3次元ＧＩＳのためのデータ作成
－航空機搭載スキャナシステムによる形状データ取得－

3 Dimensional Data Acquisition for GIS
－ Feature Extraction from Airborne Laser Scanner System －

地理地殻活動研究センター　　長谷川裕之
Geography and Crustal Dynamics Research Center　Hiroyuki HASEGAWA

要　旨

地表面の凹凸や地物の高さ・形状を直接取得することのできる航空機搭載スキャナシステムを用いて，建物のポリゴン(立体的形状)データを効率よく作成する手法に関して，これまでの研究成果を紹介する。まず始めにこのシステムの概要，および得られたデータの精度について簡単に述べる。次に，得られた高さデータから建物の平面形状をベクトルデータとして取り出すためのいくつかの手法を紹介しこの手法を適用して得られた結果について述べる。最後に，平面的な形状のみしか表していない2次元ベクトルデータとこのシステムを用いて得られたデータを組み合わせて，建物の屋根の形状を推定し，立体的なデータを得るための手法とその適用結果に関して紹介する。

1．はじめに

これまでの伝統的な地図情報は，紙という二次元平面上に情報を表示するという制約があったため，その多くが二次元情報に限られてきました。コンピュータをはじめとする情報機器・技術の発達によりコンピュータ上でデジタル的に地図情報を扱うことのできる地理情報システム (Geographic Information System, GIS) が登場してきましたが，大部分のGISデータは紙地図の場合と同様に二次元データを主体としており，GISの利用も従来紙地図上で行われていた道路・施設管理や平面的な案内システムなど，古典的な紙地図と変わらない利用方法に限られていました。しかし，近年特に顕著な，情報機器のよりいっそうの高速化・大容量化，および情報を視覚的に分かりやすく表示するためのビジュアライゼーション(可視化)技術の進歩により，従来紙地図・GISデータを扱っていた地図・測量分野のみならず，地理座標と連動した情報を扱う全ての分野で三次元データの利用が今後急速に進むと考えられます。例を挙げると，高層ビルや高架道路・鉄道，あるいはランドマークを建設した場合に周辺地域の風景に与える影響を評価するための景観シミュレーション，あるいは高層ビルの林立する都市域において携帯電話等の通信可能エリアを解析・管理して通信効率の検討を行う通信エリア管理，従来の平面的なイメージでなく，インターチェンジや立体交差などの状況をより忠実に再現するような三次元的カーナビゲーションシステムといった三次元空間情報の利用方法や，写真等のマルチメディア情報と組み合わせた三次元データの利用方法がすでに研究されています。

三次元データの解析・表示方法が急激な進歩を遂げつつある一方で，三次元データを作成する方法としては，従来と同様に航空写真等の画像からステレオマッチング技術によって建物や地表面の高さを計測したりする方法や，GPSやトータルステーションを用いた通常の測量によって三次元座標を得る方法が主流を占めていました。しかしながらこうした従来の方法は，データの取得に人手と時間が必要とされ，特に緊急時・災害時といった情報を迅速に収集しなければならない場合に素早くデータを作成するのが困難でした。

これに対し，レーザ測距技術の向上とGPSによる座標測定技術の進歩により，航空機などの移動体にレーザスキャナを搭載してリアルタイムに対象物の座標を測定することが可能となってきました。この手法は，今後の改良次第では従来写真測量を用いて行われてきた作業の大部分を置き換えてしまうほどの可能性を持っています。そこで今回は，国土地理院においてこれまで研究を行ってきた，ヘリコプターにレーザスキャナとCCDスキャナを搭載して地上対象物や地形の三次元的形状と色彩とを同時に・素早く・精度よく把握できる航空機搭載型スキャナシステムと，得られるデータの特徴，さらにこのデータを利用した現在進行中の研究について紹介したいと思います。

2．航空機搭載型スキャナシステム（Airborne Scanner System, ASS）

ASSは，航空機にリアルタイムに位置を測定するための座標・方位計測システム (Position and Orientation System, POS) と，対象物までの距離・角度を測定するためのレーザスキャナ (Laser Scanner/Laser Range Finder)，それに通常の写真と同様の光学的画像を得るためのCCDスキャナ (CCD Scanner) を搭載したシステムです。航空機の種類としては，いわゆる飛行機とヘリコプターの二種類が考えられますが，もともと自然災害時に地上から現場に近づくことのできない場所に関するデータを取得する目的でシステムを設計したため，小回りが利き，かつ解像度を上げるためにより低空で飛行す

表－1　各センサの性能諸元

センサ	項　目	性　能
POS	自己位置 姿勢(Roll, Pitch) (Heading) データ取得周期	±2cm ±0.025deg ±0.05deg 毎秒50回
レーザスキャナ	測距精度 測角精度 データ取得周期 パルス発射数	±20cm ±1mrad 毎秒25ライン 毎秒20,000回
カラーCCD スキャナ	画素数 アライメント精度 データ取得周期	2048画素×3 ±1画素 毎秒56ライン

図－1　地表面データの作成フロー

ることのできるヘリコプターを使用しています。

POSは，GPS(Global Positioning System, 汎地球測位システム)を用いた三次元位置取得システムと，INS(Inertial Navigation System, 慣性航法システム)を用いた姿勢・加速度取得システムからなっています。GPSを用いると航空機の絶対的な三次元座標を精度よく(数cm)求めることができます。しかし座標の計測間隔は1秒間に1回であるので，GPSからの情報のみでは速度の速いヘリコプターの位置補正を行うには不十分です。逆にジャイロと加速度計を組み合わせたシステムであるINSは，毎秒50回の頻度で航空機の位置(正確には加速度)，機体の傾き，進行方向を計測することができます。しかし，INSシステムには一定方向に誤差が蓄積するドリフトが生じます。そこで，絶対位置精度のよいGPSデータを用いて1秒ごとにINSデータを補正し，時間的にも空間的にも精度のよい座標・姿勢データを得ています。

レーザスキャナは，2点間の距離の測定に用いられるレーザ測距儀と同じ原理を用いて形状データを得るための装置です。レーザパルスを振動する鏡を用いて航空機の進行方向と直角に少しずつ角度を変えて発射し，レーザパルスが物体に当たって反射して帰ってくるまでの時間を求めることにより，機体から対象物までの相対的な距離と角度を求めることができます。今回使用したシステムでは，毎秒25ライン分のデータを取得することができます。また，レーザスキャナの解像度は，対象物までの距離によって変化しますが，ヘリコプターの飛行高度である高度250mにおける解像度は50cmとなります。カラーCCDスキャナ(以下CCDスキャナ)はデジタルカメラ等に用いられている，カラー画像を得るためのCCD素子を直線状に並べたものです。得られる画像は，通常コンピュータで扱われるのと同様のRGB(Red, Green, Blue)の要素を持つフルカラー画像です。CCDスキャナを用いることによって，レーザスキャナでは得ることのできない，現実の物体の質感を再現するのに必要な対象物の色に関する情報を得ることができ，よりリアルな3次元データを作成することが出来ます。CCDスキャナのデータ取得周期は1秒あたり56ラインであり，レーザスキャナシステムより短い間隔でデータを取得することができます。

上に述べた3種類の装置で得られたデータから，以下に述べる方法で三次元データを作成します。

- 航空機に搭載されたGPSシステムによって得られたデータと，地上に設置されたGPS基準点のデータを用いて，1秒ごとの航空機の軌跡を求める。
- INSによって得られた情報を用いてGPSから得られたデータを補間し，航空機の位置と姿勢を毎秒50回の周期で求める。
- レーザスキャナのスキャン時刻とCCDスキャナのスキャン時刻を用いて双方のデータの対応付けを行う。この操作によって，ある時刻にある方向を見たときの対象物までの距離と色を決定することが出来ます。
- スキャン時刻とその時のヘリコプターの位置・姿勢データから，地表面の三次元データ(高さデータとカラーデータ)を作成する。この時点においては，地表面データはメッシュ(碁盤の目)状ではなく，ランダムに並んでいるので，後続の作業で扱いやすいようにメッシュ状に並んだデータに加工する。通常は，メッシュの大きさをレーザスキャナの解像度にほぼ等しい50cmとしています。

以上の手順を表すと図1のようになります。手順から明らかなように，ASSを使用することのメリットとしては，地上基準点を用いた解析・補正などの手作業を全く必要としないことから，得られたデータから自動的処理で直接3次元データを得られると言う点が第一に上げられます。また，もっとも早い場合には飛行後数時間から半日程度でデータを取得できるという迅速性という面でも従来の方法と比べて非常に優れています。

得られたデータの精度という面では，高さと座標が精

度よく求められている道路上のマンホールなどの検証点を用いてこのシステムの絶対位置測定精度を調べたところ，垂直位置精度が標準偏差で約50cm，水平位置精度が航空機の進行方向と直角方向に対してそれぞれ約1mという結果が得られました。このようにASSは，効率・迅速性・精度の全ての面において優れた性能を示しています。

3．データ取得

次に，このシステムを利用して実際に取得されたデータを示します。図2は，平成10年8月19日に取得された，岐阜県美濃加茂市中心部のDEM (Digital Elevation Model, 高さデータ) です。標高の低い部分は灰色で，標高が高くなるに従って白くなるよう高さ別に色分けして表示されています。黒い部分は，対象物の材質などによりレーザパルスの反射がなかった部分か，手前の高い対象物によりレーザパルスが遮られて陰になっている部分を示しています。

この図から明らかなように，50cmという詳細なDEMによって，複雑な都市の三次元形状を正確に再現することができます。例えば右上部にはプラットフォームをまたぐ形で 高架駅舎が存在していることが分かります。また，駅前には数軒の大規模建物・高層建物が存在しています。さらに，左下には比較的高さが低く規模も小さい建物が多数存在する住宅地が広がっていることも分かります。また，主要道路沿いに存在する街路樹の様子も見て取ることができます。また，図3はDEMと，CCDスキャナによって取得された光学画像から作成された駅前の鳥瞰図です。このように高さデータと光学データを合成して用いることにより，それぞれのデータ単独では把握することの困難な情報を得ることができます。例えば，右側のDEMでは単に円形に高くなっているとしか分からない駅左上の部分は，駅前のロータリーであることが鳥瞰図から分かります。また，道路と歩道の材質が異なることによる色の違いも分かります。さらに，駅舎からプラットフォームに降りる階段の形状やプラットフォームの形状もよく再現されています。

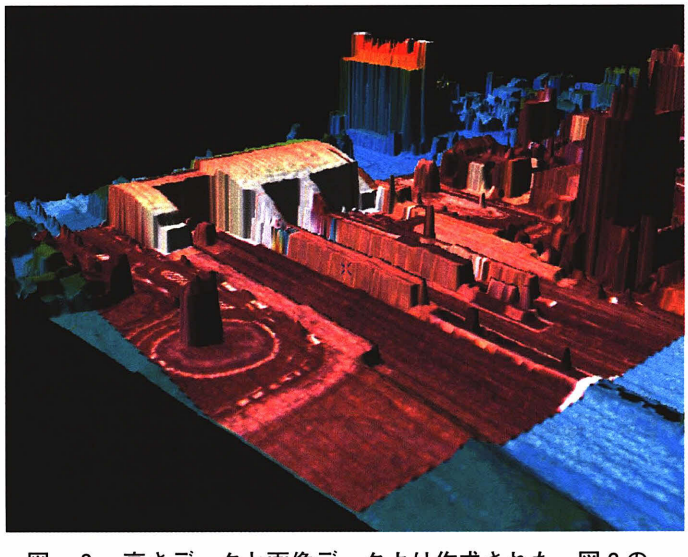
以上のようにASSは立体的な構造を持つ都市部において，三次元形状を効率的に取得するのに非常に有効なシステムであるということがいえます。

4．建物変化の抽出

建物変化の把握と，それに伴うGISデータの更新は，固定資産管理への直接的応用のみならず，GISデータを常に最新の状態に保って有効に活用する上で重要です。従来建物変化の把握は，オペレーターによる航空写真の目視判読により行われてきました。しかしこの方法はオペレーターの能力に多くを依存しており，特に都市部のような建物変化の頻度が高い地域では，データの作成に非常に時間がかかるだけではなく，ミスによる判読漏れが起こりやすいと言う欠点があり，より効率的な方法が模索されていました。前述したようにASSにより取得されたデータは水平位置で1m程度の誤差しか含んでいません。また，建物の新築を行う場合を考えると，最低でも3m四方程度の領域で数mに及ぶ建物高さ・位置の変化が起こることから，ASSで取得された二時期分のデータを単純に比較(引き算)することにより，建物変化の候補を十分に抽出・把握することができると考えられます。

図4は，岐阜県のある都市の駅前200m×150mの地

図－2　高さデータより作成された段彩図。白いほど高さが高い。黒い部分はデータ欠測部分



図－3　高さデータと画像データより作成された，図2の駅前を北西（左上）から眺めた鳥瞰図。駅舎とプラットフォーム，ロータリーなどが確認できる。

図－4（左）二時期（平成8年及び平成11年）の画像から高さが変化している部分を取り出した画像。（右）平成7年に撮影された同じ地域の画像。

域について，平成8年12月に取得された高さデータと，平成11年3月に取得された高さデータの，高さ方向に関する差分をとった画像です。白く表示されている部分が高さに1.6m以上の変化があった部分です。差分画像と平成8年に撮影された同一地域の航空写真とを比較すると，画像中央上部の大きく変化している部分は高架化された駅舎とプラットフォームであることがわかります。また，駅の右上や左下には大きな建物が建設されたことが理解できます。このように，従来は二時期の航空写真を丹念に比較して建物変化部を見つけださなければいけなかったのに比べて，単純に二時期のデータ差分をとることのみによって建物変化部の候補を容易に把握することができ，効率的な建物GISデータの更新に役立つものと期待されます。ただし，計測誤差によるデータのずれにより建物の縁が検出されてしまう場合があるので，今後は，変化抽出部の形状やCCDスキャナによる対象物の色などの情報から建物変化部のみのデータを取り出して建物検出を自動的に行う研究などを行う予定です。

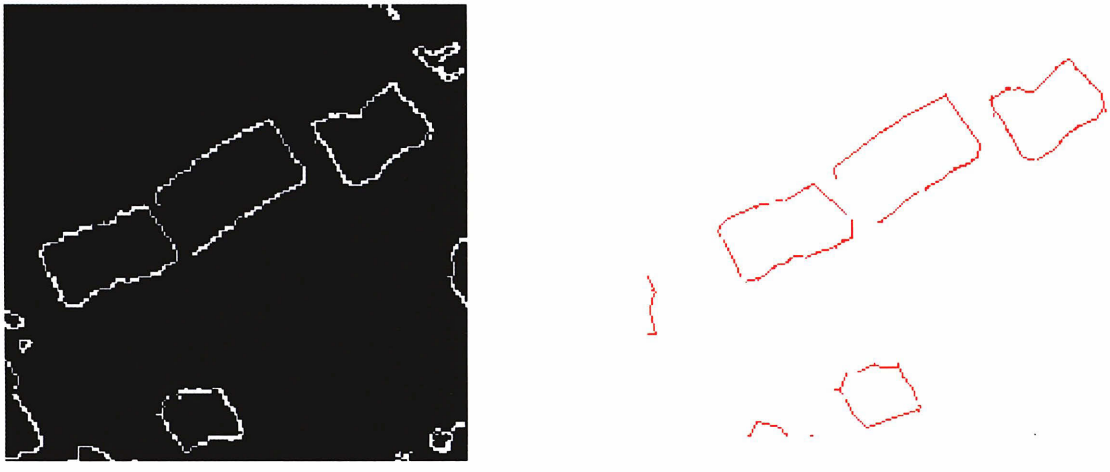
5．三次元都市モデルの作成（ベクトル情報の抽出）

これまで述べてきたデータの利用例は，全てデータを画像（ラスター）として用いるものでした。ラスター型としてデータを扱うと，Ⅰ）データ構造が単純，Ⅱ）データの重ね合わせ・解析が容易，Ⅲ）取り扱うための技術が簡単，という利点がありますが，その一方で，Ⅰ）データ量が多くなり，Ⅱ）データ量を減らそうとすると情報の損失が起こり得る，という欠点があります。一方データをベクトル型として扱うと，Ⅰ）データ構造が複雑になる，Ⅱ）取り扱うための技術が高度になる，という欠点はあるものの，Ⅰ）データ量を減少させることができ，Ⅱ）すでにGISデータとして所有している所有者，構造，価値などの属性データと組み合わせることが可能になります。

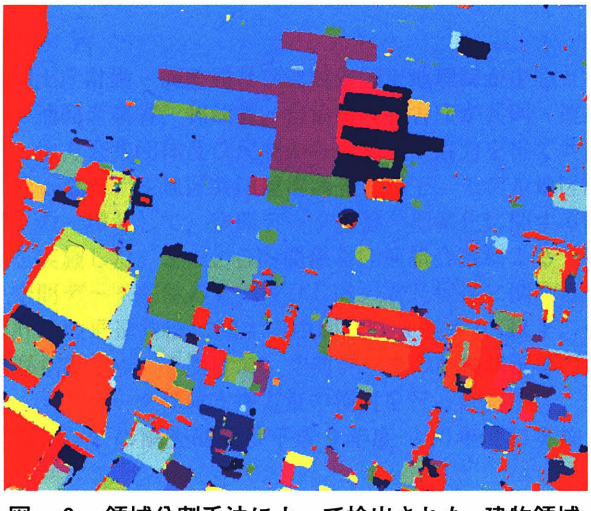
そこで国土地理院では，レーザデータから個別の建物を認識して抽出し建物の平面的な外形（footprint）をベクトルデータとして取り出すための研究，および既存の二次元ベクトルデータと組み合わせて建物の高さを推定する研究を行っています。建物外形を取り出す研究としては，エッジ検出手法を用いた研究と，領域分割手法を用いた研究を行っています。エッジ検出手法とは，高さデータに対して一次微分を行って建物の縁など高さが変化する場所を線状の部分として検出し，得られたエッジを取り出してベクトル変換する手法です。図5にエッジ検出を行った結果得られた画像（左図）と，この画像からベクトル変換によって取り出された線分のデータ（右図）を示します。このように建物データを画像データとしてでなく線分データとして持つことにより，データ量を大幅に削減することができます。しかし高さの差が少なく建物の縁がエッジとして検出されない場合には線分がとぎれてしまい建物が閉じた領域として取り出せなくなることがあるので，検出されなかったエッジを推定したり，逆に余分なエッジを消去するための効率的な方法を研究する必要があります。

領域分割法は，隣り合った地点の高さの差がある値（しきい値）以下である場合には，それぞれの地点が同じ対象物の一部分とみなして画像を分割する手法です。領域分割法を用いて建物を分類した例を図6に示します。このように領域分割法を用いると始めから建物を閉じた領域として取り出すことができますが，しきい値によっては小規模な建物が道路として分類されたり，逆に小さな凹凸が建物として分類されたりするので，データによって適切なしきい値を与える必要があります。

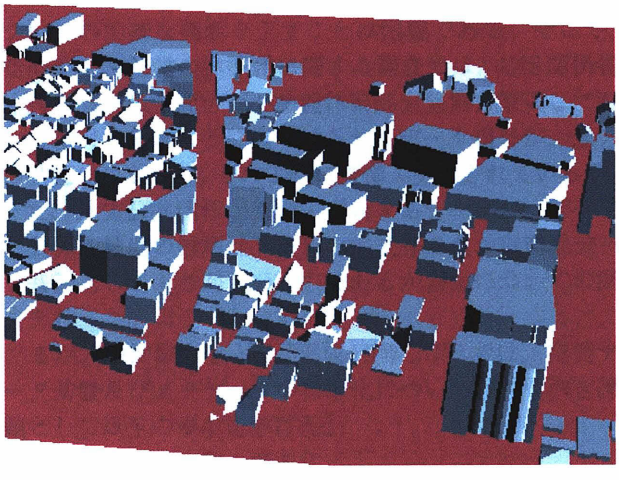
既存データを用いて建物高さを推定し三次元モデルを作成する研究としては，都市計画データとして作成された建物GISデータを建物外形として用い，レーザスキャナデータを高さデータとして用いて両者を組み合わせる研究を行っています。屋根の形状を数通りのモデルで表現し，建物外形内の高さデータからもっとも適切なモデルを選択して当てはめて屋根の高さ・形状を決定しま



図－5　エッジ抽出手法によって検出された，建物縁（左図の白い部分）。右図は検出されたエッジをベクトル変換して得られた建物外形。



図－6　領域分割手法によって検出された，建物領域。領域を分割する境となるしきい値は80cm。



図－7　既存GISデータによる建物外形データに，ASSによって得られたデータから屋根の高さと形状を推定して与えた鳥瞰図。

す。このようにして作成された三次元モデルを図7に示します。これを見ると，ASSにより取得されたデータを利用して現実の街並みを忠実に再現するための満足のいく三次元モデルを作成することが可能であるといえます。

6．まとめ

GISやデータ表現技術の発展に伴って，解析などに必要な三次元データを効率的に収集する必要性も同時に高まってきています。今回は現在研究を進めている航空機搭載型スキャナシステムの概要と得られたデータの紹介を行い，従来の手法と異なり三次元データを計測によって直接取得できるというこのシステムの持つ特長を示しました。スキャナを航空機に搭載して上空から広範囲の三次元データを一度に取得できるこのシステムは，技術的・精度的にまだ問題が残っているものの，従来の手法では得られなかった効率と迅速性というメリットを持っています。また従来は複数枚の航空写真を用い，地上基準点などの情報を入力して時間のかかる処理をしなければ作成することのできなかった鳥瞰図も容易に作成できます。

さらに得られた三次元データを用いた応用的な研究として，異なる時期のデータを用いた建物変化抽出や建物ベクトルデータの作成，既存データと組み合わせた三次元モデルの構築に関する研究についても紹介しました。これらの研究によって，このシステムによって得られた三次元空間データが，さらに高度な空間情報として利用されることが期待されます。

参考文献

- 長谷川裕之，中川勝登，政春尋志，岩浪英二，1998，レーザスキャナとCCDスキャナによる正射画像の作成，日本測量学会平成10年度秋季学術講演会発表論文集，51-54
- 神谷　泉，長谷川裕之，1999，ヘリレーザースキャナデータと建物平面形データによる3次元モデルの作成，日本測量学会平成11年度年次学術講演会・日本リモートセンシング学会第26回学術講演会合同学術講演会発表論文集
- 村上広史，筒井俊洋，柴田　拓，岩浪英二，1997，ヘリコプター搭載レーザースキャナの3次元計測精度，写真測量とリモートセンシング，36(3)：58-61
- 政春尋志，長谷川裕之，1999，レーザースキャナによる高密度DEMの領域分割による建物形状の抽出，写真測量とリモートセンシング，38(4)