

高分解能衛星による地形測量データの精度向上手法の開発と実証

清水建設株式会社

○河野 重行^{*1}

同

重元 智史^{*2}

同

本多 眞^{*3}日本スペースイメージング株式会社 吉永 新一郎^{*4}

Shigeyuki Kohno, Satoshi Shigemoto, Makoto Honda, Shinichiro Yoshinaga

ダムや大規模造成などの計画段階において、広範囲な地形を正確に把握することが重要であり、航空機による測量が一般的に行なわれている。航空機による測量は精度は高いが、測量のニーズに応じて飛行、上空から撮影を行なうため、地形データの取得は結果的に高価にならざるを得ない。一方、近年、GPS を利用した測量が行なわれているが、上空からの写真による測量と異なり、地上で測量を行なうため、一定の測量精度を確保するためには数多くの測量地点が必要となり、結果的にコストアップの要因となる。

1999 年 9 月に打ち上げられた地球観測衛星「イコノス」は米国の軍事技術をベースに開発された衛星で上空 680 km の軌道から広範囲に地上を撮影し、解像度 1m の鮮明なデジタル画像データおよび地上の 3 次元データの取得が可能となる。筆者らは、「イコノス」衛星により得られた 3 次元の地形データを確率論的手法を用いて補正し、安価に誤差を大幅に低減できるシステムを開発、実際の地形データにより実証したので報告する。

キーワード：地球観測衛星「イコノス」、誤差補正、地球統計手法、確率論的手法、

1. はじめに

ダムや大規模造成などの計画段階において、広範囲な地形を正確に把握することが必要であり、航空機による測量が一般的に行なわれている。航空機による測量は精度は高いが、測量のニーズに応じて飛行、上空から撮影を行なうため、地形データの取得は結果的に高価にならざるを得ない。一方、近年、GPS を利用した測量が行なわれているが、上空からの写真による測量と異なり、地上で測量を行なうため、一定の測量精度を確保するためには数多くの測量地点が必要となり、結果的にコストアップの要因となる。

1999 年 9 月に打ち上げられた地球観測衛星「イコノス」は米国の軍事技術をベースに開発された衛星で上空 680 km の軌道から広範囲に地上を撮影し、

解像度 1m の鮮明なデジタル画像データの取得が可能となる。この衛星から広範囲に撮影されたデジタル画像データはライブラリーデータとして蓄積されており、必要時にはライブラリーから安価に任意のエリアの画像を入手可能である。また、ステレオ画像の撮影も可能であり、立体視により高さデータの取得が可能である。しかしながら、得られた高さデータは現状では標準偏差で±1.6m の誤差があるため、計画などの業務においてもそのままでは適用困難であった。

筆者らは、「イコノス」衛星により得られた 3 次元の地形データを確率論的手法を用いて補正し、安価に誤差を大幅に低減できるシステムを開発、実際の地形データにより実証したので報告する。

2. システムの概要

(1) 地球観測衛星「イコノス」の概要

イコノス（仕様は表-1 に示す）は高度 680 km の軌道から地上を撮影するため、一回の撮影の最小撮影単位が 11 km×11 km の広域な範囲の画像デー

*1 土木本部技術開発部

TEL:03-5441-0518

*2 土木本部情報システム部

TEL:03-5441-0605

*3 技術研究所構造研究開発部

TEL:03-3508-8101

*4 画像部

TEL:03-5204-2725

タを取得可能である（航空機撮影の場合、500m×500m～2km×2km程度の範囲）。図-1に示すように、高々度からの撮影のため、建物の歪みの少ない均一なデジタル画像が取得でき、歪み補正に関して、従来の航空機撮影に比べ、大幅にコストが低減できる。また、ステレオ画像データから5mメッシュでの高さデータを取得できるが、その精度はメッシュ格子点で±1.6m（1σ）であり、そのままでは建設分野における適用は困難である。

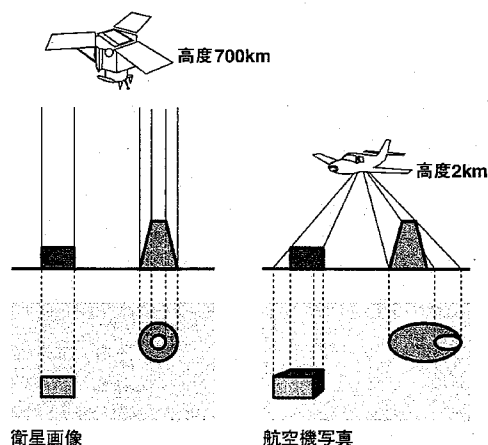


図-1 撮影高度による画像の歪み

(2) 誤差補正システムの概要

本システムは、少ない測量地点での標高真値を用いて、衛星画像による地形標高データ全体の誤差を補正する手法と補正に用いる測量地点を誤差が最も小さくなる配置に自動選定する手法を備えたものである。それぞれの手法の概要を以下に述べる。

地形標高データの補正手法は、地球統計手法(Geostatistics)¹⁾の概念を用いている。具体的には、地形標高データの有している誤差の分布が、空間的に相関性を持ってばらつく確率関数（一般に確率場と呼ぶ）で表されるものとして、測量地点の真値を基にした条件付き分布を推定するものである。標高の確率場を $Z(u)$ とし、そのメッシュ u^G 上の期待値をイコノスによる標高値 $y(u^G)$ とするとき、補正された標高値 $Z^*(u^G)$ は、測量地点 u^M 上の真値 $Z(u^M)$ を用いて、次式のように表される。

$$Z^*(u^G) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(u^G) Z(u_i^M) + \left[1 - \sum_{i=1}^N \lambda_i(u^G) \right] \cdot y(u^G) \quad \dots(1)$$

ここで $\lambda_i(u^G)$ は重み係数であり、推定量の不偏性と

誤差分散の最小化の条件から得られる方程式を解くことによって求められる²⁾。

補正に用いる測量地点の選定手法は、既に著者らが開発を行い実証している調査ボーリングの最適配置手法³⁾の概念を応用している。先の地形標高の補正精度は、確率的なばらつきとして定量化が可能である。誤差の空間的なばらつきを一定と仮定しているので、補正精度は測量地点の配置 u^M によって決まる関数 $V_K(u^M)$ となり、配置が均等となると最も小さくなる。一方で、地形の起伏状況に応じて、起伏の著しい周辺に重点を置くような配置条件を考慮するため、イコノスの地形標高データを用いて、配置 u^M による真の推定誤差 $V_T(u^M)$ を求める。これを最小とする配置 u^M がイコノスの地形標高データを最も良く捉えられる。そこで測量地点の配置を決定する評価関数として、これらを組み合わせた

$$f_c(u^M) = 0.5 \cdot V_K(u^M) + 0.5 \cdot V_T(u^M) \quad \dots(2)$$

を用い、これを最小化するように配置 u^M を決定する。

複数の測量地点の決定は、式(2)を1カ所ごと順に当てはめる逐次的手法を用いる。

3. システムの検証

本システムを実際の地形測量に適用し、その精度を検証した。ここでは補正用測量のデータの補正後の精度に対する感度分析を行なうことを目的とした。したがって、多くの補正用測量地点の測量データが必要となるため、当該箇所の標高をイコノスのステレオ画像による測量とは別途に、レーザープロファイラーにより測量し、その値を真値と仮定し、イコノスのステレオ画像による高さデータを補正することを試みた。

図-2 および図-3 にそれぞれ、当該箇所に対するイコノスのステレオ画像およびレーザープロファイラーにより得られた高さデータをもとにしたコンターを示す。検証に用いられる地形は地形の形状による精度への影響をも確認するため、比較的平坦な場所と急峻な場所が混在している事例を選んだ。同一地点に関してイコノスによる高さデータとレーザープロファイラーによる高さデータ（真と仮定）の差の分布は図-4 に示される。

まず、前述したように地形の形状による差異をみるために、図-3 に示すように、急峻な場所から平坦な場所へとA区域からD区域の4つの区域（400

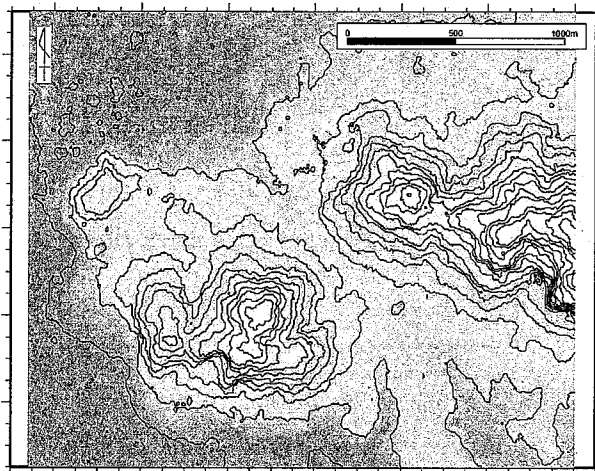


図-2 イコノスによる地形標高コンター

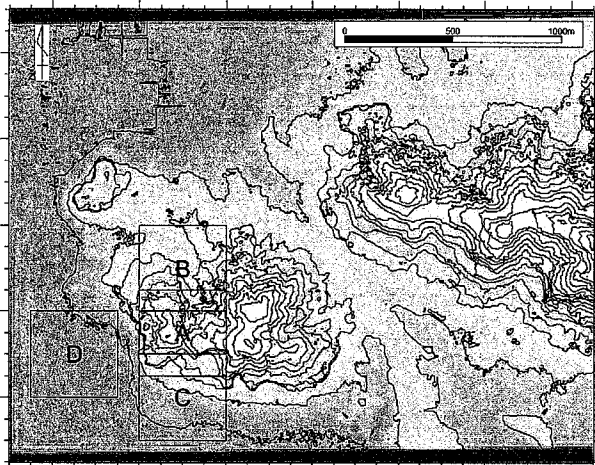


図-3 レーザープロファイラー測定の標高コンター

m×400m)を指定し、各々に関して、補正による精度の向上を確認した。

各々の区域に対して、補正用測量地点の測量データの数の補正後の精度に対する効果をみるために、測量データ数を10点、20点、50点、100点、150点、200点の6ケースを設定し、区域内で誤差が最小となるように自動配置した。これらの測量データにもとづき、もとの高さデータを補正するが、各補正用測量データ数に対する補正状況例をD区域を例にとり、図-5に示す。誤差の検証は、これらの補正用測量データによる補正後の区域内において、補正用測量地点以外の箇所の高さデータと補正前の高さデータとの差をとることにより行なった。この差の平均推定残差と補正測量データ数の関係をプロットしたものが図-6である。補正用測量データ数の増加により、あきらかに平均推定残差が減少しているのがわかる。なお、参考までに、補正用測量地

点を前述の自動配置を行わずに、メッシュの格子上に配置した事例をも示しているが、最適配置の方が平均推定残差が小さいのがわかる。

この平均推定残差の補正用測量地

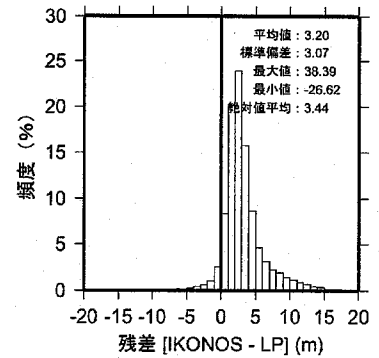


図-4 イコノス標高と真値(レーザープロファイラー)の誤差

向を地形の形状の違い(A区域～D区域)に関して一般化して把握するために、各補正用測量データ数に対する平均推定残差を補正前の平均推定残差で除した「基準化平均推定残差」をプロットしたものが図-7である。この図より、地形の形状にかかわらず、各補正用測量データにより平均推定残差が大きく低減することがわかる。また、当然であるが、平坦な地形(D区域)ほど少ない補正用データで平均推定残差を低減できることがわかる。たとえば、当該区域(400m×400m)においては、30点の補正用データで平均推定残差が30%に低減できることがわかる。また、10点程度の補正用データだけでも、すべての区域において補正前より平均推定残差が大幅に低減できることがわかる。

これらの結果から、補正前の高さデータの誤差を30%程度まで低減できる可能性があることが判明した。したがって、当初の標準偏差で±1.6mの誤差が±0.5m程度まで低減できることにより、建設分野における計画時などへの適用の可能性が出てきたものと思われる。この誤差の低減の程度は、将来の測量用衛星の測量精度の向上にともない、さらに縮小するものであると考えられる。

4. おわりに

筆者らは、地球観測衛星「イコノス」から得られた高さデータを、別途補正用測量を行なうことにより確率理論を用いて補正し、誤差を大幅に低減できるシステムを開発するとともにその妥当性を実データを用いて検証した。その結果、大規模造成などの計画時において本システムが適用できる可能性があるものと考えられる。

一方、今後の課題として、より一層の精度向上により、計画段階のみならず施工管理段階など本シス

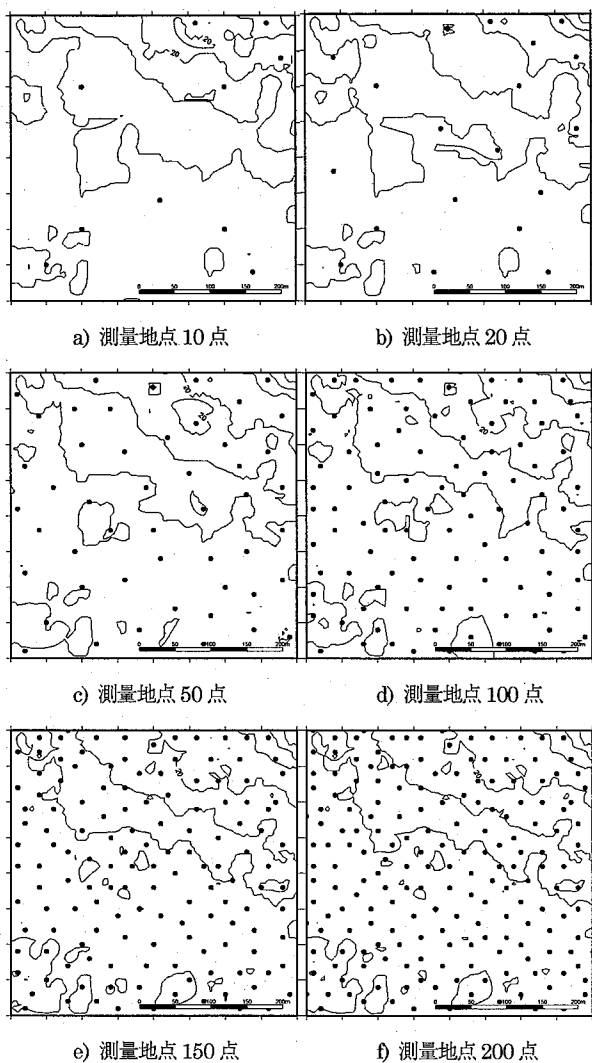


図-5 誤差補正の例 (D区域)

テムの汎用性の向上がある。本システムで開発した誤差補正手法はイコノスのステレオ画像から得られた高さデータに限定されるものではなく、一般性を有するため、イコノスを含め、様々な手法により測量された高さデータに適用できるものであると考え

Improvement of Survey Accuracy by High Resolution Remote-sensing Satellite using Supplemental Measurements

It is common that the aerial survey is performed for the ground survey about the planned area in the exploration phase prior to the start of the large-sized project such as dams. Though the accuracy of the measured data through the aerial survey is relatively high, the survey work may cause the high cost because of the corresponding to the individual needs of the users. The high resolution remote-sensing satellite named IKONOS launched in 1999 may survey the wide area at one time from the high altitude and collect the 3-dimensional digital data of the ground surface with the low rate. Authors have developed the system to improve the survey accuracy of the height data by IKONOS stereo imagery with the supplemental measurements using the probabilistic approach so that the system may be practically applicable to the construction project, and confirmed its validities through the actual applications.

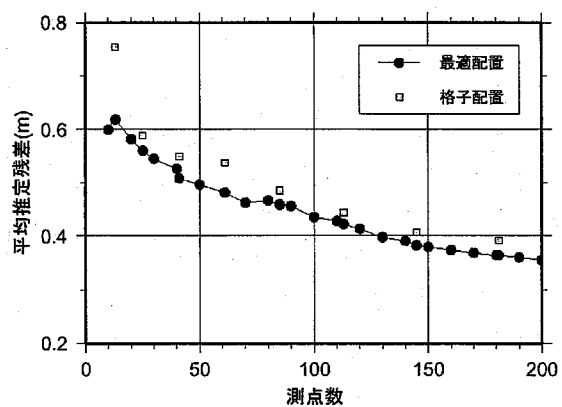


図-6 真値との平均推定残差の比較 (D区域)

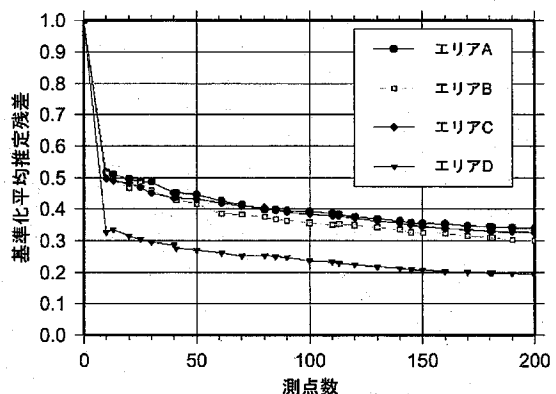


図-7 基準化平均推定残差の比較

られる。

【参考文献】

- 1) Deutsch, C. and Journel, A. : GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide., Oxford University Press, p.369, 1998.
- 2) 本多眞, 大矢隆二, 河野重行, 重元智史, 小松義典: GPS 測量値と航空写真測量値を利用した地球統計手法による測量精度の向上. 土木学会年次学術講演会, 2001(投稿中).
- 3) 本多眞, 鈴木誠, 上田稔: 基礎地盤面推定のための調査ボーリングの最適配置計画. 土木学会論文集, III-45, No.610, pp.43-55, 1998.