

大型水路実験へのデジタル写真測量技術の適用

Application of semi-automated digital photogrammetry to experimental geomorphology

小松 陽介*

Yosuke KOMATSU*

Measurements of sand/gravel streambed by using a digital photogrammetry were conducted at the Large Flume in Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba. A future perspective is described about experimental geomorphology and small-scale landforms in the field.

I はじめに

測量は地形学分野における最も重要でかつ基礎的なデータを取得する技術であるが、時空間分解能および精度の向上や、地図作成までに要する時間の短縮などが課題となっていた。この問題の解決策の一つにデジタル写真測量技術の利用があげられる。欧米では1990年代後半からデジタル写真測量を用いた研究が活発化しており、各種学術雑誌に数多くの研究が発表されつつあり、それらは林・小口(2002)に詳しくまとめられている。

この技術の最大の特徴は、写真撮影から地図作成までに要する時間がきわめて短時間で済む点にある。従来のアナログ写真測量では複雑かつ精密な標定作業に多くの時間を要したが、PCの性能が向上してデジタル写真測量の作業が簡単になったことが、近年普及してきた主な理由であろう。特に、連続的な地形変化を定量的に表現する実験的研究では、写

真撮影に要する時間そのものは瞬間的であるので、条件さえ整えば著しく作業能率を上げることが可能となる。

陸域環境研究センターの主要施設の一つである大型水路実験施設では、これまで数多くの実験が行われ多大な成果を収めてきたが(たとえば伊勢屋・池田, 1986; 池田ほか, 1995), 精密な測量には多大な労力と時間が必要であった。そのため、地形の記載方法としては、簡易測量や天井走行電車から撮影した写真から地形分類図などを作成することが主であった。また、実験結果としての地形的特徴を正確かつ定量的に記録する方法として、既存の接地式の砂面計を活用することもできるが、測定台車の移動時間および砂面計の作動時間が非常に長いため精密な地形図を作成することはほとんど無かった。したがって、計測時間を短くすると空間分解能が低くなり、反対に高分解能データを得るためには長い計測時間を要するというジレンマが生じていた。そこで、本論文ではデジタル写真測量を大型

* 筑波大学陸域環境研究センター (現: 防災科学技術研究所 総合防災研究部門)

水路での実験的研究へ応用した例を示すとともに、今後の陸域環境研究センターにおける大型水路および各種小型実験装置での研究、さらには野外研究への本手法の適用の発展性について論じるものとする。

II 写真測量技術の進展

デジタル写真測量のベースは20世紀初頭から取り入れられた空中写真測量技術であり、短時間で広範囲に測量することができる手法として広まっていった。解析図化機では標定処理の後に、オペレータがメスマークを操り同一高度分布をトレースすることで、等高線が作成される。デジタル写真測量では、標定処理や標高決定の原理は同じであるが、左右のステレオ写真の輝度情報からコンピュータによるマッチング技術を用いて自動計測できる点が大きく異なる。すなわち、新しい技術にありがちな仮定や例外などの短所が少なく、研究者の間で十分なコンセンサスが得られており、信頼性が高いことも利点の一つであると言える。

デジタル写真測量技術の利点としては以下の事項があげられる。

1. 時系列変化に対応：写真撮影後に図化作業をまとめて行えるため、実験中は次々と写真に記録することができ、測量作業にとられずに済む。

2. 測量時間の短縮：作業に慣れば、写真撮影から解析・図化作業をきわめて短時間で完了することができる。特に時系列変化を記録する実験の場合、カメラ・被写体・GCPの位置が不変であるので、ルーチンワークのみならば標定解析作業は大幅に短縮できる。

3. 瞬間的な動きに対応：複数のカメラを同期し、撮影間隔を短くすることで、土石流や地すべりなどの粒子や土塊の移動にも対応することができる。また、高速度カメラの同期を取れば、さらに高速な動きを地図上で再

現できる。

4. 遠隔操作：現地踏査が困難な地域においても、遠隔撮影により測量ができる。急斜面や崖・滝などの地形や、斜面崩壊などの土砂災害地域に適用するためには、トータルステーションやノンプリズムレーザー距離計を用いて測量したGCP、あるいは長さが既知のスケールを写真に入れる必要がある。

また欠点としては、以下の二点があげられる。

1. 非可視域：植生覆われた地表面は測定できない。樹冠間隙での測定値を非可視域に外挿するなどの方法が試されているが、原理的に可視域ほど精度を向上させることはできない。

2. 日射・照明：日射の方向によってはコントラストが大きくなり、日陰部分は解析不可能となる場合がある。また左右の写真で照明方向が変化するので、ストロボ撮影は不可である。

1990年代の中頃から、デジタル写真測量と従来の測量方法との精度比較などに関する技術的な論文が、測量関係の学術誌に掲載されるようになった。そして90年代終わりには汎用デジタルカメラとPCの性能の著しい向上や低コスト化などによりデジタル写真測量技術が普及し、*Earth Surface Processes and Landform*などの地形学に関する学術誌に応用的な研究論文が見られるようになってきた。この技術を応用した地形学関連の研究としては、無植生地域という理由から、河川地形・河道変遷などの研究事例が非常に多いほか (Heritage *et al.* 1998; Brasington *et al.*, 2000など)、寒冷地域でも適用されてきた (Kaab and Vollmer, 2000など)。また河川地形では、垂直写真のみならず斜め写真を用いて河岸侵食の形態を捉える研究 (Lawler, 1993; Barker *et al.*, 1997) や、濁りのない浅い水深の河床形態を測量するための補正に関する研究 (Westway *et al.*,

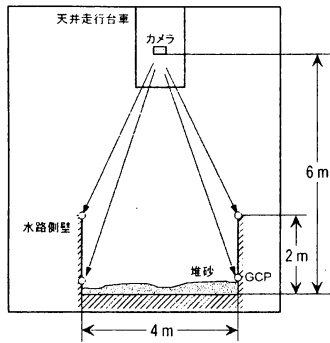


図1 大型水路実験での写真撮影模式図

2000)がある。一方、室内外での各種実験的研究にデジタル写真測量を適用した例としては、土壌侵食実験 (Hancock and Willgoose, 2001), 低起伏流域における水系網発達に関する実験 (Chandler, 1999), 水路実験 (Stojic et al., 1998) などがあげられる。

III 大型水路実験施設での計測例

陸域環境研究センターには、様々な河川のはたらきを調べるための世界有数の大型水路実験施設があり、何度かの部分改修を経て現在も稼働している。この大型水路には側壁上のレール上を走行する測定台車を備えており、任意の地点で砂面あるいは水面までの距離を測定することができる。またこの建屋の天井には、河道を見下ろすように観察可能な天井走行台車があり、垂直写真・斜め写真の撮影のほかビデオ撮影も可能である。以下の条件により、この天井走行台車からステレオ写真をデジタルカメラで撮影し、デジタル写真測量を行った。

(1) カメラ

撮影に用いたカメラは、オリンパス社製の汎用デジタルカメラ (ノンパラメトリックカメラ) C-3030ZOOMである。仕様によれば、記録画素数は2048×1536画素、計約330万画素で、レンズは6.5 ~ 19.5mm, F2.8, 6群8枚

(35mm フィルム換算32 ~ 96mm 相当)である。テレ端やワイド端で撮影するとレンズの歪みの影響が生じるが、今回は画角の関係からテレ端で撮影した。CCDピクセルサイズは、メーカーに問い合わせたところ、 $3.45 \times 3.45 \mu\text{m}$ である。

このデジタルカメラのAUTOモードで水路河床形態を撮影した。撮影された画像ファイルはJPEG画像に撮影諸元が記録されているExif形式であり、Exif Readerというフリーウェアの画像ビューワソフトを用いて撮影諸元を読み取った。これによると、今回の撮影諸元は、露出時間1/13秒、絞りF2.8、ISO感度200相当で、焦点距離6.6mmであった。ストロボは未使用である。また、JPG圧縮率は5/1(bit/pixel)という低圧縮率モード (SHQモード) で撮影を行い、一枚あたりのファイルサイズは約2.5MBであった。本来ならば非圧縮モードで撮影するべきであるが、後述する自動マッチング結果が良好であったため、低圧縮モードでの解析例を示した。

(2) 地上基準点の設定

GCPは実験施設の特長を生かし、空間的に偏りの無いように水路の側壁上および壁面に4箇所配置した。大型水路は1/100の勾配をもち、側壁は床から2mの高さに設計されているため、容易に側壁上面の標高を算出できる。図2は天井走行電車に設置したデジタルカメラで撮影したステレオペア写真であり、いずれも左が上流である。写真の上下には壁面が写し込まれ、赤白のマーカの長さは1mである。側壁上面のみのGCPだけではZ軸 (高さ) 方向に均等配置していないので、壁面にGCPを設置した。将来的には水路壁面に一定高度にGCPを描いておくと、多様な河床に対応して測量できるだろう。また、GCPのほかに3箇所タイポイントを砂面上に設定して標定解析を行った。

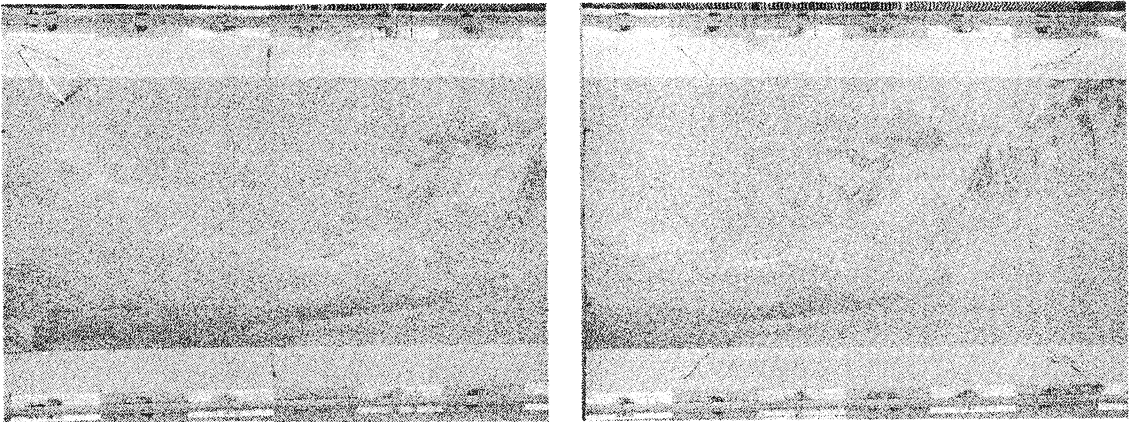


図2 大型水路でのステレオ垂直写真。

左：約102～108.5 m の範囲，右：約104～110.5 m の範囲。いずれも右方向が下流である。

(3) 解析

画像解析には，アジア航測(株)製のADIMS (Asia Digital Image Measurement System)を使用した。このソフトによる解析手順の詳細は，土居原・内田(1999)および伊藤・高橋(1999)に記載されている。解析を行ったPCは，Celeron 1.2GHz，メモリ512MB，ビデオメモリ32MBのノートパソコンで，OSはWindows98SEである。

(4) 解析結果

解析に用いた写真は図2のステレオペア写真である。左右の写真はそれぞれ上流側（上流より約102～108 m区間），下流側（同104～110 m）を撮影したものである。したがって，実体視可能な解析区間は約104～108 mである。この範囲ではバーの一部分が示されている。右岸上流部において水流が集中し洗掘されており，その下流側では右岸側から中央付近へ水流が発散している。中央の平坦面に比較して右岸側は約0.2 m洗掘されていることがわかる。また図2より，左岸側の洗掘部に細砂が堆積している様子が観察されるが，この周辺には，通水終了時の減水にともなう谷頭侵食の形態が観察される。

図3の上は図2のステレオ写真から標定解析を行った後，自動マッチング，DEMの生成を半自動的にを行い等高線情報として出力したものである。等高線間隔は1cmで，図中の数字は水路下流端（160 m）の床面を原点とした標高（単位はcm）を示している。また，図3の下はモノクロのグラデーションを付けた段彩図である。さらに，生成されたDEMから0.025 m間隔でデータを抽出してワイヤメッシュダイアグラムを作成した（図4）。従来の接地式砂面計により0.2 m間隔で横断面測量を行うと，約0.5 mの幅を持つ中央左岸よりの洗掘部の地形変化過程を解析することは難しかったが，これらの図からは実際の地形を良く再現することができた。さらに従来の方式では一つの横断面図を測定するのに平均約10分の時間を要しており，大幅に時間短縮することができた。一方，縦断面形を精密に測量するためには測定台車を微調整して移動させねばならず，事実上不可能であったが，横断面方向と同じ精度で測量することができた。

研究目的にもよるが，大型水路では1cmの垂直分解能で十分な場合が多いため，過剰な情報を抑えて効率化を図ることも重要である。

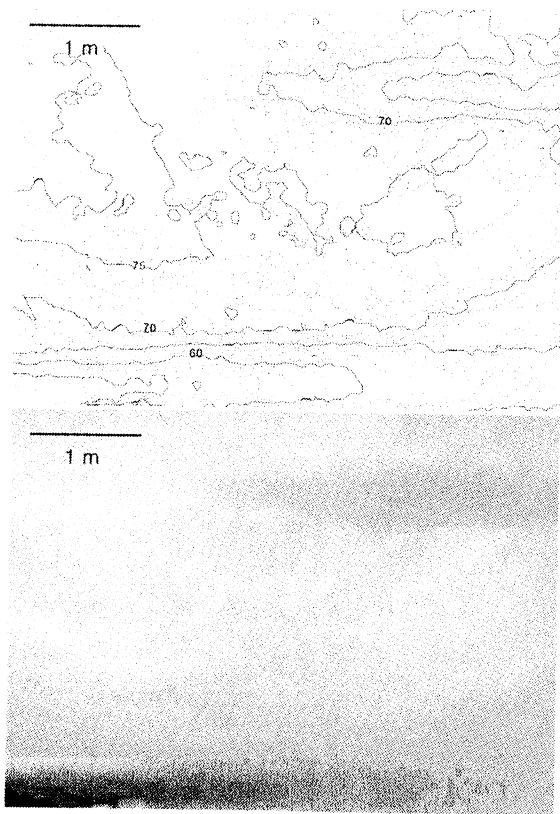


図3 大型水路河床の等高線図

図中の数字は水路下流端の床面を基準とした標高

Stojic *et al.* (1998)では、長さ11.5 m、幅2.9 mの室内実験水路に生成した網状流川を測量するため、32カ所のGCPを河床に均等配置し、4 mの高さから8枚の垂直写真を撮影することにより、0.1 mmの垂直分解能を得る事に成功している。しかし河床上にGCPを配置させることは測量の自動化が損なわれるので、本研究や Hancock and Willgoose (2001)のように実験水路外にGCPを配置した方が効率的である。

また、大型水路では、上下流端の影響を受ける区間を除いても100m以上の長さがあるため、本研究と同じ撮影条件で全区間を測量すると撮影枚数が25枚以上に及ぶ。そのため、広角レンズを用いて撮影枚数を減らすなどの改良が必要である。

IV 野外での地形プロセス研究への応用

研究の必要性に応じて、微地形測量を行うことは現在でも一般的な方法である。たとえば、河床形、波食棚、構造土、風化形態などの微地形研究に求められる地図の縮尺は5000分の1より大きく、必要とされる等高線間隔は0.2~2mであり(吉川ほか, 1973)、調査対象や目的によってはさらに詳しい等高線間隔が必要となる。これらのような微地形測量はこれまで困難であったため、微地形の地形形成プロセスについては、定性的な記述もしくは簡単な地形特性を示す値の計測(たとえば洗濯板状地形なら比高差や地層の厚さ、タフォニなら直径や深さなど)にとどまることが多かった。

しかし、その形状の時間変化を詳しく研究し、地形プロセスの解明や将来予測に応用していく上ではこれらの値だけでは不十分であり、地形変化場と地形変化量を把握する必要も生じる。そのためには、デジタル写真測量により精密な地形図を作成することが有効である。たとえば宮原(1998)では、土器や面などの考古遺物のレプリカ作成を目的として、0.1mmオーダーのデジタル写真測量を行っており、きわめて効果的な方法である事を実証している。したがって、このような微小スケールの測量は地形学においても充分活用することができると考えられる。

実際に地形学の分野ではいくつかの微地形プロセス研究に応用され始めている。岩石の風化に伴う表面形態の微小な変化過程(Dixon *et al.*, 1998)や、雨滴衝撃による土壌表面の変化に関する研究(Clegga *et al.*, 1999)、岩盤表面に存在する割れ目の自動抽出(Reid and Harrison, 2000)など、これまで測定が困難だった微地形を測量することにより、従来とは異なる側面から地形変化のメカニズムを解明できる可能性が出てきた。

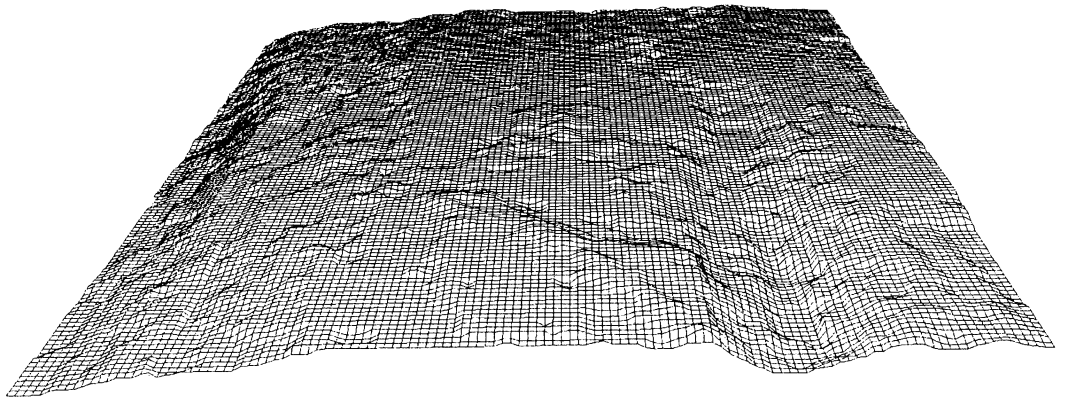


図4 下流側上方より俯瞰したワイヤメッシュダイアグラム

ただし、写真測量技術は原理的には大地形から微地形まで対応可能であるが、求められる精度に見合った測量精度が得られるかという点が現実的には難しい。それは0.1mmの精度が必要であるならば、同精度で基準点測量を行わなければならないためである。林・小口(2002)も指摘しているように、あまり精度にこだわりすぎて地形学の発展を妨げることは良くないが、誤差・精度についても慎重さが必要である。デジタル写真測量の技術はアイデアと工夫次第で、地形学の研究を大きく前進させることができる重要なツールであり、多くの研究者が利用できるようになることを切望する。

文献

- 池田 宏・Lisle, T.・Pizuto, J.・伊勢屋ふじこ・小玉芳敬・眞板秀二・飯島英夫・叶 偉・鈴木陸仁(1995)：Sediment Wave の伝播に伴う河床形態変化に関する大型水路実験。筑波大学水理実験センター報告, 20, 1-9.
- 伊勢屋ふじこ・池田 宏(1986)：混合砂礫を用いた大型水路実験—混合効果による勾配の急変と堆積構造の違い。筑波大学水理実験センター報告, 10, 125-134.
- 伊藤俊秀・高橋博将(1999)：デジタルカメラ、GPSおよびトータルステーションによって取得された地形データの比較。情報技術と露天採掘研究会編：「情報技術と露天採掘—GPS, デジタルカメラ, データベースの応用—」, 古今書院, pp.76 - 86.
- 土居原 健・内田 修(1999)：デジタルカメラによる写真測量。情報技術と露天採掘研究会編：「情報技術と露天採掘—GPS, デジタルカメラ, データベースの応用—」, 古今書院, pp.28 - 41.
- 宮原健吾(1998)：デジタル写真測量と光造形を用いたレプリカの製作, 写真測量とリモートセンシング, 37-5, 70-75.
- 吉川虎雄・杉村 新・貝塚爽平・太田陽子・坂口 豊(1973)：『新編日本地形論』東京大学出版会, 415p.
- 林 舟・小口 高(2002)：地形学における写真測量法の応用—欧米の事例を中心に—地学雑誌, 111, 1-15.
- Barker, A., Dixon, L. and Hooke, J. (1997)： Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion, *Earth Surf. Process. Landforms*, 22, 1217-1227.
- Brasington, J., Rumsby, B., and Mcvey, R. (2000)： Monitoring and modelling

- morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution gps-based survey. *Earth Surf. Process. Landforms*, **25**, 973-990.
- Chandler, J. (1999): Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surf. Process. Landforms*, **24**, 51-63.
- Clegga, Z., Farresa, P. J. and Poesenb, J. W. (1999): Soil surface drip point features: an integrated approach using analytical photogrammetry and soil micromorphology, *Catena*, **35**, 303-316.
- Dixon, L. F. J., Bray, R. B. M., Farres, P., Hooke, J., Inkpen, R. Meral, A. Payne, D. and Sheford, A. (1998): Analytical photogrammetry for geomorphological research. Lane, S. N., Richards, K. S., and Chandler, J. H. eds. *Landform monitoring modeling and analysis*, John Wiley & Sons, Chichester, 63-91.
- Hancock, G. and Willgoose, G. (2001): The production of digital elevation models for experimental model landscapes. *Earth Surf. Process. Landforms*, **26**, 475-490.
- Heritage, G., Fuller, I., Charlton, M., P. A. Brewer, and Passmore, D. (1998): CDW photogrammetry of low relief fluvial features: Accuracy and implications for reach-scale sediment budgeting. *Earth Surf. Process. Landforms*, **23**, 1219-1233.
- Kaab, A. and Vollmer, M. (2000) Surface geometry, thickness changes and flow fields on creeping mountain permafrost: automatic extraction by digital image analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*, **11**, 315-326.
- Lawler, D. M. (1993): The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review. *Earth Surf. Process. Landforms*, **18**, 777-821.
- Reid, T. and Harrison, J. (2000): A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **37**, 1073-1089.
- Stojic, M., Chandler, J. H., Ashmore, P. and Luce, J. (1998): The assessment of sediment transport rates by automated digital photogrammetry, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **64**, 387-395.
- Westaway, R., Lane, S., and Hicks, D. (2000): The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. *Earth Surf. Process. Landforms*, **25**, 209-226.

陸域環境研究センター報告第3号 正誤表

題目：大型水路実験へのデジタル写真測量技術の適用

著者：小松 陽介

P. 71 の図 3 の説明文

(誤) 図 3 大型水路河床の等高線図

図中の数字は水路下流端の床面を基準とした標高

(正) 図 3 大型水路河床の等高線図

図中の数字は水路下流端の床面を基準とした標高

(単位は cm) で、等高線間隔は 1cm.