

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

清水建設（株）和泉研究室 正員○本多 眞 清水建設（株）土木本部 正員 河野重行
 清水建設（株）土木東京支店 正員 大矢隆二 清水建設（株）土木本部 重元智史
 清水建設（株）プロポーザル本部 小松義典

1. はじめに

大規模造成工事等においては膨大な土量の切盛が生じるため、日々進行する工事の変化に合わせた正確な土量の把握が必要である。迅速かつ高精度な地形測量を実施するために、近年 GPS を利用した測量等が行われるが、広大なエリアをカバーするためには相当数の測量地点を設定する必要がある。そこで近年商業ベースで入手可能となってきた高解像度衛星画像を基にした 3 次元測量値を補助データとして、より少ない測点で測量精度の向上を図ることを目的とした標高推定手法を開発した。本報告では、実際の造成工事において実施した GPS 測量値と衛星画像ではないが航空写真画像の判読による 3 次元測量値を利用して、開発した手法の適用性について検証した。

2. 対象サイトの地形測量データ

対象サイトは、敷地約 800×600m の高速道路 S A 造成地である。地形測量データとしては、対地高度 800m からステレオ撮影された航空写真画像を基に、10m 格子網において作成した DEM (Digital Elevation Model) と、GPS を用いた測量値 (21 地点) を用いた。図 1 に航空写真測量によって得られた DEM による標高コンターを示し、★印は GPS 測量地点を示す。また航空写真測量による DEM から GPS 測量地点の標高値を補完して、GPS 測量値 (真値) との誤差を同図中に円の

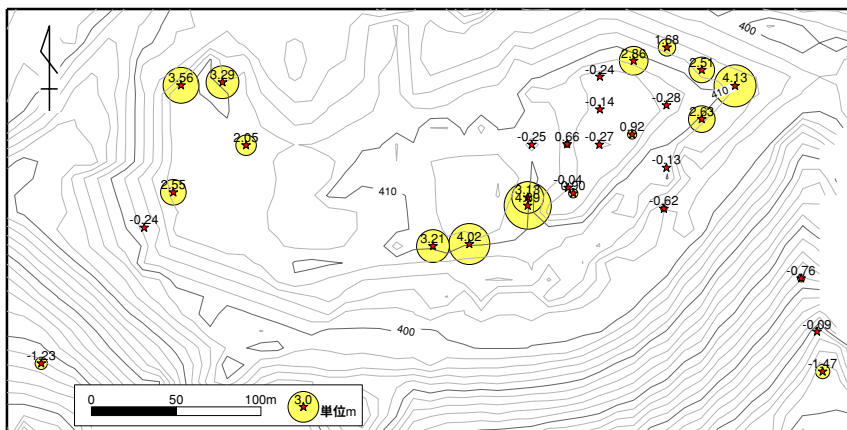


図 1 航空写真測量値のコンターと GPS 測量地点 (誤差を円の大きさで表す)

大きさと数値で表した。また図 2 には誤差のヒストグラムと航空写真測量値を横軸、GPS 測量値を縦軸とした散布図を示す。GPS 測量値は標高の真値と考えられるので、誤差は航空写真測量の測定誤差を示しており、大きいところで 2～3m の誤差 (最大で 5m 弱) が生じているのがわかる。特徴的なのは、誤差の多くが航空写真測量が低く見積もられていることである。

3. GPS 測量値と航空写真測量値を用いた地形標高の推定

(1) 推定手法 (Ordinary Kriging)

ここでは推定手法として、地球統計手法の Ordinary Kriging¹⁾ (以下 OK と称す) を採用している。標高推定値の性質として、真値の与えられる GPS 測量地点 $\mathbf{u}^M$ から離れるに従って、航空写真測量値に収束していくのが望ましい。そこでいま、標高の確率場を $Z(\mathbf{u})$ とするとき、その期待値 (平均値) に航空写真測量値を用いることとする。具体的には、10m 格子位置 $\mathbf{u}^G$ における航空写真測量値 $y(\mathbf{u}^G)$ から任意位置 $\mathbf{u}$ において線形補完した値 $\hat{y}(\mathbf{u})$ を平均値関数とする。このとき N 個の GPS 測量値 (真値) から任意位置 $\mathbf{u}$ における OK 推定量は次式で表される。

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

ここで $\lambda_i(\mathbf{u})$ は重み係数であり、次式の $(N+1)$ の連立方程式を解くことで求める。

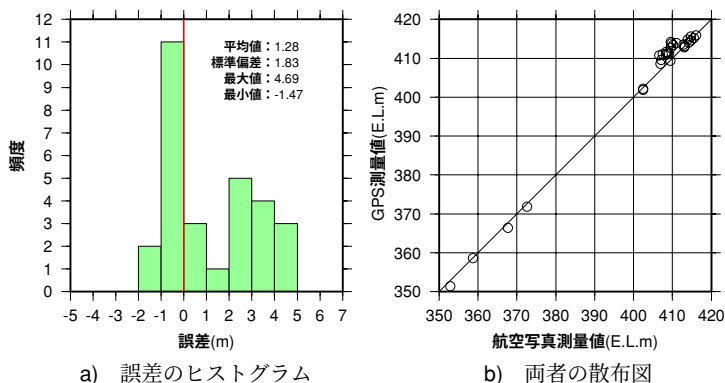


図 2 航空写真測量値と GPS 測量値の比較

キーワード: GPS 測量, 航空写真測量, 地球統計, 土工管理

連絡先: 〒100-0011 東京都千代田区幸町 2-2-2 富国生命ビル 清水建設（株） TEL03-3508-9052 FAX03-3508-2196

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j(\mathbf{u}) C(\mathbf{u}_i^M - \mathbf{u}_j^M) + \eta(\mathbf{u}) = C(\mathbf{u}_i^M - \mathbf{u}), [i = 1, \dots, N] \quad \sum_{j=1}^N \lambda_j(\mathbf{u}) = 1 \quad \dots(2)$$

ここで $C(\mathbf{u}-\mathbf{u}')$ は $Z(\mathbf{u})$ と $Z(\mathbf{u}')$ の共分散関数である。共分散関数は、通常予め関数形を決めて、データからパラメータを推定する²⁾。ここでは指数関数モデル $[C(\mathbf{u}-\mathbf{u}') = \sigma^2 \exp(-|\mathbf{u}-\mathbf{u}'|/a)]$ を採用して、分散 σ^2 および相関距離 a を 29 点の GPS 測量値データから推定した。その結果、 $\sigma^2=3.78 \text{ (m}^2\text{)}$ 、 $a=45.17 \text{ (m)}$ となった。相関距離 a は GPS 測量値の影響範囲を表しており、45m 程度で影響（相関）が $\exp(-1)=0.37$ 程度になることを示している。

図 3 で示したコンターは、上記の推定法で 29 地点の GPS 測量値および航空写真測量 10m 格子 DEM を用いて、10m 格子位置 $\mathbf{u}^0$ の標高値を推定した結果を示したものである。図 1 で示した航空写真測量によるコンターと比較すると、GPS 測量を実施した地点付近でコンターの形が異なっており、GPS 測量値を反映しているものと考えられる。また測量地点から離れると両者のコンターはほぼ一致しており、航空写真測量値に収束しているのがわかる。

(2) マスキングテストによる推定精度の検証

図 3 に示した推定標高コンターが、航空写真測量値に対してどの程度精度が向上しているかを客観的に評価するために、真値の既知な 29 地点の GPS 測量地点においてマスキングテストを実施した。すなわち 29 地点の GPS 測量値を 1 か所毎、そのデータを推定式から除いてその位置を推定する。次式は測量地点 k の推定式を示している。

$$\hat{Z}(\mathbf{u}_k^M) = \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i(\mathbf{u}) Z(\mathbf{u}_i^M) + \sum_{j=k+1}^N \lambda_j(\mathbf{u}) Z(\mathbf{u}_j^M) + \left[1 - \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i(\mathbf{u}) - \sum_{j=k+1}^N \lambda_j(\mathbf{u}) \right] \cdot \hat{y}(\mathbf{u}) \quad \dots(3)$$

上式に基づき 29 点の GPS 測量地点において標高の推定を行い、測量値（真値）と比較した結果を、図 3 に誤差を円の大きさと数字で示した。また誤差のヒストグラムと航空写真測量値を横軸、GPS 測量値を縦軸とした散布図を示したものが図 4 である。まずこれらを見ると明確に精度が向上しているのが見てとれる。最大でも誤差は 2m 強と 50% 以上低減している。また航空写真測量値は、全体的に真値に対して低く見積もられていたが、提案手法による推定では、偏りはなくなりばらつきも小さくなっていることがヒストグラムからわかる。ただし平均的な誤差は 1 ~ 1.5m 程度存在しており、土工管理として必要となる精度（± 30cm）には満たない。これは測量点が 29 点と対象エリアに対して少ないためと考えられる。

4. おわりに

画像処理に基づく測量値は、誤差を含んでいるものの広範囲かつ迅速にデータを得ることができる。本報告では、これを補助的なデータとすることで、GPS 等による離散的な真の測量値から全体として精度の高い測量の可能な推定手法について検証した。今回は GPS 測量値がエリアに対して少なかったため、目標とする精度には達しなかったものの、今後、高解像度衛星画像による 3 次元測量値や、レーザープロファイラによる測量値等が、廉価で入手可能となれば、本手法を用いることで数少ない測量点で精度の高い推定が可能となると考える。また現在、測量点の最適な配置や数量の客観的な決定方法について検討しており、今後報告していく所存である。

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) 本多他：地形情報を考慮した基礎地盤面のモデル化と推定，土木学会論文集，No.561/III-38，pp.62-74，1997.

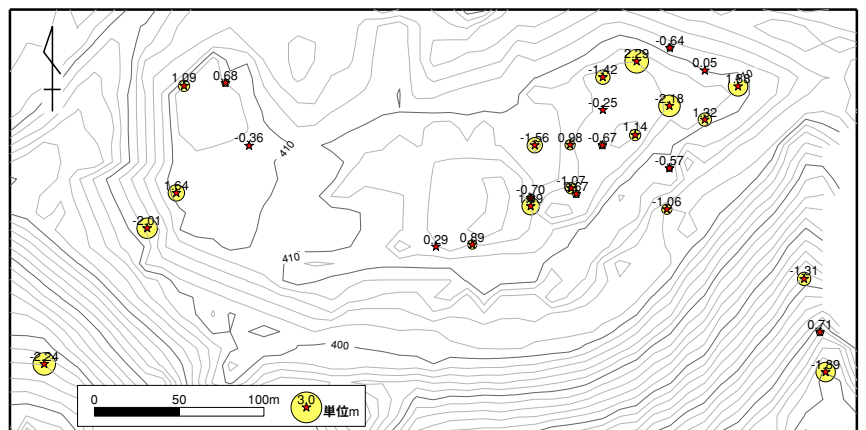


図 3 提案手法による推定標高コンターとマスキングテストによる推定精度の検証（誤差を円の大きさと表す）

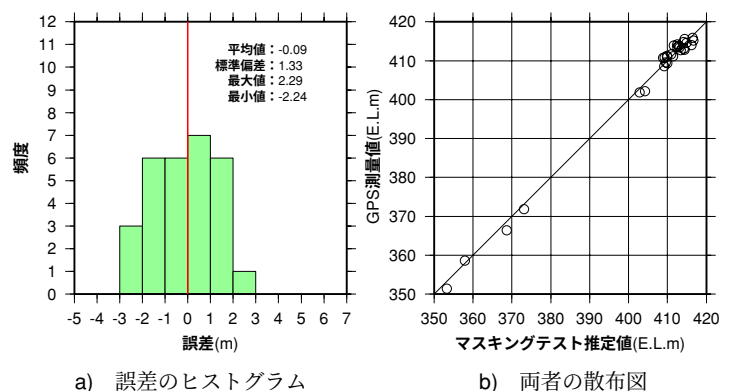


図 4 マスキングテストによる推定標高値と GPS 測量値の比較