

レーザー距離計と自動パノラマ撮影装置を組み合わせた
簡易レーザスキャンシステムの構築

**A quasi laser scanning system using laser range finder and
automatic panorama shooting device**

早川裕弐¹・紺谷亮一²・フィクリ＝クラックオウル³・
サバハッティン＝エゼル⁴・ギュゼル＝オズトゥルク³
Yuichi S. Hayakawa¹, Ryoichi Kontani², Fikri Kulakoğlu³,
Sabahattin Ezer⁴, Güzel Öztürk³

¹ 東京大学空間情報科学研究センター

¹ Center for Spatial Information Science, The University of Tokyo, Japan

Email: hayakawa@csis.u-tokyo.ac.jp

² ノートルダム清心女子大学文学部

² Faculty of Literatures, Notre Dame Seishin University, Japan

³ アンカラ大学言語歴史地理学部

³ Faculty of Language, History and Geography, Ankara University, Turkey

⁴ アディヤマン大学

⁴ Adiyaman University, Turkey

2012年8月

August 2012

Abstract

Rapid measurement of topography is an important issue in field surveys of various studies such as archaeology, geology and geomorphology. In this paper we present an efficient method to obtain topographic point cloud and digital elevation model in the field using a handheld laser range finder (TruPulse 360B) and an automatic triggering machine for panorama photo shooting (GigaPan EPIC 100). Accuracies of obtained digital topographic data are good enough (~1 m) for a preliminary analysis of landforms. The method is tested in an archaeological mound in Turkey, and its validity is assessed.

Key words: *laser scanning, laser range finder (LRF), automatic panorama shooting device (APSD), field survey, topographic measurement*

1. はじめに

地球科学をはじめ様々な学術分野におけるフィールド調査において、地形図や地形情報（主にはDEM: Digital Elevation Model）は基礎資料として重要である。しかしながら、海外、山岳地、離島など僻地における現地調査においては、調査に必要となる大縮尺スケールの地形図や高精度のDEMは利用可能でない場合が多く、調査の段階で現地の地形情報を測量により得ることが必要になることもある。ところが、一般の測量で用いられる手法（平板測量、トータルステーションを用いた測量、空中写真測量、航空／地上レーザ測量など）は、時間コスト、金銭コスト、機材運搬等さまざまな問題から、実施することが困難なことも多い。たとえば、地上レーザスキャン測量は現地にて高精細な地形情報を得るのに有効な方法であるが、その機材の多くは100万円を越えるものであり、また軽くても10–20 kgの重量、海外輸出時の関税手続きの必要性といった点から海外等で気軽に利用することができない。現地調査に割ける時間も、たとえば1箇所数時間などに限られるとしたら、安価な機材で短時間に地形測量を行う手法が求められる。

このような背景の中、現地調査において効率的に詳細かつ正確な地形情報を得る手法として、軽量なレーザ距離計（LRF: Laser Range Finder）を用いた手法が提案されている（Mikos et al., 2005; 西川ほか, 2005; Hayakawa et al., 2007; 早川・津村, 2008; Hayakawa and Tsumura, 2009）。デジタルコンパス付きLRFでは、器械点から対称点（地表面）までの直線距離、垂直角度、水平角度を取得することができ、これを器械点からの相対XYZ座標に変換、かつ器械点座標をGNSS等により取得することで、地理座標系における三次元座標の点群データとして取得することができる（Hayakawa et al., 2007; Hayakawa and Tsumura, 2009）。また、こうして得た地表面の点群データは、GIS（Geographical Information System）で後処理することにより、DEMや等高線、三次元鳥瞰図等として表現することも可能である。

このLRFを用いた地形測量においては、三脚の補助はあるものの、基本的に調査者が機材を手を持ち、レーザ発射ボタンを押すことで、対象となる地表面を選択的に測定していく。この方法では、たとえば植物や人工物といった地表でない不要な対象物を測点選択時に排除しつつ測量することができ、後処理で除去する手間をある程度省けるが、一方、レーザ発射のトリガーは手押しによるため、手ぶれによる誤差の発生

や、測定者の疲労、単位時間内に取得できる点数が少ない（数秒に1点）といった問題点があった。そこで本稿では、基本原理は従前と同様として、レーザの発射方法を機械により自動化し、より効率的に地表面点群データを取得する手法を提案する。

2. 方法

LRF によるレーザ発射を自動化するため、自動パノラマ撮影装置 (APSD: Automatic Panorama Shooting Device) を使用する。APSD は本来、パノラマ写真を撮影するために、デジタルカメラの方向を一定の角度で上下左右に移動させながら、カメラのシャッターボタンを物理的または電子的に押すものである。この APSD 上に、カメラの代わりに LRF を設置することで、あらゆる角度に向けての LRF によるレーザ測定を自動化することができる。

機材は、デジタルコンパス付き LRF としては TruPulse 360B (LaserTech Inc.)、APSD としては GigaPan EPIC 100 (Carnegie Mellon University, GigaPan Systems) を使用する。LRF には小型軽量 (12 x 5 x 9, 220 g) でデジタルカメラに置き換えられるサイズであり、また無線 (Bluetooth) によりデータ出力が可能なものを、APSD には物理的なトリガーを備えているものを選択した。TruPulse 360B は、測定可能距離はノンプリズムでおよそ 1,000 m (精度 ± 0.3 m) であり、角度精度は水平角で $\pm 1^\circ$ 、鉛直角で $\pm 0.25^\circ$ である。GigaPan EPIC 100 の重さは 1.55 kg、大きさは 22.1 x 21.3 x 12.6 cm であり、単 3 乾電池 6 本で数時間稼動する。この他、器械点測位に後処理型ディファレンシャル / キネマティック GNSS (Global Navigation Satellite System) として Nikon-Trimble GeoExplorer 6000XH を使用する。ただし、高精度 GNSS を使用すると効率が高いが (Hayakawa and Tsumura, 2009)、相対座標であれば、GNSS はなくても器械点測定を LRF で行うことも可能である。GNSS の使用が制限されている地域や、密な森林内や洞窟内など GNSS の電波が届かない場所では相対座標での器械点測定が必要になる。なお、LRF を備えた APSD は三脚の上に設置され、GNSS はその三脚の下部に配置される (図 1)。ここで、APSD の物理トリガーの長さが不足することから、APSD 上の LRF は通常のカメラの向きとは逆向き (水平方向に 180°) に設置している。

APSD の設定で 1 回の移動角度 ($1^\circ \sim$)、トリガー頻度 (1 ショット当たり 0.8 秒 \sim)、また測定する対象となるエリアの左上 (LRF にとっては左下) から右下 (LRF には右

上) の範囲を決め、測定を開始する。LRF から出力される測定データは、Bluetooth 受信が可能な機材で収集される。ここでは GNSS として用いた GeoExplorer (Windows Mobile 6 ベース) 上で、シリアルデータ送受信用フリーソフトウェア SimpleLogger (塚田, 2004) を用いて、GNSS 測位と並行してデータ収集を行った。ただし、Bluetooth またはシリアルケーブル経由でのシリアルポートからのデータ受信が可能であれば、どのようなデバイスであってもよい。

LRF から送信されたデータは CSV ファイルとして収集され、そこに含まれる器械点から対象点までの直線距離、垂直角度、水平角度は、器械点からの XYZ 座標に Microsoft Excel 上で変換される。また、GNSS から得られた器械点座標を用いて、複数地点からの測定データを地理座標 (投影された座標系) に取りまとめることが可能になる。ここで、LRF のデジタルコンパスによる水平角は特に設定しない限りは磁北基準であるため、調査地における偏角から真北基準に変換することが必要である。また、器械高 (GNSS から LRF までの高さ) を Z 座標に加算する。

取りまとめた XYZ 座標は、Excel または CSV フォーマットで保存し、ESRI ArcGIS で読み込む。この点群データから TIN を生成し、標高での色分けまたは TIN 上の等高線を引くことで、エラー点 (周辺に比べて特に標高差が大きい点) を検出、除去する (クリーニング)。その後、クリーニング済み点群データから、最適関数を用いた Kriging 補間により DEM を生成し、陰影図、斜面傾斜図、等高線などを計算、重ね合わせ、地形図として表現することが可能になる。

3. フィールド調査における適用事例

上記、LRF と APSD を組み合わせた手法による測量を、実際のフィールド調査で試験的に実施した。対象としたのは、トルコ共和国カイセリ県中南部における前期青銅器時代 (紀元前 2000~3000 年) の遺跡であるイキテペ (İkitepe) である ($35^{\circ}19'12.5''E$, $38^{\circ}25'06.9''N$, 1093 m a.s.l.)。これは、二つ (イキ) の丘 (テペ) からなる遺丘であり、それぞれの直径は約 200 m, 120 m である。扇状地の末端、かつ旧湖岸線の近傍に立地し、この遺丘の周辺には城壁とみられる大規模な石列も発見され、当時の大都市のひとつである可能性が高い。この場所において利用できる既存の地形データは、1:100,000 地形図、SRTM-3 (Shuttle Rader Topography Mission-3, 解像度 90 m) など



図 1. LRF+APSD システム。APSD は三脚上に設置され、その器械点座標は直下に置いた GNSS 測位（コード/フェーズによる後処理補正）で取得している。

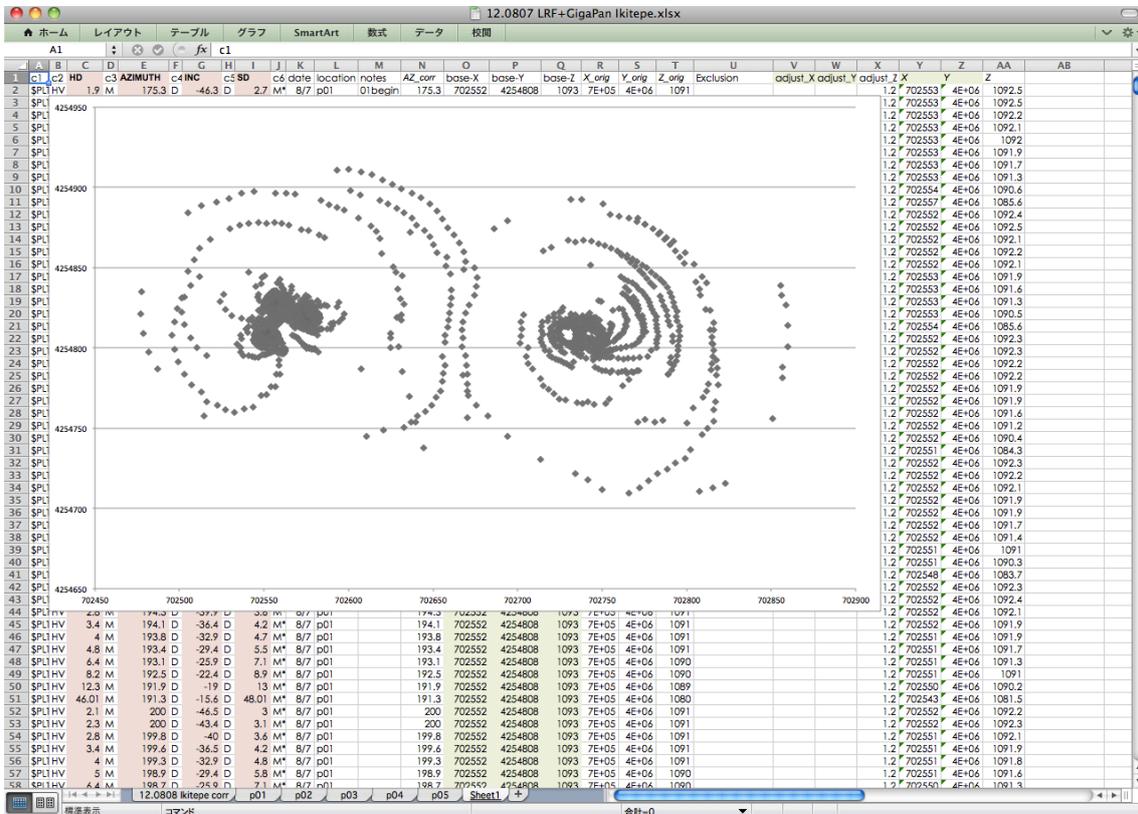


図 2. LRF による測定データの例。GNSS 測位による器械点座標も併せ、Microsoft Excel を用いて地理座標（この場合 UTM Zone 36N）上の XYZ 座標に変換される。ここでは測点の XY 分布をグラフ機能で図示している。

いくつか存在するが、いずれも遺丘の形状を表現するには十分な解像度、精度をもたない。そこで、本稿によるレーザ測量システムを使用し、その詳細な地形測量を行った。

2つの遺丘のうち片方はやや小さいが、いずれも平面形は円形状、断面形は台形状であり、平坦面を含む遺丘上面の縁から遺丘の斜面と周辺域を見渡せることから、遺丘の上面に5つの器械点（大きい西側の遺丘上に3つ、東側の遺丘上に2つ）を設置して測量を行った。現場における実質約3.5時間（1人による作業）のうちに取得された点群の全点数は3,208である。また、GNSSによる器械点座標の測位結果は、アンカラに設置されたCORS基準点の観測データを用いて後処理補正を行い、15–30 cmの精度を得た。加えて、周辺斜面における傾斜変換線をGNSSのライントレース（1秒間隔）により取得し、その測点（ $n=969$ ）も地表面データとして利用した。器械点直下の地表面標高も含め、まずは上記測点のすべてを用いた点群（ $n=4,182$ ）からTINを作成し、異常点の除去を行った。クリーニング後の点群点数は4,165であり、その分布密度は平均 0.04 pts/m^2 （最大 4 pts/m^2 ）である。この際のエラー点数（ $4,182 - 4,165 = 17$ 点）は、手持ちで計測した場合のクリーニング作業で発見されるエラー点数（これまでの経験からは、概ね1000点中に数10点）と比較して圧倒的に少なく、レーザ発射時の安定性すなわち機械によるレーザ発射操作の優位性を示している。この点群からKriging補間（Spherical function, No nugget effect）により4 mのDEMを生成した。このDEMから陰影図、斜面傾斜図、1 m間隔の等高線を計算し、それぞれ40%の透過率で重ね合わせ、また別途GNSSでトレースした遺構の分布ラインを乗せ、遺丘の地形表現図を作成した（図3）。また、2つの遺丘を東西に切る測線で地形断面図を作成した（図4）。

4. 議論とまとめ

本稿で提案した手法の利点の一つとして、LRFを機械的に動作させることで、手持ちの場合に比べてレーザ発射・受信時の手ぶれを抑えられることが挙げられる。LRFそのものの精度としては、距離精度 $\pm 0.3 \text{ m}$ 、鉛直角精度 $\pm 0.25^\circ$ 、水平角精度 $\pm 1^\circ$ であるため、たとえば100 m先の対象物における角度に依存する不確かさは高さ方向に0.44 m、水平方向に1.75 mとなり、概して1–2 mの精度といえる。これはある程度

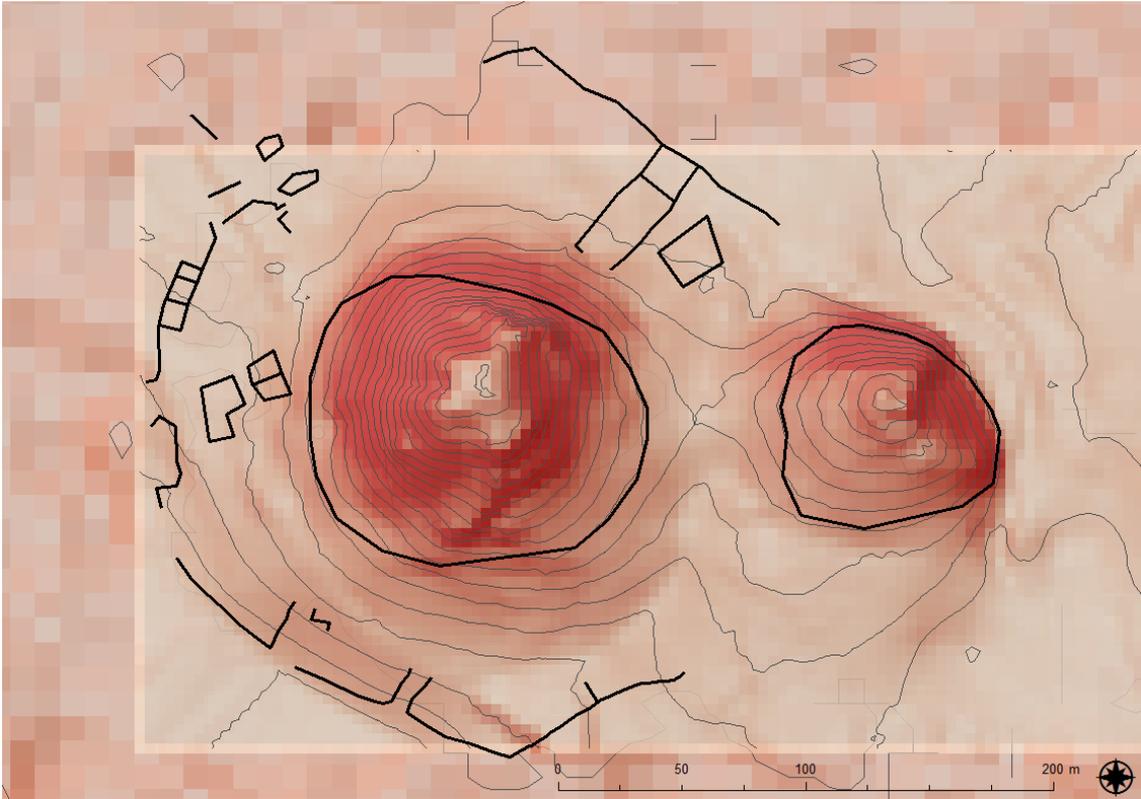


図3. Ikitepe の地形表現図. 陰影, 斜面勾配を半透明に重ね合わせている. 等高線間隔は1m. 黒線は遺構のGNSSによるトレースを示す. 背景にはALOS PRISMによる10m DEMに基づく等高線(10m間隔), 陰影・斜面勾配を同系色で表示した.

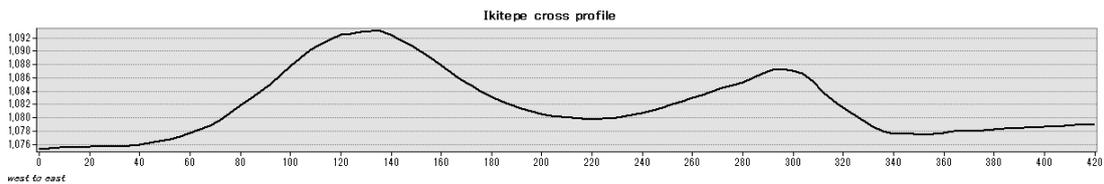


図4. Ikitepe の遺丘東西方向の断面図. 西の遺丘は比較対称性を保っているのに対し, 東の遺丘は東側斜面が急勾配となる非対称な断面形を示す. 西の遺丘の西側には旧湖沼に接続する平坦面が続き, 東の遺丘の更に東側には扇状地の緩斜面が続く.

広範囲(数100m圏)な簡易地形図の作成としては十分な精度と考えられる。手持ちの場合にはこれに加え角度の不確実度が大きくなる可能性があり, APSDの自動的なトリガーを用いた方がLRFも安定し, 最小限の不確実度に抑えることができると考えられる。

また、本手法のおそらく最大の利点は、測量効率の向上である。すなわち、手持ちの場合には逐一对象を狙い定めてレーザ発射ボタンを押す必要があったが、それを機械的に行うことで、大幅な時間節約および大量点取得が可能である。人の手では数秒に1回が限度であるが、APSD ではたとえば0.8秒に1回のレーザ発射が可能であり、点取得の効率が圧倒的に高い。加えて、測量中に機材から手を離せるため、その間に別の作業（たとえば現地の観察と記載、GNSS 測量など）をすることができ、状況に合わせて現地滞在時間の短縮も可能である。

もう一つの利点として、機材はいずれも小型軽量であり、ポータビリティに優れているという点が挙げられよう。地上レーザスキャナは本体10~20 kg、三脚等含めると30~50 kg にもなるものもあるが、本システムはLRF (0.2 kg)、APSD (1.6 kg)、三脚 (1~2 kg) の各機材をあわせても4 kg にも満たず、もちろん一人で運搬も可能であり、航空機で移動する際もスーツケースに簡単に収まるものとなる。器械点を移動する際にも、地上レーザスキャナでは逐一の移動や設置に数10分以上かかる場合もあるが、本システムでは移動距離が近ければ数分で移動、再設置することが可能である。さらに、LRF と APSD、三脚のセットでせいぜい30~40 万円程度であり、コストパフォーマンスも高い。

一方、本手法のデメリットとしては、レーザの発射が自動化されるため、対象点の選択ができないことが挙げられる。手持ちの場合には、レーザ発射時に背の高い草本植物や電柱等、測量対象に含めない人工物などは明らかな不要点として外して計測できるが、本手法の場合にはそのような対象もレーザが反射してしまえばデータに含まれてしまう。ただし、後処理の段階で、TIN を見て異常点を除去することは容易であり、それほど大きな問題でもない。一方、一律の角度で対象点を移していくため、距離の近い範囲は点群が密に、遠い部分は疎になるという傾向がある。ただしこれも、測定範囲の設定（とくに縦方向のレーザ発射範囲）を絞る、異なる器械点からの測量を繰り返すといった方法で点密度のばらつきを削減し、問題回避することが可能である。

以上のことから、本稿で紹介したLRF と APSD を組み合わせた簡易地形測量手法は、簡単に、素早く、ある程度正確に地形を測り、データ化することを可能とするものであり、地球科学、考古学を含めさまざまなフィールド調査に応用できると考えられる。今後、この手法のマニュアル化を進め、誰でも気軽に利用できる地形計測システムと

して普及されることが望まれる。

文献

- Hayakawa, Y.S., Oguchi, T., Komatsubara, J., Ito, K., Hori, K., Nishiaki, Y. (2007) Rapid on-site topographic mapping with a handheld laser range finder for a geoarchaeological survey in Syria. *Geographical Research*, 45, 95–104.
- 早川裕一・津村宏臣 (2008) LRF と DGPS を用いた野外調査における地形測量：トルコ，ハジトゥール・テペ遺跡における適用事例. *地形*, 29 (4), 421–434.
- Hayakawa, Y.S., Tsumura, H. (2009) Utilization of laser range finder and differential GPS for high-resolution topographic measurement at Hacituğrul Tepe, Turkey. *Geoarchaeology*, 24 (2), 176–190. doi:10.1002/gea.20261
- Mikosč, M., Vidmar, A., Brilly, M. (2005) Using a laser measurement system for monitoring morphological changes on the Strug rock fall, Slovenia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 143–153.
- 西川友章・西村智博・吉川卓郎・本田雅昭 (2005) 簡易計測システムを利用した現地計測作業の高精度化と簡素化について. *砂防学会研究発表会概要集*, 42, 446–447.
- 塚田浩二 (2004) Bluetooth シリアル通信を使ってみよう (Pocket PC 編) . <http://mobiquitous.com/device/bluetooth-serial.html> (Last access on August 12, 2012)