



空中移動体による地図生成とポジショニングの現状

大鋸 朋生¹

1. はじめに

全地球測位システム（GPS）が民生利用され始めて10年余り、GPSとその付随技術は日常生活のありとあらゆる場面に恩恵をもたらしている。言うまでもなく、GPSの目指した第一の用途は軍事利用だったが、米国国防総省が民生での利用を促進したため、かなり早い時期から民生利用に向けたGPS受信機の技術開発も進んだ。

もちろん、民生利用では測量用途以外での利用者の方が多いのは言うまでもないが、GPSは長距離地点間の測地観測だけではなく、短距離地点間での超精密な地上測量にも利用可能な素晴らしい特徴を利用して、あらゆる地上測量や測地基準点測量、特に図化¹⁾に要する標定点の数量を減らすため、写真撮影用航空機の自己位置測定などに日常利用されるようになった。

日本国内においては、国土地理院がGPSを効率良く利用するための電子基準点と呼ばれる技術を展開しており、航空測量分野でも主に海外メーカーが開発している航空機搭載型のデジタル計測機器（レーザレンジファインダやデジタルカメラ）と電子基準点データを組み合わせた利用が進んでいる。

本稿では、著者が所属する会社で実施されている航空測量に、当社で開発した計測機器・技術（モバイルマッピング車両や三次元地図生成技術²⁾などの関連応用技術を組み合わせた事例を交えて、空中移動体（以降、航

空機と呼ぶ）で実現した三次元位置情報計測技術による地図生成とポジショニングの現在について、その概要を紹介する。

2. GPS登場以前の地図生成手法とは

航空測量では、航空機用に開発された特殊なカメラ（以降、航空カメラと呼ぶ）を搭載した航空機が上空から写真撮影し、用途に合致する地図³⁾を作成している。しかし写真そのものは、地図のように無限遠から“正射投影”されたものではなく、レンズ中心（投影中心）以外では斜めから撮影された“中心投影”像であり、幾何学的な歪みを含む。しかも、1枚の航空写真からは、撮影時の航空機位置と姿勢⁴⁾が決定できないため、写真内の位置と実空間上との位置を正確に対応付けできず、そのままでは地図作成に供し得ない。

そこで写真撮影に先立ち、撮影地域内に対空標識と呼ばれる目標物を複数設置し、標定点測量と呼ぶ真位置同定のための手続きにより写真内位置を特定するとともに、1枚ごとの写真中心点が、隣接するそれぞれの写真内に互いに写るように連続撮影した2枚以上の写真をステレオ処理し、写真1枚ごとの位置・姿勢を解析的に算出して地図を作成していた。これら一連の作業は、現在でも多くの工程が専門技術者によって実施されている。これらの作業を経て、地図作成工程へ移る。作業の流れを図1に示す。

図1のように、従来の航空機による地図生成は、作業計画から現地測量・写真撮影・地図作成工程に至るまで、作業のほとんどを熟

¹ アジア航測㈱

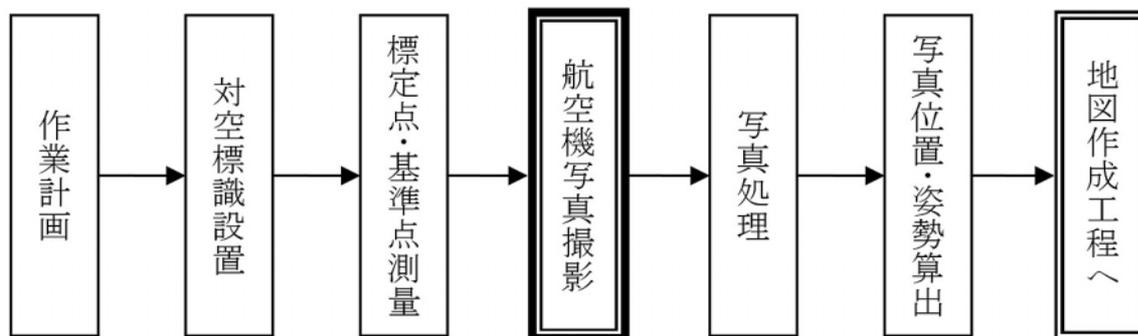


図1 従来の作業工程

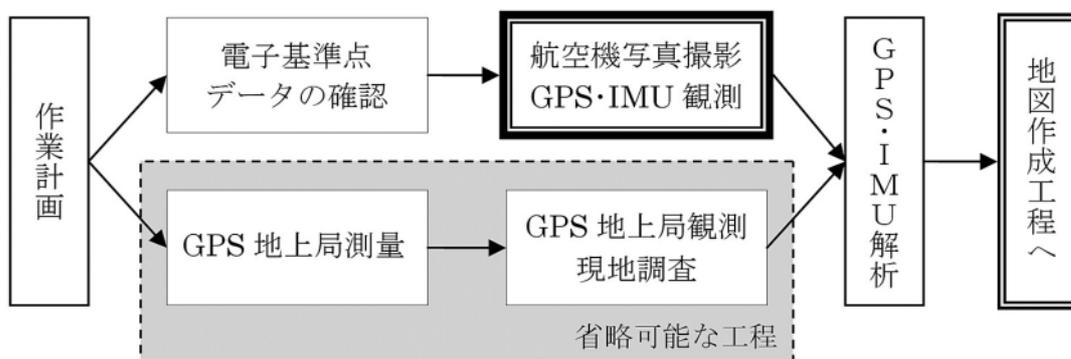


図2 新しい作業工程

練作業に頼り、しかも多くの現地測量を要する作業であったがゆえに、非常に多くの時間がかかっていた。

3. 新しい地図生成とポジショニング技術について

ここ数年に至り、主としてGPSの測位精度そのものを含む複数の軍事技術の民生への解放促進に伴う計測技術の進歩とコンピュータ処理技術など、様々な要素技術の飛躍的な進展により、地図生成とポジショニングの手法は大きく変わり始めている。

航空機に搭載されたGPSと航空カメラに内蔵された慣性計測装置 (IMU) が組み合わせられることで、写真撮影時の正確な位置・姿勢の測定が実現した。また、航空機搭載用に開発されたレーザレンジファインダ⁵⁾により、高精度な地表面形状の測定が実現し、用途は限られるものの熟練技術が要求される地形の図化・計測作業の負担が軽減⁶⁾、また場合に

よっては不要になった。このほか基準点測量についても、国土地理院が全国各地に設置した電子基準点の利用で大幅な労力削減を実現し、場合にもよるが現地測量そのものを全て省略することが可能になった。

さらに、日本国内ではこの1～2年で新たに導入され始めたデジタル航空カメラが、従来のフィルム方式 (23cm四方の大判フィルム) で必要だった写真処理工程⁷⁾の大幅な簡略化とデジタルの特長である自動化を実現しつつあり、まさにフルデジタル化時代への遷移期である。新しい作業の流れを図2に示す。

図2の点線枠で示す箇所が省略可能な工程である。ここで、現在実現している航空機による地図生成の様子を示す (図3)。なお図中の数値性能は、当社が運用している装置の仕様である。

以下、これまでに登場した順に、計測装置や要素技術を説明する。

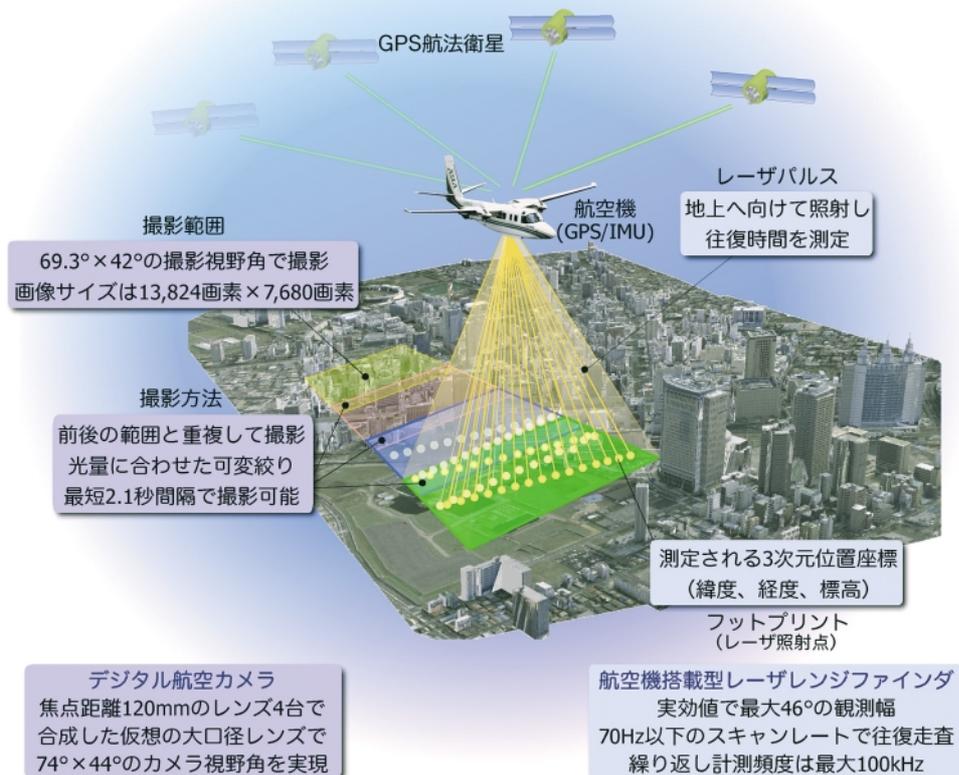


図3 航空機による地図生成の様子(模式図)

3.1 GPS/IMUの統合利用

通常、写真撮影目的で飛行する航空機は時速200～250km程度で高速移動するが、GPS受信機のサンプリング間隔は航空機の移動速度に比べると非常に観測密度の低い間欠的なデータ(0.5～2Hz)であり、ポジショニング精度の時間依存性は無いが、電離層等の電波環境や、GPS衛星そのものの配置や組み合わせによるばらつきが大きく、ポジショニング誤差の主要因となる。一方IMUはGPSと異なり、通常50～200Hz程度と、サンプリング間隔が非常に短く、短時間内では相対位置・姿勢方位角(写真撮影時のカメラ姿勢)を極めて高精度に計測する。これらの特長を組み合わせ、GPS/IMU統合による高精度ポジショニングは実現されている。

この過程では、航空機GPSと地上局GPSのデータを、固定した既知点(地上点)に対す

る未知点(移動体)の位置を基線解析により求める「後処理によるキネマティック方式」により算出し、この結果とIMUの距離・姿勢方位角データをカルマンフィルタリングによる計算過程を経てノイズ除去と補正を行うことで、飛行中の連続的な軌跡と姿勢を算出し、それぞれの写真撮影地点の直接計測を実現している(図4)。

3.2 電子基準点

国土地理院が維持・整備している電子基準点は、全国を約20km間隔の密度で24時間体制の連続観測をしている。この観測データは観測地点の増加とともに充実度を増しつつ、同院や民間企業によるサービス⁸⁾として提供されており、航空測量では図2に示す省略可能な工程という恩恵を受けている。この現地作業を伴う工程を省略できると、場合によるが



図4 GPS/IMU統合による高精度測位

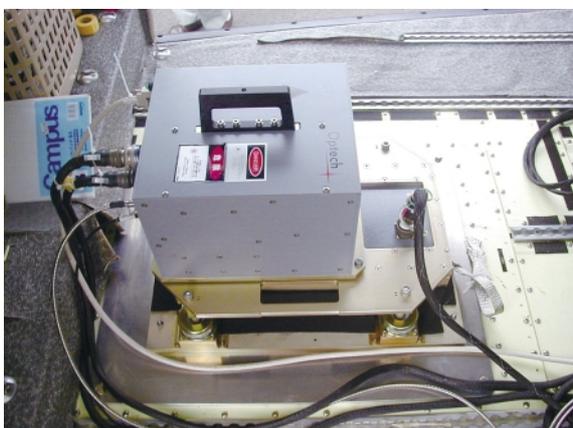


図5 写真測量による地形DEMデータ取得法

表1 航空機搭載型レーザレンジファインダの性能例 (ALTM3100の場合)

運用高度、観測幅 (m)	550* ~ 3500m、0 ~ 0.93 × 運用高度 (走査角度で変化)
パルス周波数	33kHz、50kHz、75kHz、100kHz切り替え
高さ精度 (1)	15cm (高度1000m) 25cm (高度2000m)
水平精度 (Max)	1/2,000 × 飛行高度
走査角度と周波数	0 ~ ± 25 ° で可変、 最大70Hz (例 : 28Hz / ± 20 °)
ビームの拡がり角**、Class	0.3mrad (30cm) 0.8mrad (80cm) Class 4レーザ
ビーム反射強度 (分解能)	12bit
搭載GPS	NovAtel社製MiLLennium
搭載IMU	Northrop Grumman社製LN-200相当品

* : 実質的な運用下限はアイセーフ高度 (550m) に規制される
** : カッコ内のcm表示は高度1,000mの場合を示す

数日間を低減できる。

3.3 航空機搭載型レーザレンジファインダ

航空機搭載型のレーザレンジファインダ (図5) は、レーザ距離計、GPS受信機、およびIMUを組み合わせて地上計測対象物の三次元座標を計測する装置である。航空機と地表面との距離は、航空機から地上へ向けて照射されるレーザパルスの1照射ごとに照射角度とパルスの往復時間を測定し、これと航空機の姿勢方位に関するデータを解析することで、レーザパルス1点ごとの地表面上のレーザ照射点⁹⁾について空間座標 (緯度、経度、標高) を算出

する。空間位置の高さ方向の計測誤差は10数センチ程度、水平方向の計測誤差は対地高度の2000分の1程度¹⁰⁾までに低減した高精度位置計測である。このレーザパルスは、航空機の飛行方向と直交する方向へ、航空機を頂点とする下向きの扇型 (図3では左右両舷で計46度の広がりを持つ) の範囲を一定の走査周波数で往復走査する¹¹⁾。当社で運用するレーザレンジファインダの仕様を表1に示す。

3.4 デジタル航空カメラ

デジタル航空カメラは、CCDセンサ構造の異なる2種類（ラインセンサ方式とフレームセンサ方式）が市販され、日本国内では2006年11月上旬時点で16台程度（全世界では133台¹²⁾）が導入されているが、依然としてフィルム方式のアナログ航空カメラが多く、第一世代が登場・運用され始めた段階である。図6は航空機に搭載されたデジタル航空カメラの一例である。

デジタル航空カメラにおける従来のフィルム方式との最大の違いは、写真処理工程を必要とせず、撮影後直ちにデータが利用できる点である。また、従来方式では印画紙出力以外の用途ではデジタル化の際に色調分解能が低下したが、デジタル方式ではこれらのマイナス面はなく、さらに複数のカメラによる撮影が、RGBカラー、モノクロ、および近赤外の同時撮影を実現しており¹³⁾、一度の撮影で図化・判読・画像解析など多岐の需要に対応できる。このほか、GPS/IMU装置は撮影時の位置・姿勢をリアルタイムに算出するので、画像生成後、直ちに地図作成工程を実施できる。

なお、フレーム方式のデジタル航空カメラでは、複数CCDの分割撮影による1億画素前後の画角サイズを実現している。主要メーカー2社のレンズ部を参考に示す（図7）。

どちらも合計8台のカメラで撮影する。左

側のカメラは、内側4台のカメラが画角を田型にモノクロ4分割撮影し、右側のカメラは縦列配置のカメラ4台が画角を囲型にモノクロ9分割（カメラごとにCCD枚数が異なる）撮影する。外側4台は、どちらもR・G・B・近赤外を分担撮影する。これらは、高解像度モノクロ画像と低解像度カラー画像を合成し、カラー画像の色調とモノクロ画像の解像度を合わせ持つ高解像度カラー画像を生成するシステムである。

当社では、図8左側のデジタル航空カメラを運用しており、このカメラの仕様を表2に示す。



図6 デジタル航空カメラ

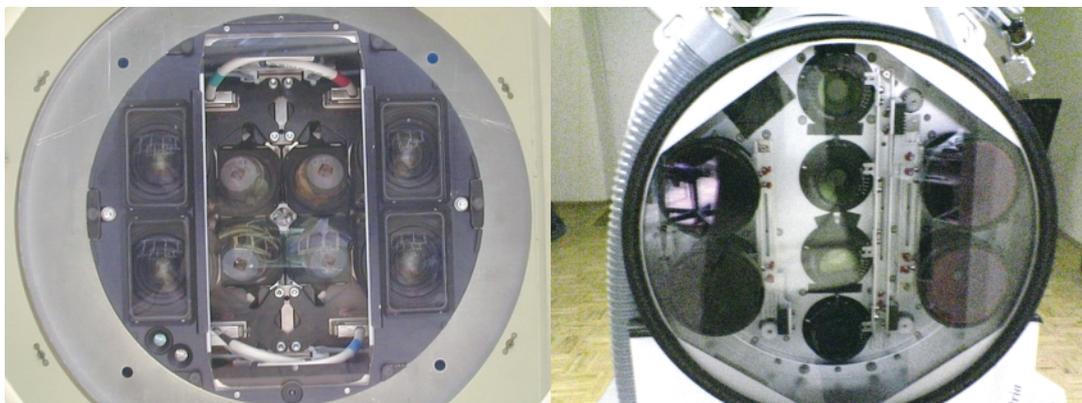


図7 製造メーカー2社のカメラレンズ部

表2 デジタル航空カメラの性能例 (DMCの場合)

運用高度 (m)	500m ~ (運用高度 = 地上からの高度 = 対地高度)
カメラ視野角・撮影視野角(°)	74.0°×44.0°、69.3°×42.0°(横側方向×進行方向)
使用レンズ	モノクロ(パンクロマティック) 焦点距離が120mmのレンズ4台を田型に配置 マルチスペクトル(RGB近赤外) 焦点距離が25mmのレンズを各1台使用
使用CCD	モノクロ(パンクロマティック)×4枚 解像度:7,168×4,096、画素寸法:12um×12um マルチスペクトル(RGB近赤外)×4枚 解像度:3,072×2,048、画素寸法:12um×12um
生成画像寸法(pixel)	13,824×7,680(横側方向×進行方向)
地上分解能(cm)	運用高度(m)÷100×1cm(高度1,000mの場合10cm)
シャッタ速度・絞り・間隔	可変式 1/50~1/300、F4~22、2.2秒/枚
色調分解能(レンジ幅)	12bit(4,096階調)
搭載GPS	NovAtel社製MilLennium
搭載IMU	Northrop Grumman社製LN-200相当品

4. 三次元地図生成技術の従来と現在

4.1 従来手法

GPS/IMUや航空機用レーザレンジファインダが登場する以前の一般的な三次元地図¹⁴⁾の生成手法は、事前に大縮尺地図から取り出した2次元形状としての建物輪郭の準備作業と、測量技術者が現地で建物高を測量する現地作業¹⁵⁾とがあり、多くの労力を費やしていた。データ取得後は、専門技術者がCGやCAD上で一棟ずつ建物モデルを構築し、ステレオ写真処理技術を駆使して建物に航空写真を1枚ずつ貼り付けていた。しかし都市域では多くの中・高層構造物が密集するため、写真上では構造物の陰に隠れて見通せない箇所¹⁶⁾が非常に多く出現するなど、写真測量の原理的限界が生じる場面も多く、撮影時にオーバーラップ¹⁷⁾を大きくする等の対策を施したが、完全な打開策ではなかった。

このように、従来一般的な手法は『多くの手間と費用¹⁸⁾』のために、都市全体の三次元地図生成は現実的ではなく、しかも費やした手間は必ずしも品質に反映されず、高品質を目指すも長期に及ぶデータ作成期間中に都市様相が変貌していることも多かった。ま

た、生成された建物モデルの精度は使用した地図精度に依存し、地図の整備時期以降の状況変化には本質的に対応できなかった。当社を含め、数年前まではこのような状況だった。

4.2 現在実現している手法

GPS/IMUセンサ複合によるポジショニング技術が飛躍的に進展し

た現在、三次元地図をコンピュータ画面上に自動構築することが可能になった。また、写真測量を応用したソフトウェア技術は建物の屋上や壁面に正確な位置・傾きを割り出した画像を投影することで、建物の陰に隠れる箇所も含めた形でのマッピング¹⁹⁾を短期間でしかも自動的に行うことを可能にした(図8)。なお、図8以降の技術・事例は、全て当社内で開発したものである。

航空機は計測対象地域内を高速で移動するため、広範囲を短時間で高密度に計測でき、従来のステレオ写真処理で問題となった構造物による見通しの問題が発生しない。しかも上空からの計測であるため、地上からの接近が困難な地域や通常では立ち入りが禁止されている地域、さらには災害が発生している危険な区域であってもデータ計測が可能である。使用しているレーザパルス²⁰⁾の特性上、航空機と計測対象との間に雲が存在する場合や降雨時には計測できないが、航空機の持つ機動性の高さ、レーザレンジファインダの持つ高密度計測能力、そしてGPS/IMU装置の自己位置定位能力、およびコンピュータ処理能力の向上がもたらした画像の自動投影技術を



図8 川崎市街地（川崎区役所周辺）を対象に自動構築した三次元地図

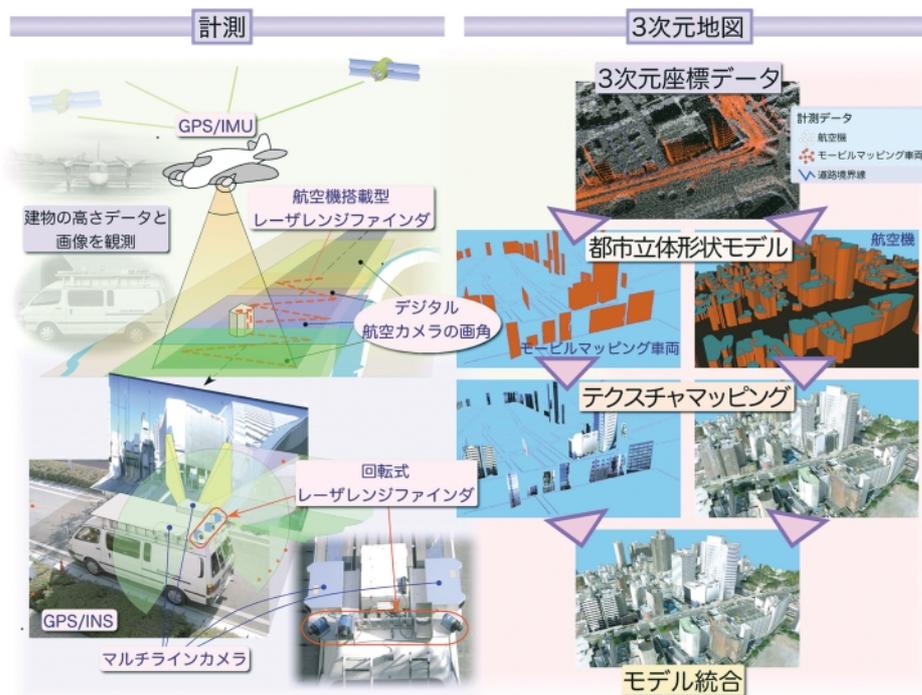


図9 協調作業によるマッピングの様子と建物立体形状モデル構築の流れ

それぞれ生かして、都市域の立体形状モデルの『高精度で短時間、しかも低コスト』での構築を実現した。ここに、センサ複合利用と写真測量ソフトを始めとしたソフトウェア技術の応用による三次元地図の自動生成が実現したのである。

ここで、参考として建造物の陰に隠れて見通せない箇所へ対処した事例を示す。図9左下には、当社が開発したGeoMasterと呼ぶ

モバイルマッピング²¹⁾車両による計測の様子を模式図として示す。地上を走行する車両では、視線が非常に低い状態で建物のそばを通過するため、上空からは隠れて見通せなかった箇所を補完的に撮影できる（図9右の赤色部分）。この事例では、空中移動体と地上移動体の協調作業により、より良い三次元地図の構築が実現した。

5. 三次元地図生成の自動化技術

ここで、三次元地図上に配置される個々の建物（建物モデル）の自動構築の概念を図10に示し、概要を述べる。

レーザレンジファインダが取得した三次元位置データから、周囲と高低差を持ち一定の広がりを持つ平坦領域を単一構造物が占める建物面領域として抽出する。ここでは、構造物の輪郭形状をなるべく直線成分を保持しながら²²⁾抽出する。同時に、投影位置・姿勢の判明しているデジタルカメラ画像をエッジ検出処理して輪郭形状と照合し、抽出確度を向上させる。次に、直線成分が囲む領域を建物ポリゴンと判定し、このポリゴンから壁面を含む建物モデルを生成する。

建物モデルの各面へ配置する画像は、1枚ごとの画像が持つ位置・姿勢から計算するが、各面にはその面からの撮影方向が正面に最も近いものを選択することで、ある画像では建物の陰に隠れる箇所を、別の角度から撮影した画像から見いだすことができる。

ただし、本手法による三次元地図精度は残念ながら専門技術者の熟練精度には到達しておらず、用途や緊急度に応じて使い分けているのが現状である。

なお、当社では本項に関連する技術開発成果をVedutista[®]という名称で商品化している。

6. 街並みの再現と考える活用分野

本稿で紹介した三次元地図の構築例²³⁾では、1km²程度の都市範囲を1時間程度で計測するため、対象地域の広さにもよるが1日から数日程度で再現できる。図11は川崎市街地

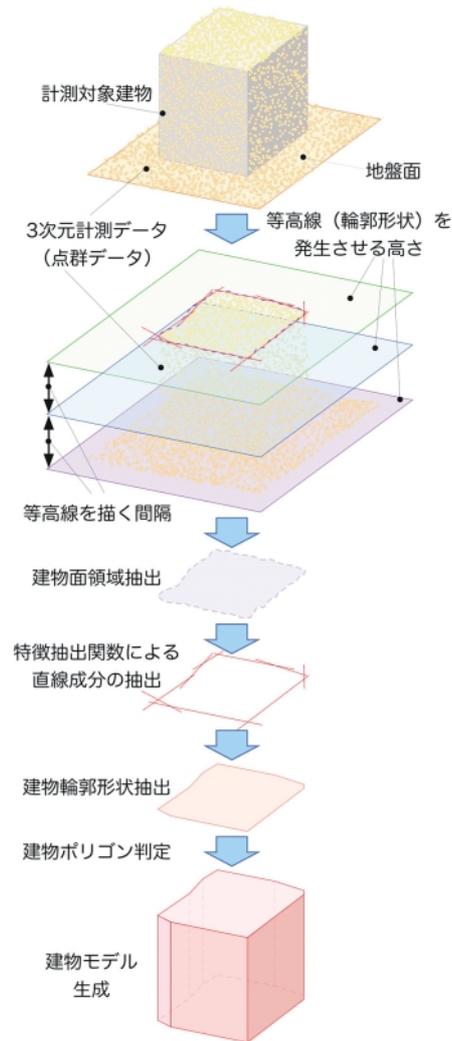


図10 建物モデル自動構築の概念

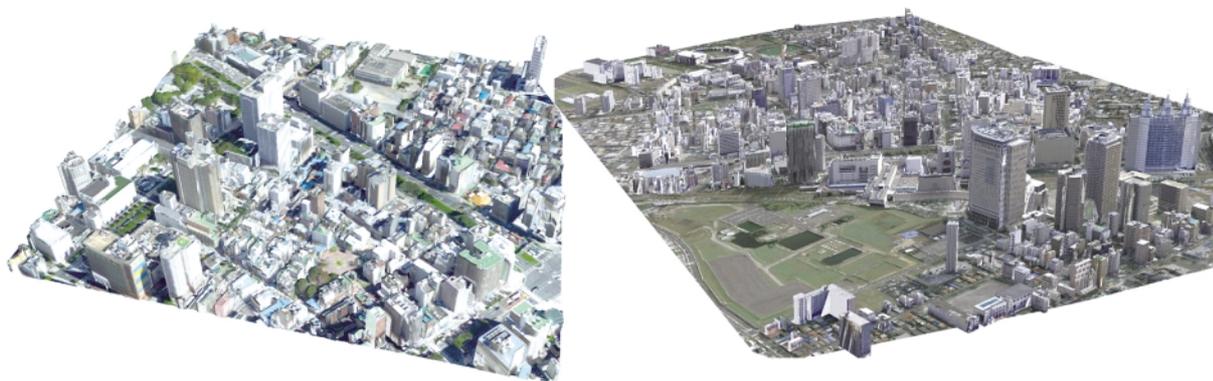


図11 川崎市街地を再現した三次元地図

を異なる視点で再現した事例²⁴⁾である。

三次元地図生成技術は、ひとつには都市全体の今ある姿を俯瞰しつつ景観シミュレーション要素を取り入れたい場面に向いている。都市部での河川氾濫に伴う洪水や、臨海地域であれば高潮による潮位上昇などの危険区域予測を目的とする災害対策、地震等による建物倒壊がもたらす道路閉塞区域の予測にも有用である。また、建物モデルに、例えば建物強度情報や、地盤強度情報、耐火・延焼性状などの情報を付加した広範な災害予測への適用や、地上移動体による計測データと組み合わせることで地上付近の再現精度を向上させれば、人の視点が必要な用途にも適用できるだろう。

図11で紹介した三次元地図は、自社データの他に災害時の状況把握・提供手段を研究題材として参画した文部科学省の特別プロジェクト²⁵⁾のデータも利用している。事前に把握しておいた平常時の状況と災害直後の状態と比較することで、被害状況を詳細で視覚的に分かりやすく把握できるため、災害時の情報収集に利用するロボットエージェントや災害対応の情報システムとの連携を進めるなど、利用場面を増やしてゆければ幸いである。

7. 謝辞

非常に参考になる助言および資料をいただいた当社内の伊藤秀典氏、滝川正則氏、坂元光輝氏、平松孝晋氏、および本原稿を辛抱強く査読し、重要なお指摘をくださった匿名の査読者に深く感謝いたします。

(発表日2006年7月7日)

- 1) 地図作成に必要な図式化の作業。
- 2) 詳しくは4.2および5を参照のこと。
- 3) 主に地形図や主題図などがある。
- 4) 正確には、航空カメラのレンズ中心の三次元空間内での位置・姿勢のこと。

- 5) レーザ距離計の一種で、航空測量分野ではレーザスキャナと呼ばれている。
- 6) ただし等高線の図化などは、コンピュータによる自動処理では使い物にならず、専門技術者の熟練技術に頼るのが現状である。
- 7) フィルムの現像とプリント、またデジタル図化機を使用する場合にはA/D変換を含む。写真枚数にもよるが、1000枚以下であれば撮影の翌朝には画像の確認・検査(場合によっては地図作成工程に持ち込む)することも可能である。
- 8) 国土地理院と民間企業では提供しているデータの取得密度(1秒間隔、30秒間隔)と費用が異なる。
- 9) 「フットプリント」とも呼ばれる。
- 10) 対地高度1000mでの計測時には0.5m程度である。
- 11) 例えば、対地高度が1000mであれば、最大930mの幅で地表面形状を計測する。
- 12) 参考までにスイス・ウィルド社(現ライカジオシステム社)が販売したアナログカメラRCシリーズは、全世界で650台程度であることから、デジタル方式は登場間もないことがうかがい知れる。全世界数量は稼働台数であり、受注残を含めると150台(主要製造メーカー4社の合計台数)を超えているようである。
- 13) アナログカメラでは、カラーとモノクロではフィルム交換を要し、近赤外カラー撮影時はさらにフィルタを装着する必要がある。
- 14) より正確に言えば、業務仕様としての三次元地図出現はここ数年の出来事であり、従来のアナログ手法による地図も三次元、厳密には2.5次元で作成されていたが、業務成果には不必要だったため、高さ情報を削除した二次元データとしていた。
- 15) ステレオモデル形成済の写真がある場合

には、わざわざ現地に高さを測りに行くことはせず、図化時に直接三次元データを取得する。

- 16) オクルージョン領域と呼ぶ。
- 17) 前後の写真との重なり部分のこと。
- 18) 数人から時には十人以上に及ぶ専門技術者、おそらく数ヶ月単位を要する時間、そして場合によっては予想を超える驚くべき費用である。
- 19) レーザレンジファインダの取得する地表のフットプリントについては、隠蔽の影響はほとんどなくなるが、そもそも写真に写っていないテクスチャが隠蔽されている部分については、従来同様に、テクスチャを抽出することは不可能である。
- 20) 近赤外光である。
- 21) 車載型レーザレンジファインダを利用した道路、および建物側面を含む道路周辺形状の三次元位置計測技術のことで、航空機と同種の技術を10年近く前に先行して採用しており、航空機計測同様の解析処理により計測対象の三次元位置情報を算出し、加えて位置情報が付属した画像を生成する。
- 22) 真上から見ると、建物は複数の直線成分で構成されることが多い。
- 23) 1 m²あたり10点程度の密度で測定した高さ情報と地上分解能が10cm以下になるように撮影した画像を利用している。
- 24) 図11の左側は川崎区役所付近を南西から眺めるように再現したもので、右側はJR川崎駅とその西口の再開発ビル群を中心とする川崎市街地を再現しており、いずれも範囲は約 2 km²であり、誰が見てもわかりやすいように動画化されている。
- 25) 平成18年度末まで続く「文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト」で、主要ウェブサイトは<http://www.rescue>

system.org/ であり、本稿で使用している画像は同プロジェクトで研究したものも含む。

参考文献（順不同）

- 1) GPS理論と応用：B.Hofmann-Wellenhof、H.Lichtenegger、J.Collins著、西修二郎訳、シュプリンガー・フェアラーク東京、2005
- 2) セールスエンジニアのための空中写真測量マニュアル [私家版]：鈴木惣一著、全通出版、1984
- 3) ジャイロ活用技術入門：多摩川精機株式会社編、工業調査会、2002
- 4) Map Conversion from 2-D to 3-D：Pingtao Wang、Takeshi Doihara、Kazuo Oda and Wei Lu、ISPRS Working G. V/4、3rd International Image Sensing Seminar on New Development in Digital Photogrammetry、2001
- 5) 小特集「デジタル航空カメラの最前線」第1章デジタル航空カメラ、津留宏介、写真測量とリモートセンシング、Vol.44、No.5、p.7-14、2005
- 6) 小特集「新しいエアボーンリモートセンサ」レーザスキャナによる自動都市モデル構築へ - LaserBird II、織田和夫、沼田洋一、斉藤和也、写真測量とリモートセンシング、Vol. 41、No. 4、p.46-49、2002
- 7) 航空レーザ計測による都市立体モデルの自動構築、大鋸朋生・斉藤和也、画像ラボ2004-4、p.72-76、日本工業出版、2004

発表者紹介

大鋸 朋生（おおが ともお）

所属：アジア航測株式会社

ジオマティクス事業部センサー計測部画像情報課

E-mail：tom.ohga@ajiko.co.jp