

傾斜地の迅速かつ経済的な地形測量法の提案

田中 龍見¹・岡林 巧²・山本 健太郎³

¹第一工業大学 (〒899-4332 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)

E-mail: r-tanaka@daiichi-koudai.ac.jp

²鹿児島大学工学部 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: yamaken@oce.kagoshima-u.ac.jp

A PROPOSAL OF QUICK AND ECONOMICAL TOPOGRAPHICAL SURVEY IN STEEP SLOPES

Ryoji TANAKA¹, Takumi OKABAYASHI² and Kentaro YAMAMOTO³

¹Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Daiichi Institute of Technology (〒899-4395 1-10-2
Kokubu-chuou, Kirishima, Kagoshima)

²Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Daiichi Institute of Technology (〒899-4395 1-10-2 Kokubu-chuou,
Kirishima, Kagoshima)

³Assistant professor, Department of Ocean Civil Engineering, Kagoshima University (〒890-0065 1-21-40 Korimoto, Kagoshima)

Abstract: In this paper, we propose three surveying methods for sloping ground where is too small to apply an airborne laser survey system or aerial photograph survey. It is also too large to apply a traditional surveying. The first one uses commercial handy GPS, the second one IMU (Inertial Measurement Unit), and the third one non-prism Total Station. As a result, accurate topography data set which is equivalent to mapping information level 2500 (reference scale 1/2,500), can be reasonably obtained.

Key Words: *topographical survey, handy gps, imu, steep slope*

1. はじめに

鹿児島県は、厚くしらすに覆われており、年間を通して雨が多いため、昨今でも、毎年のように土砂災害が頻発しており、土砂災害調査や土砂災害対策のための地形測量の必要性は不変である。

広範囲の土砂災害防止のための調査や、膨大な数の崩壊が発生した被災地の地形測量は、近年の技術向上が著しい航空レーザ測量による方法が迅速かつ効率的である¹⁾。

一方、狭い範囲では、近年ではネットワーク型 RTK-GPS 測量をはじめとした衛星測位システム (Global Navigation Satellite System: GNSS) と地上型レ

ーザスキャナが用いられるようになったが、システムが高価であることや、森林傾斜地では、衛星電波が遮断されるため GPS が使用できず、地上型レーザスキャナにしても草木が密生して地肌が見えない場所では計測が難しい。そのため、既存の地形図をそのまま利用するか、危険な斜面に立ち入って従来型の測量が行われている。

我々は、航空レーザ測量を実施するには狭く、一般の地上測量法では困難な傾斜地について、(1)歩行可能で上空視界が開け GPS 電波が届く場所、(2)樹木が密生し上空視界が開けていない場所、および(3)崩壊地など表土は確認できるが歩行困難な場所の 3 つの部分に分け、それぞれについて適切な測量法を検討した。

計測には、(1)の状況ではアウトドア向けのハンディ

(携帯用)GPS, (2)の状況では低価格 IMU, (3)の状況ではノンプリズム型トータルステーション(以下, ノンプリズム TS)および民生用デジタルカメラなど, 比較的安価で軽量の計測機器を使用し, それぞれの特徴を生かした傾斜地での迅速かつ経済的な地形測量法を提案する。

2. 計測法および結果

(1) 歩行可能で上空視界が開け GPS 電波が届く場所での計測

ハンディ GPS は単独測位で, 水平位置の最小目盛は 0.01 秒で距離にすると約 0.3m, 標高の最小目盛は 0.1m であるが, 実際は電波遅延等の影響で計測誤差が大きい場合がある。特に標高については誤差が大きいので, そのままでは測量には利用できない²⁾。

しかしながら, 図-1 に示すように GPS の測位方式には他に相対測位があり, その中で, ディファレンシャル測位(Differential GPS, 以下 DGPS)は図-2 のように, 測位対象となる移動局の他に位置のわかっている固定局で GPS 電波を受信し, 対流圏の影響, 電離層の影響等の誤差を相殺する方法³⁾である。

通常は, 既知点に置かれた固定局受信機における各衛星の測定値をリアルタイムに移動局へ伝送するが, DGPS 機能のない機種では, 式(1)のように後処理で補正計算を行なう。

$$\begin{aligned} (\text{移動局の決定座標}) &= (\text{移動局の計測座標}) \\ &- (\text{固定局の計測座標}) \quad (1) \\ &+ (\text{固定局の基準点座標}) \end{aligned}$$

さらに精度向上のために, 標定点に基づいて式(2)に示す 3 次元のアフィン変換により幾何補正する。

$$(X \ Y \ Z \ 1) = (x \ y \ z \ 1) \begin{pmatrix} a & b & c & 0 \\ d & e & f & 0 \\ g & h & i & 0 \\ j & k & l & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで, x, y, z は変換前, X, Y, Z は変換後の座標値. $a \sim l$ は変換パラメータである。

変換パラメータは対応する 4 点の計測値があれば求められるが, 4 点より多い場合, すなわち過剰観測の場合は, 最小二乗法を適用し繰り返し逐次計算する。

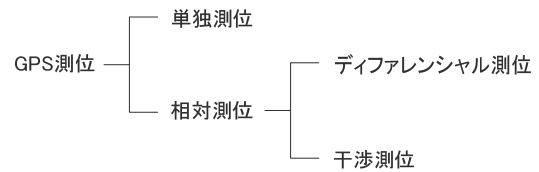


図-1 GPS 測位の種類

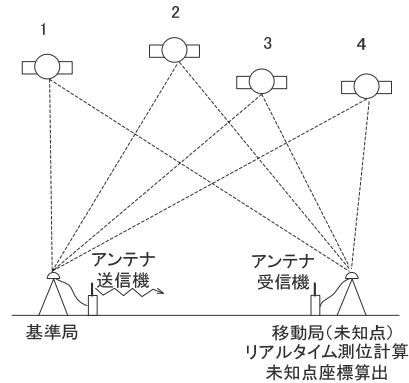


図-2 一般のディファレンシャル測位



図-3 ハンディ GPS 計測の様子

最小二乗法を用いる一般化されたアフィン変換は, テイラー展開で線形化されているので, 初期値が大きく外れると, 良い結果が得られないため, 10 回の計算の中で標定点との誤差が最小となる時のパラメータを用いた。

a) 計測および計算処理の手順

- 計測に使用するハンディ GPS のデータ取得間隔を 1 秒に設定し, 基準点上で約 10 分間置き受信状態が安定するまで待つ。気圧補正機能がある機種では基準点の標高を入力する。

- ・ 固定局用のハンディ GPS は、あらかじめ設置した基準点の上に置いてログを記録する。
- ・ 地形観測用(移動局)のハンディ GPS は、**図-3**のようにヘルメットに取り付けて、ゆっくり歩きながら、トラックポイントデータ(緯度、経度、標高、時刻)を計測する。また標定点では約 1 分間静止して計測する。
- ・ 計測作業終了後、計測されたデータをパソコンにダウンロードし、移動局のデータからヘルメットまでの高さを減じ、同時刻に計測された移動局の座標値から固定局の座標値を差し引き、基準点座標値を加える。
- ・ さらに 3 次元のアフィン変換を施し、調整された点群データを取得する。
- ・ 以上により得られたデータを GIS ソフトや CAD ソフトに取り込み、等高線や断面図を描画する。

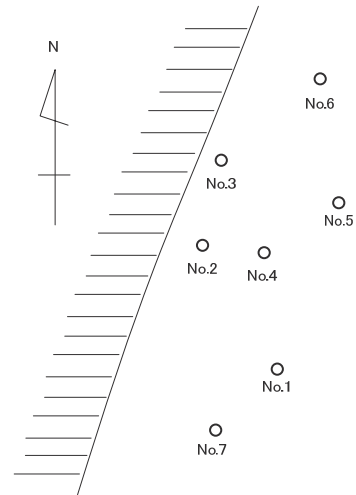


図-4 標定点の配置

b) 計測結果

計測地域の面積は約 25,000m² (100m×250m)で、周囲には地形的な凹地以外の電波障害となるような地物はなく、観測時間帯午前 9 : 00~12 : 00 の衛星捕捉数は 7 個以上、DOP も 4 以下で受信状況は良好であった。計測には 2 台のハンディ GPS を用い、約 2 時間を要した。

予め TS により**図-4**のように標定点 7 点を設置し、計測精度を確認した。DGPS 補正を施した段階で基準点とのずれの最大値は、**表-1**に示すように、水平位置 2.9m、標高 2.0m で、3 次元のアフィン変換後のずれの最大値は、水平位置 2.4m、標高 1.1m、平均偏差は、水平位置 1.3m、標高 0.7m であった。**表-2**に示す公共測量作業規程準則⁴⁾の位置精度に規定されている 1/2,500 の精度は、水平位置の標準偏差 1.75m 以内、標高点の標準偏差 0.66m 以内となっており、本研究のアフィン変換後の平均偏差は、ほぼこれを満たしている。

図-5は計測現場であり、**図-6**は GIS で作成した 3D 地形図である。

また、ハンディ GPS の精度と経済性(作業効率)を検証するために TS による地形測量を実施した(約 700 点)。地形測量では観測者とミラーマン 2 名で、傾斜変換点など地形の変化点を中心に観測し、所要時間は約 16 時間であった。**図-7**は TS で観測した点と CAD で描画した 1m 間隔の等高線である。

表-1 本研究の計測精度

	水平位置 (m)		標高 (m)	
	最大誤差	平均偏差	最大誤差	平均偏差
DGPS補正後	2.9	1.3	2.0	1.0
アフィン変換後	2.4	1.3	1.1	0.7

表-2 公共測量作業規程準則の位置精度

縮尺	水平位置標準偏差	標高点標準偏差
1/1,000	0.70m以内	0.33m以内
1/2,500	1.75m以内	0.66m以内
1/5,000	3.50m以内	1.66m以内



図-5 計測現場

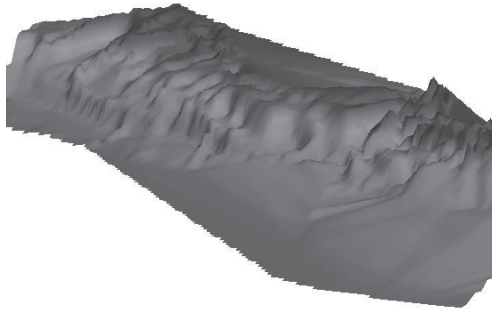


図-6 3D地形図

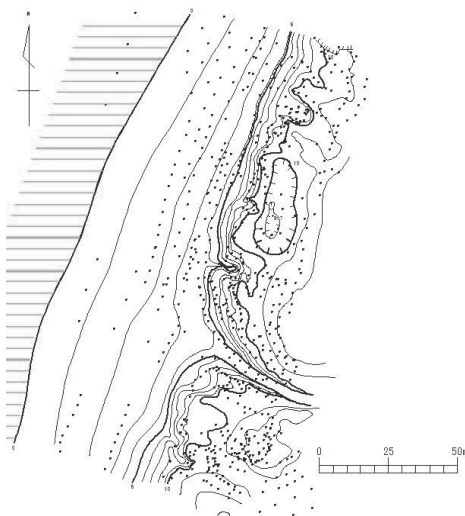


図-7 TSによる地形測量図

(2) 樹木が密生し上空視界が開けていない場所での計測

崩壊地周辺の森林傾斜地では、衛星電波が遮断されるため GPS が使用できず、地上型レーザスキャナにしても草木が密生して地肌が見えない箇所等は計測が難しい。一方、本稿で提案する慣性計測装置(Inertial Measurement Unit, 以下、IMU)は、短時間においては、高精度な相対位置と方位角を検出できるが、ドリフト等の誤差を含み、その誤差が時間の経過とともに急激に増大するという欠点がある⁵⁾。

そこで、測量地域にあらかじめ標定点となる基準点を設置し、基準点間を短時間で計測する。さらに、積分の発散を抑えるために、ローパスフィルタにより高周波ノイズをカットした後、最適化処理を施し、誤差蓄積の低減を図る。なお、計測データには、重力加速度とノイズが含まれるので、式(3)で重力加速度を取り除く。

$$\begin{pmatrix} \Delta a_x \\ \Delta a_y \\ \Delta a_z \end{pmatrix} = G \cdot \begin{pmatrix} \cos \phi \sin \theta_r \cos \theta_p + \sin \phi \sin \theta_p \\ \sin \phi \sin \theta_r \cos \theta_p - \cos \phi \sin \theta_p \\ \cos \theta_r \cos \theta_p \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、 G は重力加速度、 $(\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z)$ は加速度に対する補正量、 $(\theta_p, \theta_r, \phi)$ は 3 軸 (x, y, z) の回転角である。

ノイズはローパスフィルタにより平滑化するが、そのまま積分すると大きく発散するため、計測時間が長くないように、2 基準点間(1 セクション)を約 5 分程度で計測する。

また計算処理は 1 セクションごとに行い、得られた座標を標定点に基づきヘルマート変換し地上座標を求める。

a) 計測およびデータ処理の手順

- ・ 図-8 はヘルメットに IMU を取り付けて計測している様子である。計測中、地形変化点は必ず通過し、標定点となる杭では約 1 分間静止する。また IMU になるべく誤差の原因となる急激な振動が伝わらないように、進行方向を直視して歩行する。
- ・ IMU は ZMP 社製の 6 軸(3 軸加速度, 3 軸ジャイロ)モーションセンサを用い、0.1 秒ごとの連続したデータを取得する。
- ・ データはタブレット PC に記録し、動作状態を確認しながら計測する。
- ・ 観測作業終了後、重力加速度の補正など計算処理を施した座標値を GIS ソフトや CAD ソフトに取り込み、地形図を作成する。

b) 計測結果

ハンディ GPS と同じ計測現場で、計測所要時間は約 1 時間であった。図-9 は、進行方向の加速度である。また図-10 は計測の足跡である。



図-8 IMU 計測の様子

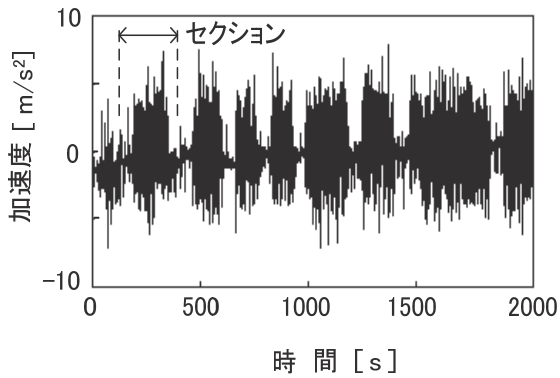


図-9 X方向（進行方向）の加速度



図-10 計測の足跡

- ・ 計測データはデータコレクタに記録され、後処理でパソコンにダウンロードした。計測点は後で確認できるように、デジタルカメラで撮影した画像をタブレット型 PC に取り込み、その上に記録した。
- ・ 通常は得られた座標値を GIS ソフトや CAD ソフトに取り込み地形図を作成する。

b) 計測結果

斜面表土は灰色のコンクリートで保護されていたが、計測中ほとんど計測エラーはなく、測点総数 270 点の計測に約 1.5 時間を要した。

通常は得られた座標値を GIS ソフトや CAD ソフトに取り込み地形図を作成するが、本計測法のようにデータ数が少ない場合は、表計算ソフト等で簡単に処理できる。図-12 は、1m メッシュの数値標高モデル(DEM; Digital Elevation Model)を作成し、表計算ソフトで作成した 3D 等高線図である。



図-11 計測斜面風景

(3) 崩壊地など表土は確認できるが歩行困難な場所での計測

崩壊地では危険を伴うため、通常はレーザスキャナや写真測量により、直接計測対象物に触れずに計測する 3 次元計測が行われるが、小規模の崩壊地では不経済となる。一方、本稿で提案するノンプリズム TS を用いる計測方法は、一般に放射トラバース測量と言われ、機械の性能や反射点の状況にもよるが、100m~200m までの計測が可能で精度も高い。

a) 計測およびデータ処理の手順

- ・ 図-11 は計測実験を実施した斜面風景である。斜面とノンプリズム TS との距離は約 50m~100m で、樹木に覆われていない部分の面積は約 100m²であった。
- ・ 標高の高い箇所からほぼ 1m 間隔で横方向・階段状に計測した。地形変化の大きい部分は 1m 間隔以内であっても計測した。

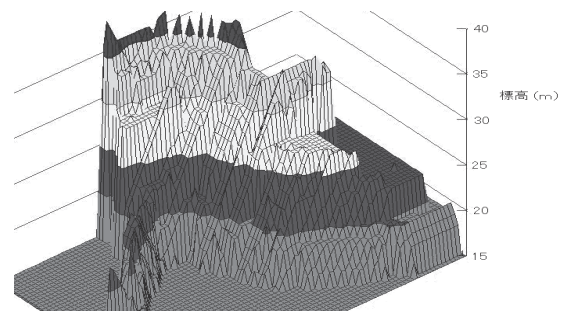


図-12 3D等高線図

3. まとめ

ハンディ GPS による計測では、高価な測量器械を使用せず、登山などアウトドアスポーツ用として使われているハンディ GPS をヘルメットに取り付けて歩き回って計測するというユニークな測量法の開発を行った。精度

確認のために同じ場所を TS でも計測を実施したが、電波障害のない場所では、水平位置、標高とも平均 2m 前後の誤差で計測できることが確認された。迅速性については、TS による地形測量では測量技術者の熟練度によるので単純に比較はできないが、所要時間だけからみると明らかにハンディ GPS の方が短かった(約 4 分の 1)。将来的に国産の準天頂衛星が完備される予定であることや、高感度ハンディ GPS の登場により、安価に迅速に高密度な地形測量を可能にするものと期待できる。

樹木が密生し上空視界が開けていない場所では、低価格小型 IMU をヘルメットに取り付け、歩行中のログをタブレット PC に記録するといった、誰でも簡単に迅速にできる測量法を試みた。IMU の欠点であるドリフト(時間的変化)による誤差を低減する方法として、標定点間の 1セクション当たりの計測時間を短くした。計測時間を短くすることは、その両端の標定点を多く設置することになるが、どの程度の配点密度に設置するか、精度と効率性の点から検討する必要がある。積分の誤差累積による発散を抑える方法としては、角速度と加速度を組み合わせたカルマンフィルタによる処理⁶⁾が考えられるが、今後の検討課題である。しかしながら、森林での測量は、土地の境界設定や植生状態の把握のために、その作業の困難さから、精度の悪いコンパス測量が行われており、さらに地形測量となると、面的なデータ取得のため、通常地上測量では、見通し確保のために多大な草木の伐採が必要となり、きわめて困難な作業になる。したがって、森林内を歩行するだけで 3D 座標が得られる本測量法は、IMU の精度の問題が解決すれば、有効な測量法と考えられる。

崩壊地など危険な場所では、離れた場所から計測する必要がある。本研究で実施したノンプリズム TS での計測は望遠鏡で確認しながら計測できる利点はあるが、どの部分を計測するか判断は観測者の勘によらざるを得ない。また計測密度についての明確な基準はないが、たとえば、1m メッシュを作成するには、50cm 間隔あるいはそれ以上の詳細なデータが必要となり、計測斜面の広さによっては膨大な量の計測を行わなければならない、経費や時間の問題から実用的ではなく、今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 土志田正二ほか:航空レーザ測量データを用いた崩壊地形解析から推定する山体斜面の形成過程, pp. 15- 16, 2007.
- 2) 田中龍児, 西隆一郎, 長山昭夫:ハンディ GPS を用いた海岸地形測量法の開発, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.69, No.2, pp.L1150-L1155 (2013).
- 3) 松山孝彦, 門倉 翠, 八釜和紀:ポータブル GPS 受信機による DGPS 測位評価, 神戸市立工業高等専門学校研究紀要 38(2), pp.51-54, 2000.
- 4) 国土交通省:公共測量作業規程の準則, 2010 年度改訂版.
- 5) 南雲吉久ほか:GPS および IMU の利用による写真測量の効率化に関する研究, 国土交通省国土地理院調査研究年報, 2001 巻, pp. 47- 48, 2002.
- 6) 足立修一, 丸田一郎:カルマンフィルタの基礎, 東京電機大学出版局, 2012.