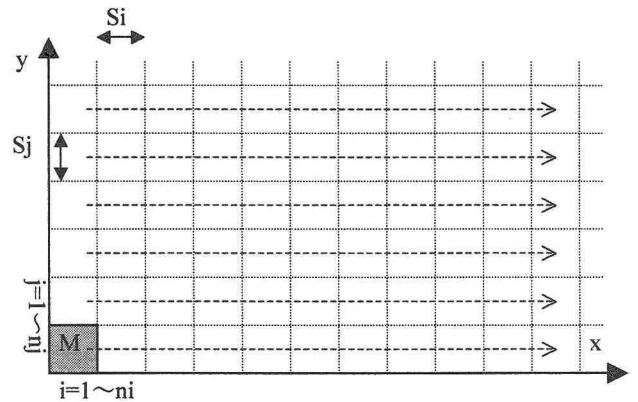


図-5 メッシュによるデータの走査

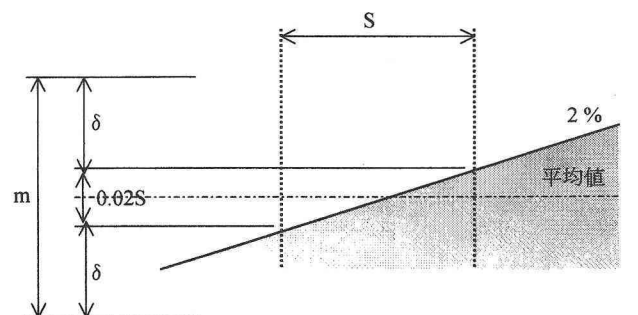


図-6 メッシュ内基準値

度を δ とした(図-5, 6). つまり, この基準値内 m におけるデータの占有率が 100%の場合に, そのメッシュはフラットな形状であるということである(図-7). また, 解析を行う際のメッシュサイズは, 解析の元となる点群データの特長により, x-y方向を様々に変更させることが望ましいが, 今回の解析ではx-y方向全てを同じとし, $S_i=S_j=S$ とした. また, フラットと見なせる勾配の限度は, 道路の一般的な横断勾配が 2%程度であることから, 本稿では図-6に示すように 2%とした. よって, フラット形状と見なすメッシュの基準値 m は, メッシュサイズ S , 計測精度 δ を用い, 次式で表される.

$$m = 0.02S + 2\delta \quad (1)$$

(1)点群データの平滑解析

本項では, 提案したメッシュ平均法を使用し, 実際のデータによるフラット形状メッシュの抽出を試みる. 使用するデータ範囲は図-3と同じ都市部のデータとし, メッシュ内データの基準値内占有率が 100%となるメッシュ, つまりフラット形状メッシュを抽出する. その結果を図-3bと同様に表示したものが図-8である. 図-3bでは明確でなかった同じ平均標高をもつ集合体が明確に確認できた.

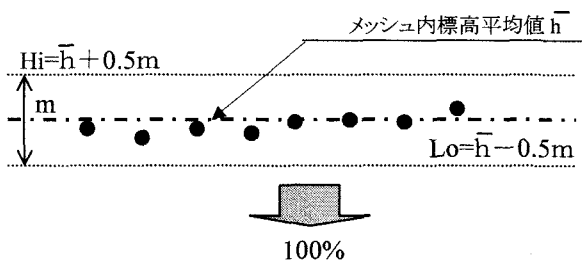


図-7 基準値内データ 100%の場合

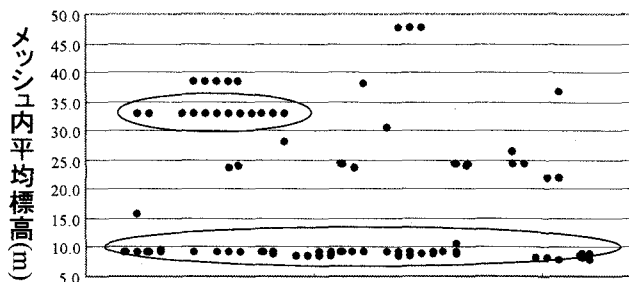


図-8 フラットメッシュ抽出結果分布

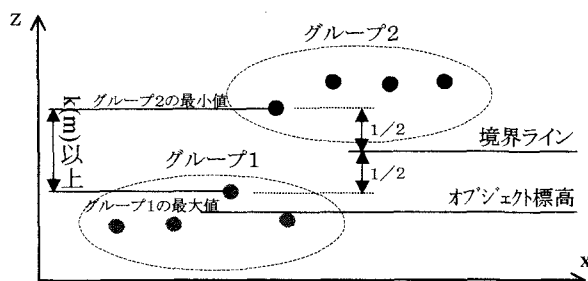


図-9 グループ分割方法

このデータの集合体をグループ化し, それぞれのグループの標高, データ数, 地物の種別等を調べることで, レーザ計測データの特長が詳細に見えてくると思われる.

グループの区別方法を図-9で説明する. グループと思われる各集合体間の標高の間隔が, 基準値 k 以上となった場合, お互いは別グループと判断する. なお, 図-9における用語の定義を以下に示す.

- ① 基準値 k : グループ1の最大値とグループ2の最小値の間隔を k と比較(間隔が k よりも大きい場合にグループを区別化)
- ② 境界ライン: 基準値 k によりグループを区別化した際の各グループ間隔の中間ライン
- ③ オブジェクト標高: 各グループの標高の平均値

また, この方法がフラット形状メッシュを抽出し, その分布状況により点群データの解析を行うことから, この解析方法を平滑解析と呼ぶこととする.

以上, 提案したメッシュ平均法及び平滑解析を用いて, グループ分割を行った. その設定値と結果を以下に示す(表-2, 図-10).

【解析用の設定値】

- $S = 5.00m$
- $\delta = \pm 0.15m$
- $m = 0.02 \times S + 2 \times \delta = 0.40m$
- $k = 0.50m$

表-2からわかるように, メッシュ数が一番多いグループ G02 と次のグループである G03 との境界ライン値が, 9.919m となった. これは, 第2章の航空画像との比較により推測したものと同一ような結果である. また, 図-10からもわかるように, グループ G02 以下のデータは道路などの地表面部, いわゆる建物以外のデータであると判断できる. このことは, 標高がグループ G02 よりも低い部分は Ground Data であり, 逆にそれ以外のグループは Top Data であると言える. この 9.919m を境界ライン値として点群データを Ground Data と Top Data に分割すると図-11のようになる. この Ground Data の空白部分を利用することで, 建物の輪郭を抽出することが可能であると考えられる. この輪郭(直線)の抽出について, 次の項で詳細を述べる.

(2)属性境界解析

前項で得られた Ground Data も, 元の点群データを境界ラインで上下に分割しただけであり, データ形式はランダムである. このランダムの状態から輪郭(直線)抽出をすることは, より現実に近いデータを得ることができると思われる(図-12). 本研究でも以上のことを踏まえつつ, 複雑な処理とならない手法を考察することとした.

考えられる手法としては, 平滑解析と同じように任意のメッシュサイズで分割し, データの存在するメッシュと存在しないメッシュの境界を探りながら, 追跡して行くという手法である. その手順を以下に説明する(図-13).

- ① 任意のメッシュサイズに分割(メッシュサイズ: s)

表-2 グループ分析結果

グループNo.	間隔	メッシュ数	境界ライン	オブジェクト標高
G01	0.000	4	7.346	6.577
G02	1.538	224	9.919	8.115
G03	1.626	2	11.509	10.732
G04	1.246	2	14.030	12.132
G05	3.121	2	16.797	15.591
G06	1.470	9	17.935	17.532
G07	0.612	1	18.714	18.241
G08	0.945	3	20.387	19.186
G09	1.108	2	21.395	20.941
G10	0.744	4	22.219	21.767
G11	0.766	2	25.041	22.602
G12	4.828	1	29.776	27.455
G13	4.642	2	34.960	32.097
G14	5.630	1	38.624	37.775
G15	1.697	8	-	39.472



図-10 Ground Data と航空画像

- ② 各メッシュにデータの有無で属性値を与える
 - ・ データの存在するメッシュ=「1」
 - ・ データの存在しないメッシュ=「0」
- ③ 属性が「1」のメッシュ、つまりデータが存在するメッシュについては、x, yの平均値を算出し、そのメッシュの代表ポイントの座標とする。
- ④ ②で与えたメッシュの属性値の配置状況から、該当するメッシュの代表ポイントの座標から、図-13のように直線を抽出して行く。

なお、図-13では右上方向の場合の直線抽出方法を1つの例として示しているが、図-14に示すとおり、右方向[(a)Level, (h)Below], 左方向[(d)Up, (e)Level, (f)Below], 垂直[(c)Up, (g)Below]の全部で8方向において行う。ちなみに図-13での例は、右方向[(b)Up]である。

以上の方法でメッシュサイズ s を 2.0m として、実際に輪郭(直線)の抽出を行った(図-15a,b)。なお、輪郭(直線)抽出はグループ G02 以下のみでなく、表-2の全ての

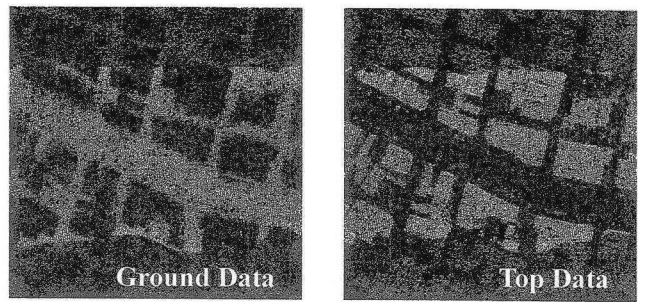


図-11 境界ラインによるデータ分割

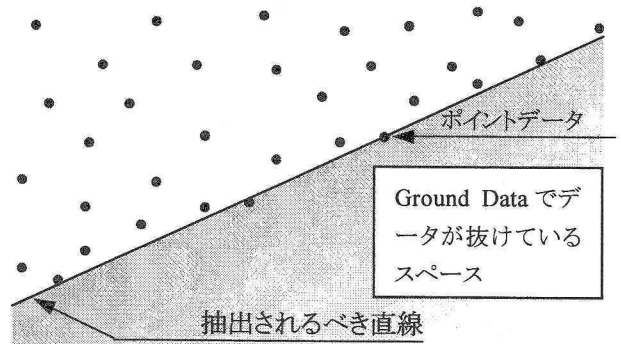


図-12 輪郭(直線)抽出のイメージ

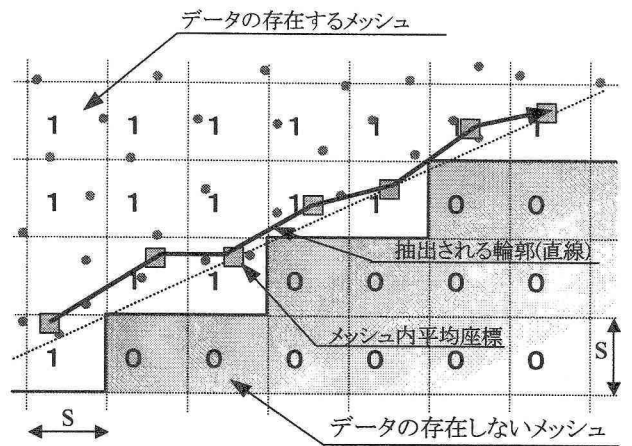


図-13 メッシュ分割による輪郭(直線)抽出

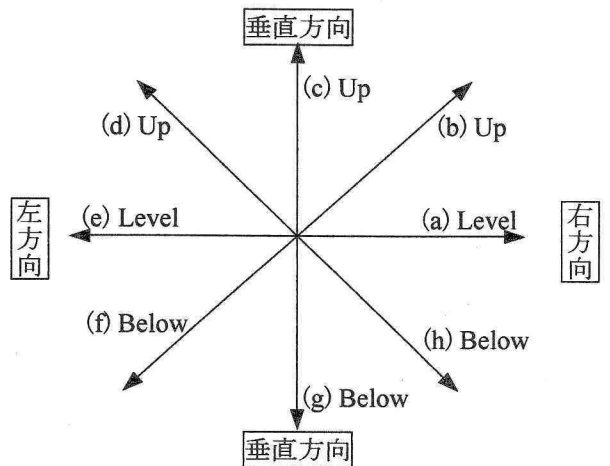


図-14 輪郭(直線)抽出方向

グループに対して行い、抽出された輪郭(直線)をオブジェクト標高に配置した。その結果を図-15cに示す。これにより、建物が三次元形状で表される。なお、この解析により抽出された輪郭(直線)は、建物の境界や高さといった属性を持っていることから、この解析方法を属性境界解析と呼ぶこととする。

以上のように、平滑解析と属性境界解析により都市部の形状が、レーザ計測データのみで自動抽出することが可能となった。これまでの作業の流れを図-16に整理した。

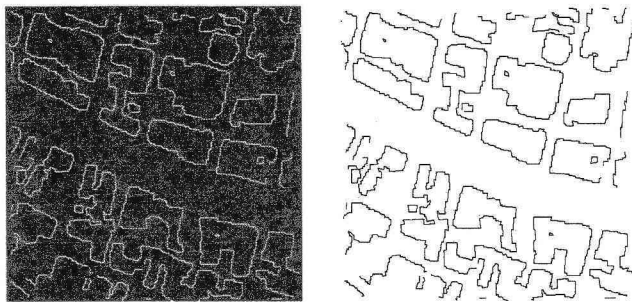
4. 適用事例

前章まで説明してきた自動属性判別法の適用事例として、①三次元都市モデル生成と②氾濫解析のための非構造格子モデル生成の2つについてモデル生成を行った。そして適用事例の対象として①福井県庁のある福井市中心部を、②2004年7月18日の福井豪雨で堤防破堤により浸水被害のあった地域をそれぞれ対象とし、レーザ計測データの加工を試みた。なお、後者の浸水被害のあった地域では、加工データの有効性を確認するため、氾濫解析も含めて行っている⁵⁾。

(1)三次元都市モデル生成

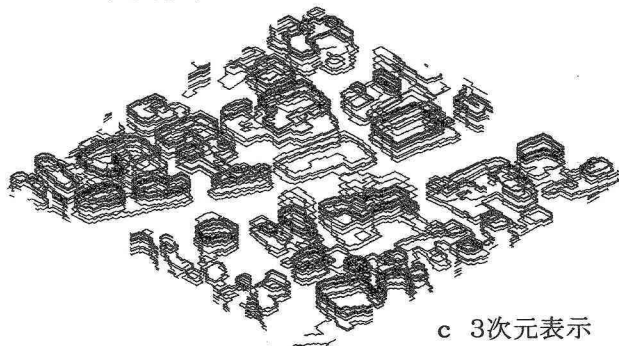
三次元都市モデル生成の適用範囲としては、福井県庁を中心とした、x方向750m、y方向750mの範囲において、平滑解析により得られた全てのグループに対し、属性境界解析を行い、建物等の輪郭(直線)を抽出し、高さ方向に対する情報を付加した(図-17)。

この三次元都市モデル生成における解析設定値を以下に示す。なお、解析メッシュサイズ S を決定するに当たり、



a 抽出結果

b CADで表示



c 3次元表示

図-15 属性境界解析結果

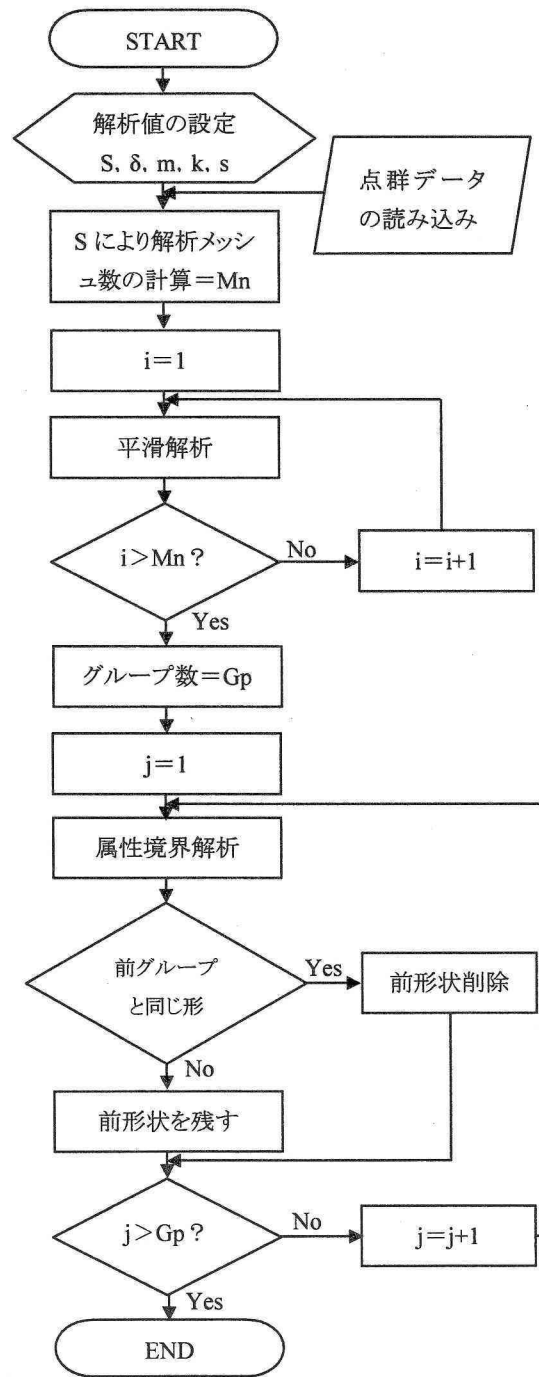


図-16 自動属性判別法のフロー図

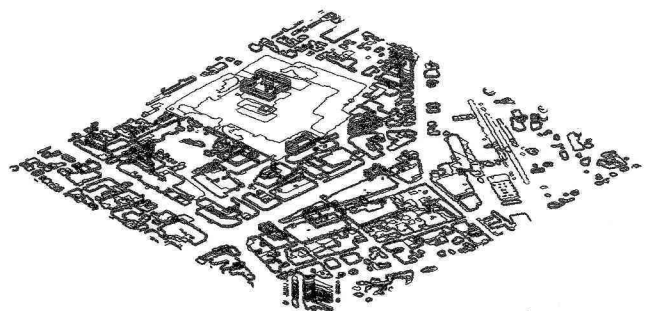


図-17 グループ全体の境界属性判別結果

今回の適用事例では、解析メッシュ内点群データ数が 30 ポイント以上となるよう考慮した。

【解析用の設定値】

$$S=5.00\text{m (メッシュ内平均ポイント数 : } 34.5>30)$$

$$\delta=\pm 0.15\text{m}$$

$$m=0.02\times S+2\times\sigma=0.40\text{m}$$

$$k=0.50\text{m}$$

次の段階として、CAD の機能である押し出しを使用し、建物等を3次元化、そして、Ground Data を合成し都市空間の3次元モデルを生成した(図-18)。また、3次元都市モデルがどこまで再現できているのかを、実際の斜め写真と比較した(図-19)。なお、この CG 画像作成にはレーザ

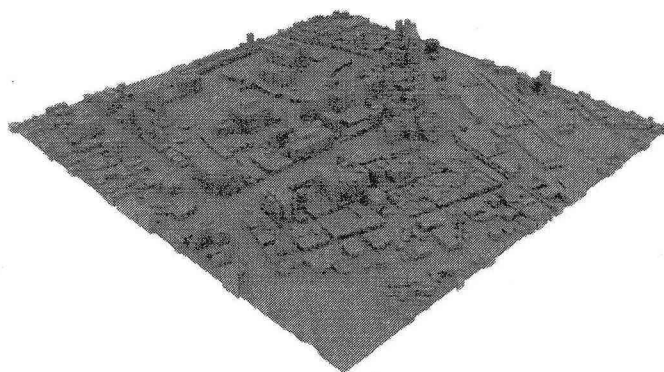


図-18 建物データと地形データの結合

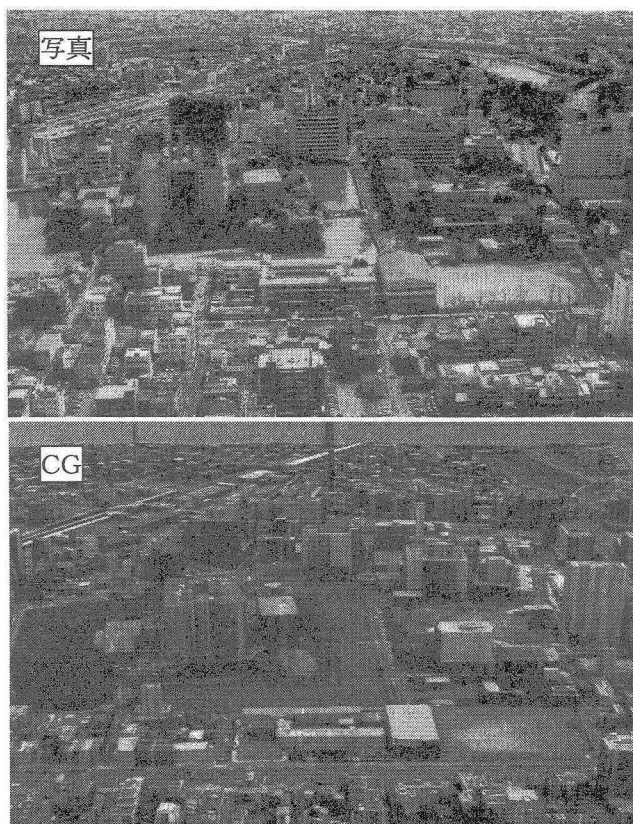


図-19 斜め写真との比較

計測データ取得時に同時に撮影された航空画像をテクスチャとして適用している。この図からもわかるように、ビルだけでなく屋上にある付属施設等も再現されている。なお、煙突のように見える部分は鉄塔であり、棒状の地物の再現はできていない。しかし、この問題点について、グループを区別する際に使用する S や k といった解析用の設定値を変更することで可能であると考えられる。

(2) 氾濫解析のための非構造格子モデル生成

昨年(2004年7月18日)の福井豪雨は、足羽川流域を中心として大きな被害をもたらした。その中でも福井市内における足羽川左岸の堤防破堤による被害は、床上・床下浸水など広範囲におよぶものであった。

この適用事例では、氾濫解析結果と実際の氾濫現象との違いを把握することを目的として、堤防破堤地点を含む x 方向 500m, y 方向 250m の範囲を選択した。この適用事例では、平滑解析で得られたグループの中から、フラット形状メッシュ数の一番多いグループ、つまり Ground Data のみを使用し、有限要素法による氾濫解析用の非構造格子モデルを生成した⁵⁾。図-20は前述した Ground Data と、このデータから一辺が約 10m となる非構造格子モデルを生成した結果である。

なお、この適用事例も都市部と同じ考え方で解析設定値を決めている。

【解析用の設定値】

$$S=5.00\text{m (メッシュ内平均ポイント数 : } 34.9>30)$$

$$\delta=\pm 0.15\text{m}$$

$$m=0.02\times S+2\times\sigma=0.40\text{m}$$

$$k=0.50\text{m}$$

生成したモデルを使用し有限要素解析により計算した氾濫開始から 10 分後の流速分布図を図-21に示した。図中の矢印は流速の方向と速さの大きさを表している。ま

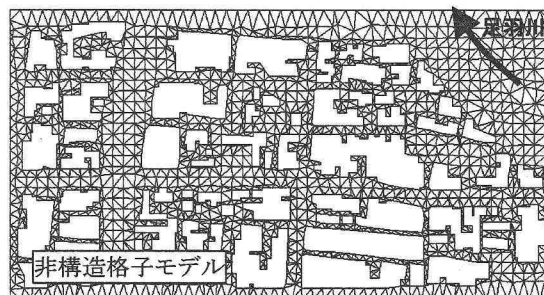
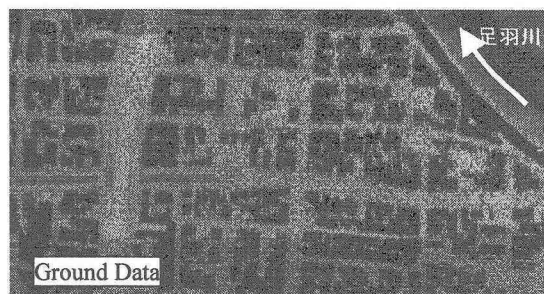


図-20 非構造格子モデル生成結果

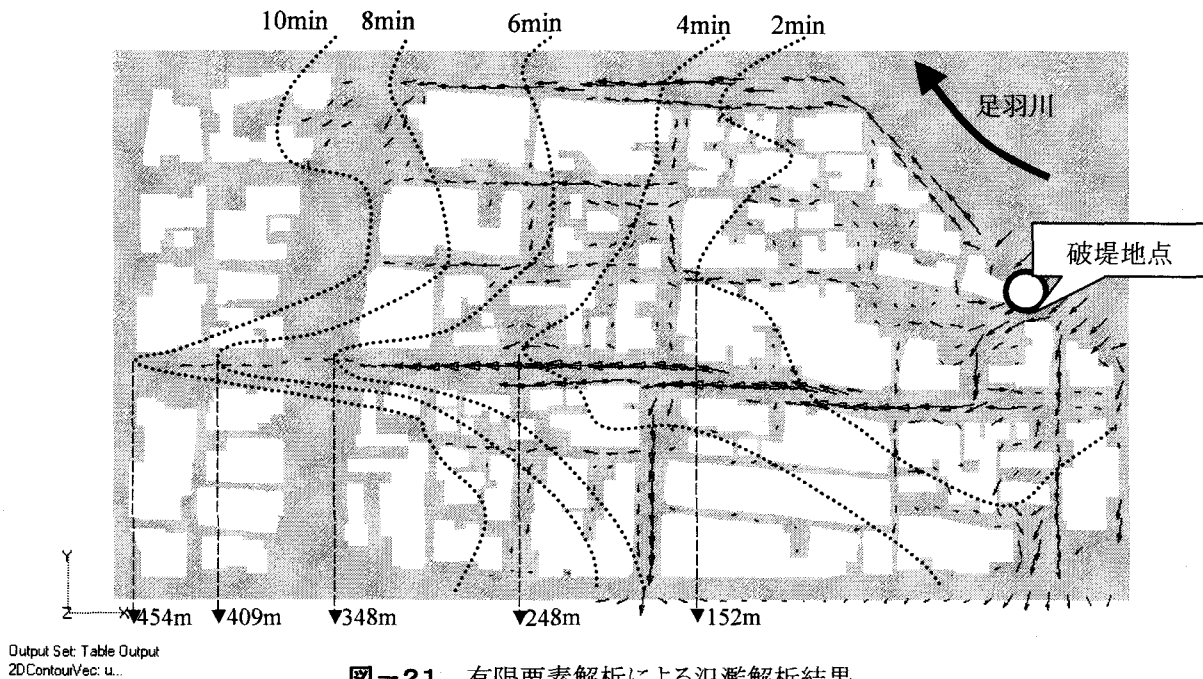


図-21 有限要素解析による氾濫解析結果

た、2分間隔の氾濫区域ライン及び、破堤地点から氾濫域の一番遠い地点までの距離も併記した。氾濫実績が時間経過で把握できていないため、この結果の定量的な評価、検証はできないが、氾濫状況を見ていた市民の方々からは、概ねこのような状況であったとの意見を頂いている。

5. 結論

本論文では、航空レーザ計測データの利用方法について、自動属性判別法による点群データを任意のメッシュで分割しながらデータを走査していく平滑解析と自動輪郭(直線)抽出を提案し、その適用事例として三次元都市モデル生成と氾濫解析のための非構造格子モデル生成を試みた。

非構造格子モデル生成では、生成されたモデルを使用した有限要素解析による氾濫計算を行い、時間経過での氾濫域の変化をシミュレートした。この結果から、堤防破堤後わずか6分で、破堤地点から約350mまで氾濫流が達することが明らかとなった。このように時間経過での氾濫流の挙動を把握できたことは、時系列によるハザードマップの整備、避難勧告(指示)や自主避難といった避難体制の迅速化に寄与するものと考えられる。

また、今回の研究では三次元都市モデルを使用した解析等は行わなかったが、風解析やヒートアイランド現象など、都市部での現象の解析にも使用できるものと思われる。

以上の解析では、一部CADを使用した手作業があったものの殆どを自動でモデル生成を可能とした。なお、それぞれのモデル生成に要した時間を表-3にまとめた。この結果から言えることは、作業に要した時間のうち、手作業であるCADでの作業時間が大きく占めており、この部分の

表-3 モデル生成までの作業時間

	三次元都市モデル	氾濫解析用モデル
平滑解析	約2分	約1分
属性境界解析	約17分	約1分
調整作業(CAD)	約5時間	約2時間
合計	約5時間19分	約2時間2分

※コンピュータスペック Pentium4 3.20GHz 2.0GB RAM

※氾濫解析用モデルの属性境界解析は Ground Data のみ

自動化が今後の課題と言える。しかし、これまで解析用のモデル生成に数日間要していたことを考慮すると、大きく時間短縮を可能にしたものと思われる。

本研究で提案した自動属性判別法が都市部においては一定の成果を得ることができたが、都市部以外の地域でも同じような結果が得られるとは限らない。今後は平滑解析だけでなくスロープやエッジといった、その他の形状情報も自動判別する解析手法を検討し、都市部以外での可能性についても研究していきたい。

参考文献

- 1) アジア航測(株)ホームページ: http://www.ajiko.co.jp/service/space/03_raser_bird.html, 2005年5月現在.
- 2) 政春尋志:航空レーザースキャナー, P21, 全測連 2001 年新年号
- 3) 織田和夫ほか:フュージョンによる都市モデルの自動構築, 日本写真測量学会年次学術講演会, pp.135-138, 2003 年6月
- 4) 川本一樹ほか:レーザースキャナーを活用した河道モデル作成手法に関する研究, 土木学会第57回年次学術講演会, pp.393-394, 2002 年9月
- 5) 上野幹夫ほか:レーザ計測データを用いた有限要素法による洪水氾濫解析. 第30回情報利用技術シンポジウム論文

(2005.5.19 受付)