

ヘリコプター搭載レーザスキャナの標高計測精度とGISへの応用の可能性

Accuracy of Elevation Measurement with
Airborne Laser Scanner and its Potential Application in GIS企画部 村上広史
Planning Department Hiroshi MURAKAMI測図部 筒井俊洋
Topographic Department Toshihiro TSUTSUI地理調査部 中川勝登
Geographic Department Katsuto NAKAGAWA

要旨

ヘリコプターに搭載したレーザスキャナを用いて地形を計測するシステムについて、その計測精度とGISへの利用の可能性を検証した。その結果、位置精度（標準偏差）は、鉛直方向が10～25cm、水平方向が約1mであった。また、二時期のデータを比較するだけで、GISデータベースの中の建物等の変化を容易に検出することが可能であることが明らかとなった。

1. はじめに

近年、過密化する都市の高度利用等の必要性から、3次元GISの研究が盛んになってきている（Kirkby, et al., 1997）。しかし、現在利用されているGISデータベースは、建物の正確な高さの情報を持っていないものが多く、3次元情報を取得する手法の開発についても、自動化に向けた研究が進められている段階である（Weidner and Foerstner, 1995; Lang and Foerstner, 1996）。さらに、変化の激しい都市域にあっては、GISデータベースの効率的な変化部抽出が極めて重要になっており、人工衛星画像や空中写真画像の自動認識による地物情報取得手法の開発が行われている（村上, 1992; 史・柴崎, 1995）。

一方、スキャン型のノンミラーレーザ測距儀（以下、「レーザスキャナ」と呼ぶ）を航空機に搭載して地表の3次元形状を把握する手法が、従来のステレオ写真測量とは全く異なる地上標高計測システムとして実用化されつつある（Ackermann, 1996; Flood and Gutelius, 1997; 村上・他, 1997a）。本研究では、地形計測用に開発されたヘリコプター搭載レーザスキャナシステム（以下、「ヘリレーザスキャナシステム」と呼ぶ）を市街地3次元計測に適用し、その実利用可能性を検討するために、空間及び時間精度について検証した。また、その3次元情報と既存のGISデータベースを組み合わせ、建物の地上高を自動的に計算する手法の開発を試みるとともに、2時期の計測データを比較することにより、変化部を自動的に抽出する手法の実用性について検証し

た（村上・他, 1997a, b）。

2. ヘリレーザスキャナシステム概要

本システムは、図-1のシステム概略図に示す通り、ヘリコプターに搭載されるレーザスキャナ、ヘリコプターの位置及び姿勢を計測するGPS装置（地上基準局も含む）及びデータ記録装置の3つのサブシステムと、取得されたデータを地上で解析するためのデータ解析装置により構成される（村上・他, 1996）。

レーザスキャナは、高橋（1995）がプロファイラーとしての利用の可能性を紹介したノンプリズム測距儀をスキャナとして改良したもので、その仕様概要は表-1の通りである。ヘリコプターの進行方向に直角にレーザビームをスキャンさせることにより、地表とレーザスキャナの距離を面的に計測できる。仕様上の最大計測可能距離は400mであるが、屋外で約50mと450m離れた地点を1千回繰り返し計測した結果、その測距精度は標準偏差でそれぞれ3cm及び9cmであった（国土地理院, 1996）。

GPS装置は、地上基準点を使った高精度ディファレンシャル法を用いたもので、車両に搭載して地上の6地点について標高計測を行った結果、鉛直方向の測定精度（標準偏差）は13cmであった。また、4個のGPSアンテナによりヘリコプターの姿勢を3軸方向の測定精度0.1°（公称標準偏差）で検出し、レーザビームの方向を決定できるようになっている。

8mmテープ等に記録された計測データは、地上でパ

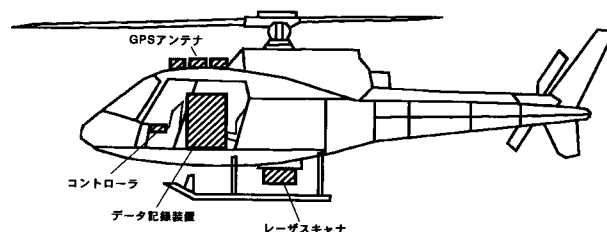


図-1 ヘリレーザスキャナシステム概略図

表-1 レーザスキャナの仕様概要

項目	仕様
レーザ発射回数	20,000/sec
スキャン回数	25 回/sec
スキャン角度	±30°, ±20°, ±5° 切り替え式 中心を 45° 傾けられる
ビームの広がり角	2.5m rad
サンプリング	700 点/scan
地上分解能	50cm (スキャン幅 60°, 飛行速度 45km/h)

ソコンにより処理され、位置と姿勢データの解析とそれぞれのレーザパルスに対応した距離計測の結果から3次元データ (DEM) として出力される。

3. テスト地域と使用データ

本研究のためのテスト地域を、岐阜県美濃加茂市の中心部約0.12km²に定めた (図-2)。同地域には、JR美濃太田駅、街路樹のある道路、屋上に看板等のある商店街、10階建ての高層ビル、木造2階建ての住宅等多様な建造物が存在し、ヘリレーザスキャナシステムの機能検証に適した地域になっている。また、データ取得時間の検証用にはある程度の面積が必要であるため、JR美濃太田駅を中心とした約2km²の範囲を定めた。ヘリレーザスキャナシステムによる同地域の計測は、ヘリコプターの飛行高度及び方向の依存性と同一地域における計測値の再現性について検証を行うため、1996年10月21日及び同年12月13日の2日間にわたり、表-2に示すような計測を行った。飛行コースは、10月21日の計測がテスト地域中央の道路沿いに南北方向で、12月13日の計測は図-2に示す矢印の方向である。これらの計測の内、12月13日の東西方向3コース分の計測データをモザイクした結果を図-3に示す。取得されるデータには、各レーザビームによる距離計測毎にその時のヘリコプターの3次元位置及び姿勢の情報が含まれているため、計測対象地域に設定された一定間隔のグリッド上に自動的に取得データを並べ替えることができる。したがって、図-3のような計測データのモザイクは自動的に行われる。なお、並べ替えの際の内挿法は、現在のところ最近隣法を用いており、同一グリッド内でデータが重複した場合は、最低標高のデータを代表値としている。

このテスト地域に対しては、美濃加茂市が縮尺500分の1のデジタルマッピングにより作成したGISデータベースを利用することが可能であり、その平面位置精度は標準偏差で地上25cmより小さい。本研究では、このGISデータベースの一部である建物ポリゴンデータと都市計画基礎調査による建物の階数のデータを用いた。この建物ポリゴンデータを、ヘリレーザスキャナシステムの計測データと同じピクセルサイズ (50cm) でラスタ化し、それぞれの階数が区別できるようにしたものを図

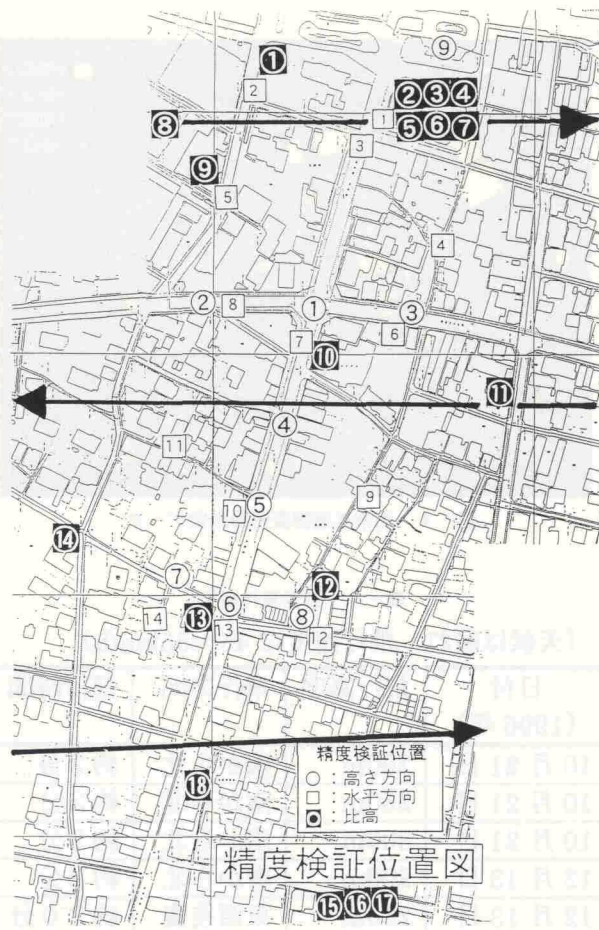


図-2 テスト地域と検証点

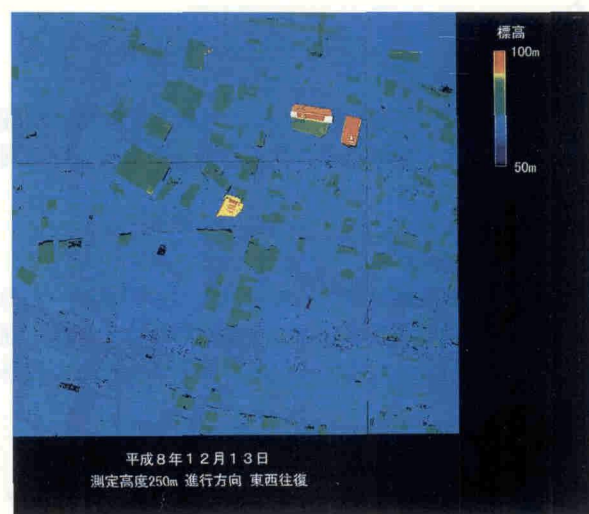


図-3 12月13日の計測データ (飛行高度250m)

4に示す。GISデータベースは毎年更新されているが、使用したデータの更新年が1995年であるため、その後の時間変化により、ヘリレーザスキャナシステムによる計測結果とは建物が完全には対応していない。

また、建物地上高の計測精度検証のために、図-2に示す18カ所の建物の屋上等を検証点として定めてその地

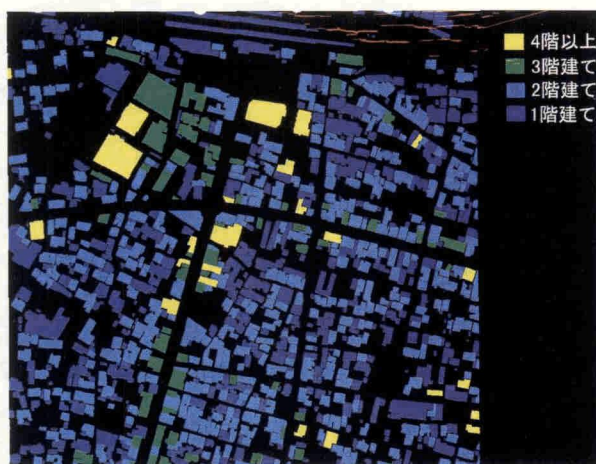


図-4 都市基礎調査建物階数データ

表-2 計測飛行諸元

(天候は晴れ、飛行速度は 45~55km/h)

日付 (1996年)	飛行高度	飛行方向	飛行時間
10月21日	200m	南から北	約2分
10月21日	250m	南から北	約2分
10月21日	300m	南から北	約2分
12月13日	200m	南から北	約2分
12月13日	250m	東西往復	約30分

上高を縮尺8,000分の1のステレオ空中写真により計測した。

4. 精度検証

本システムにより計測されたデータの位置精度検証は、図-2に示す検証点における鉛直及び水平方向に対して行った。

4.1 鉛直方向精度

鉛直方向の精度検証のためには、下水道施設データの一部である美濃加茂市中心部の9カ所のマンホール上面の標高値を利用し、対応する位置の計測データとの較差

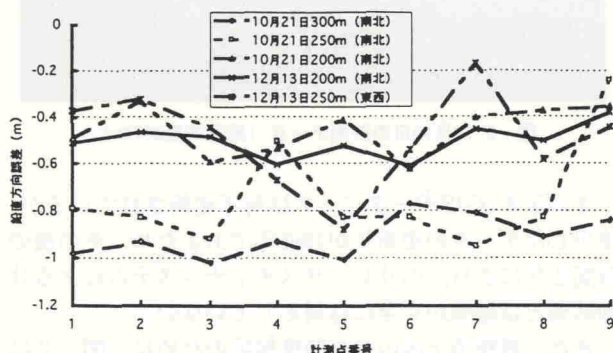


図-5 鉛直方向精度検証結果

を計算して行った。比較結果を図-5に示す。図から明らかなように、飛行方向及び飛行時期の違いに対する誤差の依存性は大きくは認められず、標準偏差では10~25cmの範囲に入っていることがわかる。しかし、計測値そのものは、そのすべてが下水道施設データよりも系統的に低い値を示しており、しかもその絶対値は飛行高度が高いほど大きくなる傾向にある。

4.2 水平方向精度

水平方向の精度は、建造物や敷地の角などの位置の明確な14地点をGISデータベースから抽出し、対応する計測データとの較差を計算することにより検証した。また、飛行方向の依存性を調べるため、東西・南北方向に分けて比較を行い、それぞれ図-6, 7に示す結果を得た。水平方向の誤差の標準偏差は、東西・南北方向とも概ね1mであるが、飛行方向に平行な方向のほうが直交する方向よりも誤差が大きい傾向にある。図-2の精度検証点の分布と比較すると、特に、図-6の12月13日の飛行高度250mのデータではピッチ方向、10月21日の飛行高度300mのデータではロール方向、図-7の10月21日の飛行高度200mのデータではヨー方向の姿勢の誤差が生じており、水平方向精度の向上のためにはシステムの姿勢検出精度の改善が必要であることが理解できる。

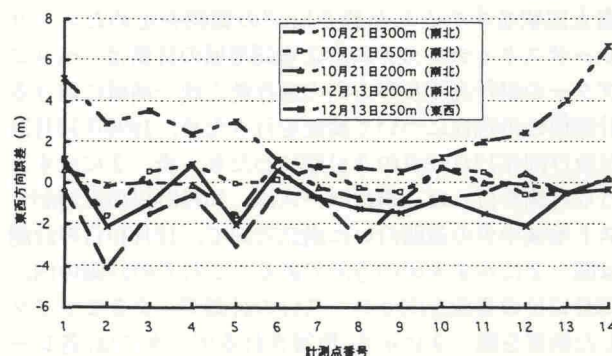


図-6 水平(東西)方向精度検証結果

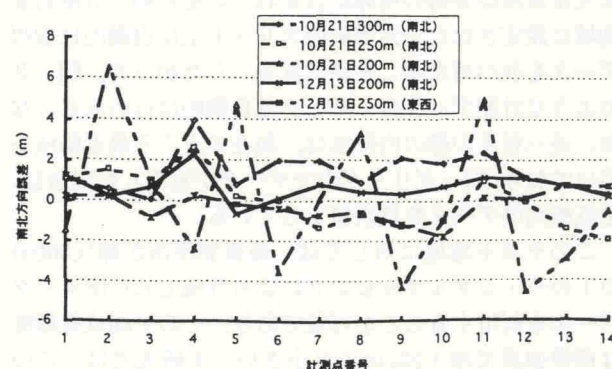


図-7 水平(南北)方向精度検証結果

5. 計測及びデータ処理に要する時間

データ取得時間検証用のテスト地域約2km²の範囲

を計測するのに要した時間は表-2に示すように約30分であった。その計測データを地上においてパソコンで処理するには約2時間を要した。

6. 建物地上高計測精度

ここでは、本研究で開発した、ヘリレーザスキャナシステムにより得られる都市域の標高画像から建物の地上高を検出する手法とともに、その手法を用いて実際の計測データから検出した建物の地上高の精度検証結果について述べる。

6.1 建物地上高自動検出手法

ヘリレーザスキャナシステムの計測データから得られるのは、地上物体のある程度以上の面積をもった頂上部分の標高である。したがって、建物等の地上高を求めるには、個々の建物について、その頂上部分と周辺の地表部分の標高を自動的に検出し、差分を取らなければならない。本研究では、これらの位置を建物ポリゴンデータから取得した。すなわち、計測データの各スキャンラインにおいて、各建物データ部分の両側の標高の平均値を地表部分の標高値として求めた。建物の頂上部分の標高は、個々の建物ポリゴンデータと重なる部分の標高データの平均値として求めた。ただし、手法の検証のために、図-2の検証点の地上高を空中写真測量により求めた値と計測データから求めた値との比較を別途行った。

6.2 建物地上高自動検出手法の精度検証結果

図-2に示す検証点の地上高を前節の手法で計算した値と空中写真測量により計測した値とを比較した結果を図-8に示す。10月21日計測のデータで、欠落している検証点があるのは、南北方向1コースだけの計測であったため、検証点をすべて計測できなかったことによる。検証点10番をはじめとした較差の大きな点は、計測データの平面位置精度が悪く、写真測量で計測した位置と平面位置の異なる点に対応していたり、建物周辺の構造物により地表面高が見かけ上高くなったために生じたものと考えられる。これらの較差が大きな点について、筆者らが計測データ上で直接位置を特定して建物の地上高を読み取った値と空中写真測量の計測結果とを比較したのが図-9である。図-9の計測結果では、較差の標準偏差が約30cmであった。ヘリレーザスキャナシステムの平面位置精度や建物地上高の検出アルゴリズムが改善されれば、自動的に同程度の検出精度が得られると期待できる。

6.3 建物階数の自動計測手法の精度

図-4に示した範囲について、上述の手法により建物の地上高を検出し、図-4との比較が容易になるように建物の階数に変換して表示したのが図-10である。地上高から階数への変換には、村上・他(1996)が写真測量

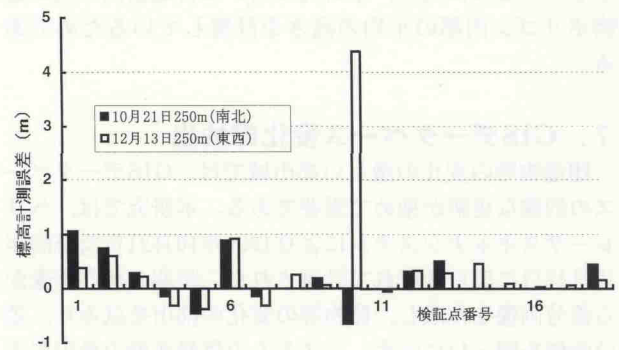


図-8 建物地上高自動検出結果

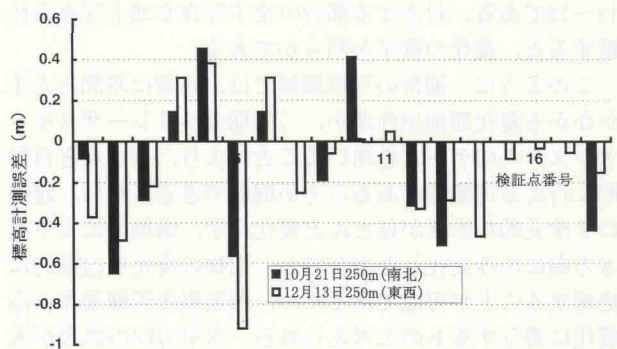


図-9 建物地上高検証結果(手動計測含む)

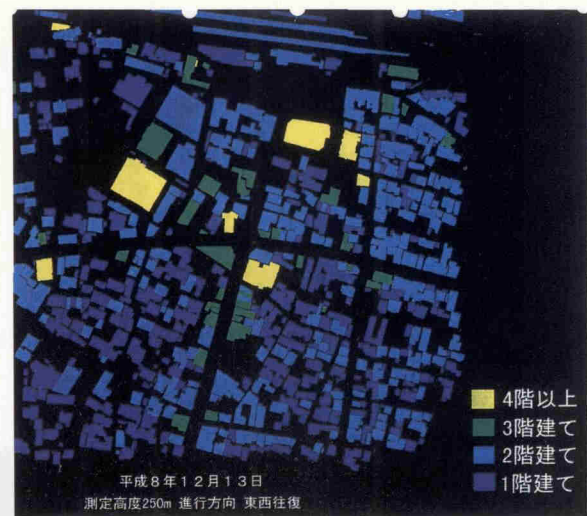


図-10 建物階数自動検出結果

により計測した同一地域の建物の各階数の地上高の平均値を用いた。階数の正解率は約7割であるが、図-10から明らかなように、自動的に検出された階数は本来の階数よりも全体に低い方向にずれる傾向にある。これは、建物ポリゴン内の建物の高さが一様ではなく、GISデータベースの建物階数が個々の建物の最高階部分の階数を

示しているのに対し、本研究で用いた自動検出手法が建物ポリゴン内部の平均の高さを計算しているためである。

7. GISデータベース変化部抽出

建造物等の変化の激しい都市域では、GISデータベースの的確な更新が極めて重要である。本研究では、ヘリレーザスキャナシステムにより1996年10月21日及び同年12月13日に53日間離れて計測された二時期の標高画像から差分画像を作成し、建物等の変化の抽出を試みた。差分画像を図-11に示す。システムの姿勢変動の検出が不十分であるため、水平方向の位置誤差が大きく、建造物のエッジが抽出されているが、その中に2つの変化部分が確認できる。それぞれの变化部分を拡大したのが図-12～13である。対応する部分の空中写真や地上写真と比較すると、変化の様子が明らかである。

このように、通常の写真測量では、処理に時間と人手がかかる変化部抽出作業が、二時期のヘリレーザスキャナシステムのデータを用いることにより、ほとんど自動的に行える可能性があることが理解できる。特に、建物の2次元的な形状がほとんど変化せず、増築等により高さ方向にのみ変化した場合でも、建物の変化を自動的に把握することが可能であるため、固定資産管理業務の高度化に寄与するものと考えられる。水平方向の誤差が大きいため、まだ実用段階には到っていないが、姿勢変動をさらに精度よく検出することができれば、変化部抽出作業の自動化が図られると考えられる。

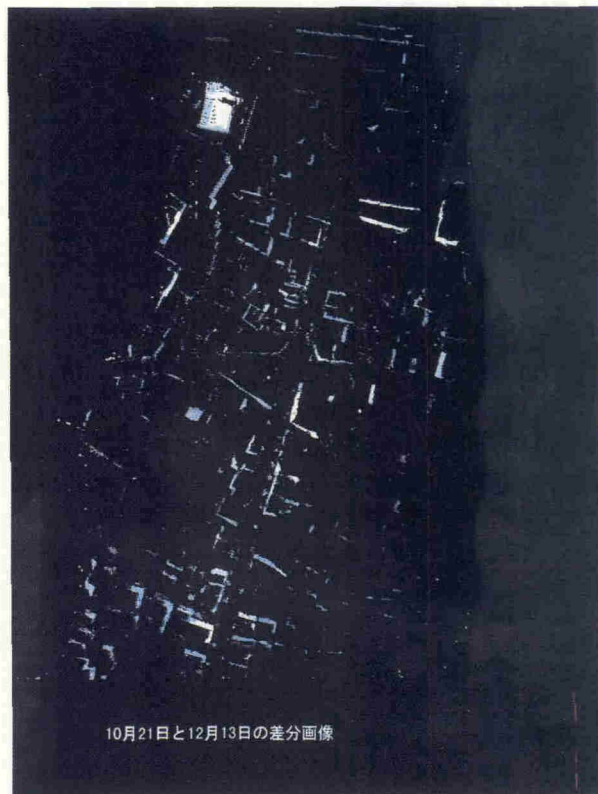


図-11 2 時期の計測データの差分画像

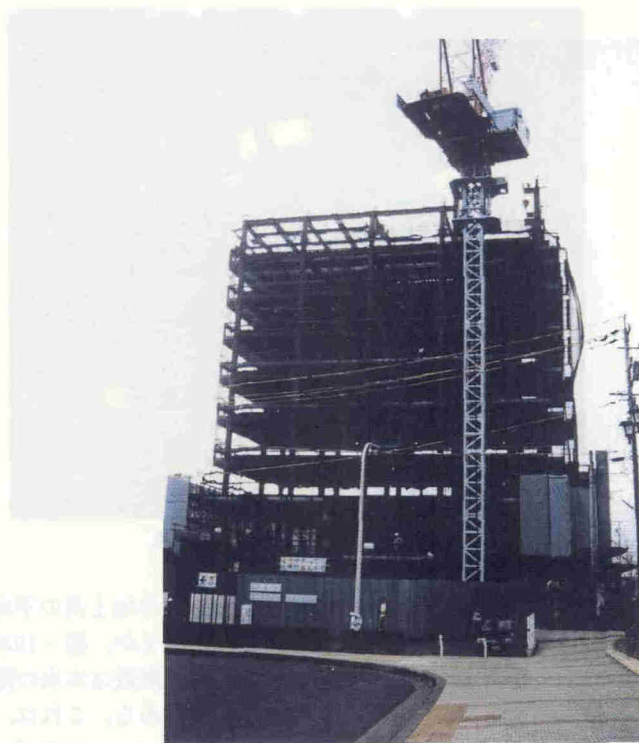


図-12 抽出された変化部（建設中のビル）とその地上写真

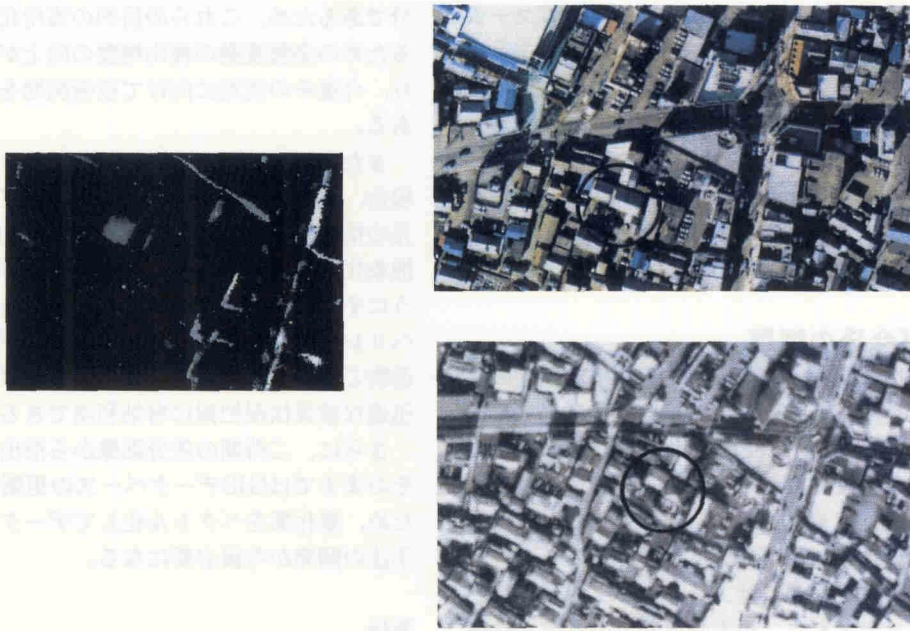


図-13 抽出された変化部（建て替えられた建物）と建て替え前後の空中写真

8. 考察

8.1 GISデータベース3次元化の課題

建物の屋上には、看板・空調施設・ソーラーパネル・給水塔等の多様な構造物が存在する。また、屋上や屋根の形も、水平・三角・尖塔と建物によって極めて多様である。しかし、図-14から明らかなように、本研究で用いたヘリレーザスキャナシステムは、50cmという地上分解能の範囲で、これらの構造物や屋根の形を極めて忠実に計測している。一方、現在のGISデータベースの個々の建物データは、通常正射影の周辺のみを一つのポリゴンとして記録しているだけであるため、一つの建物でも場所によって階数が異なる場合には、その3次元形状を忠実に再現できない。また、ヘリレーザスキャナシステムの計測結果を用いて、そのような複雑な形状の建物に

一つだけの高さ情報を付与しようとする、主たる構造物の地上高とは異なる値が計算されてしまう可能性がある。都市基礎調査のような建物階数の情報を取得しようとする場合は、主たる構造物を抽出する手法の開発が必要であり、そのためのアルゴリズム開発が今後の課題である。

8.2 変化部抽出の課題

ヘリレーザスキャナシステムが標高（距離）を計測するシステムであるため、二時期の計測データの差分を取るだけでセンサーの解像度より大きな建造物の地表部分の変化を検出することが可能である。また、2次元の建物ポリゴンの形が変化しないような増改築があった場合でも、変化を自動的に検出できる点でこれまでのGIS



図-14 計測された屋上部分の細部構造

データベースの2次元的な更新の考え方を高度化し得る画期的な手法であるといえる。しかし、現在のシステムでは平面位置精度が不十分であるため、二時期のデータの差分画像を作成したときに建造物のエッジ部分が抽出されてしまい、検出されるべき変化部との区別が必ずしも容易ではない。これは、ヘリコプターの姿勢変動の検出精度の向上により解決されることが考えられるが、振動や姿勢変化の激しいヘリコプターでそれを実現するための技術開発が大きな課題となっている。

9. 結論及び今後の課題

ヘリコプター搭載レーザスキャナを用いて市街地の3次元計測による精度検証を行った結果、位置精度(標準偏差)は、鉛直方向が10~25cm、水平方向が約1mであることが明らかとなった。今後水平方向の位置精度の改善が必要であるが、解決されれば2,500分の1縮尺レベル程度の3次元地理情報の獲得に利用できるものと考えられる。また、本システムは、そのデータ処理がほとんど自動で行えるとともに、曇天や夜間での計測も技術的には可能であるため、地震・火山・土砂災害等緊急時の迅速な被災地域の状況把握にも役立つ時間精度を有すると思われる。

本研究を通して、GISデータベースの3次元化及び更新に対するヘリレーザスキャナシステムの有用性及可能

性が明らかとなった。計測データの平面位置精度が不十分であるため、これらの目的の実用化にはその改善を図るための姿勢変動の検出精度の向上が不可欠となっており、今後その実現に向けて技術開発を行っていく予定である。

また、GISデータベースの自動的な3次元化を考える場合、複雑な建造物の3次元形状をどのようにして3次元の情報にしていくかということに加え、3次元形状を抽象化してGISデータベースの中で有効に利用できるようにするための手法の開発が必要である。しかし、当面ヘリレーザスキャナシステムの計測データそのものを建造物ごとに切り出して管理しておくだけでも、震災等の迅速な被災状況把握に有効利用できると思われる。

さらに、二時期の差分画像から抽出された変化部は、そのままではGISデータベースの更新には利用できないため、変化部をベクトル化してデータベースに埋め込む手法の開発が今後必要になる。

謝辞

本研究は、1995~97年度科学技術庁振興調整費「ヘリコプターによる災害状況調査手法に関する研究作業」に基づいて行われました。また、本研究でのGISデータベースの使用を許可していただいた岐阜県美濃加茂市に深謝いたします。

参考文献

- 国土地理院 (1996): 平成7年度ヘリコプターによる災害状況調査手法に関する研究作業報告書。
- 国土地理院 (1997): ヘリコプターによる災害状況調査手法に関する研究作業(その2)報告書。
- 史・柴崎 (1995): 「ウェブレット変換による画像分割とステレオマッチングを利用した航空写真からの建物の自動抽出の試み」, 写真測量とリモートセンシング, Vol.34, No.5, pp.36-44.
- 高橋 (1995): 「ノンプリズム測距儀の特性とその応用」, 測量, 1995年1月号, pp.25-29.
- 村上 (1992): 「地図修正のための建物自動抽出」, 写真測量とリモートセンシング, Vol.31, No.3, pp.4-15.
- 村上・筒井・岩浪 (1996): 「ヘリコプターを用いた倒壊家屋現況把握の試み(第1期)」, 日本写真測量学会平成8年度秋季学術講演会発表論文集, pp.59-62.
- 村上・筒井・柴田・岩浪 (1997a): 「ヘリコプター搭載レーザスキャナの3次元計測精度」, 写真測量とリモートセンシング, Vol.36, No.3, pp.58-61.
- 村上・筒井・柴田・岩浪 (1997b): 「ヘリコプター搭載レーザスキャナによるGISデータベース変化部抽出と3次元化」, 写真測量とリモートセンシング, Vol.36, No.6, pp.31-40.
- Ackermann, F.(1996): "Airborne Laser Scanning for Elevation Models", GIM, Vol.10, No.10, pp.24-25.
- Flood, M. and B. Gutelius (1997): "Commercial Implications of Topographic Terrain Mapping Using Scanning Airborne Laser Radar", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.63, No.4, pp.327-366.
- Kirkby S.D., R. Flint, H. Murakami, and E. Bamford (1997): "A Changing Role of GIS in Urban Planning", GIM, Vol.11, No.8 1997, pp.6-8.
- Lang, F. and W. Foerstner (1996): "3 D-City Modeling with a Digial One-eye Stereo System", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXI, Part B4, pp.261-266.
- Weidner, U. and W. Foerstner (1995): "Towards Automatic Building Reconstruction from High Resolution Digital Elevation Models", ISPRS Journal, 50(4), pp.38-49.