河床粒度分布調査における 斜め画像の処理に伴う石礫輪郭の歪み補正

GRAIN SIZING AND CALIBRATING OF DISTORTION
BY IMAGE PROCESSING WITH INCLINED PHOTOGRAPH.

安田真悟¹・大橋慶介²・伊原一樹¹

Shingo YASUDA, Keisuke OHASHI and Kazuki IHARA

¹ 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

² 正会員 博士 (工学) 岐阜大学助教 工学部社会基盤工学科 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

River bed material is normally heterogeneous, and the grain size distribution shows some features of each rivers. The information of distribution is, therefore, important factor in river engineering, and several traditional methods is practically used. Image processing method with digital photograph is modern analysis by using computer and replaced traditional analog photograph method. In image processing, however, optical distortion brings measurement error.

We present a calibration of the distortion with optical theorem. In laboratory experiment with balls supposed river bed gravel, the theoretical calibration is considered to be appropriate. In field experiment, actual coefficient to calibrate distortion is estimated. In consequence of the investigation, it makes image processing method more accurate.

Key Words: Automated Grain Sizing (AGS), Manual Grain Sizing (MGS), Image Processing, river bed material, OpenCV

1. はじめに

河床材料の粒度分布は水工学上重要な情報である。例えば、河床変動に代表される河道の安定に関する物理的な問題だけでなく、水棲生物の生息場評価といった河川生態の問題においても不可欠な要素となっている¹⁾。粒度分布調査は、石礫標本を抽出するサンプリングと、標本の大きさを測定する粒度分析の 2 種類の工程に分けられる。サンプリングには、面格子、線格子法といった表面の石礫をサンプリングする方法、表面だけでなく一定深さまでの全量を採取する容積サンプリング法がある。粒度分析は、ふるい分け試験や石礫質量をひとつずつ計測する方法、細粒成分については沈降法などが一般に用いられる。

粒度分布調査は統計処理の一種であるため、標本数が結果の確度に影響を及ぼすことは自明である。河村・小沢によると、面格子、線格子法の石礫の標本数は現地計測の統計結果から 50 個以上必要である²⁾としている。一方で、加藤・井上・島津は、河村らの結果は標本数増加に伴う平均粒径の分析精度を過小評価していることを指摘し、標本数はさらに多いことが望ましい³⁾とも述べている。反面、一般的なサンプリング法である面格子ないし線格子法とふるい分け粒度分析の組み合わせは、大量の標本を運搬した上で、震盪機でのふるい分けに時間を要するなど、その作業には大きな労力が必要であり、標本数を増やすことは容易ではない。

それらに対して、より簡便な従来法にフィルムによるアナログ画像を使った写真法がある。これは、画像上の石礫の大きさを測って粒度を得る方法であり、少ない労力での調査が可能である。従って、多地点での調査に適した方法である。さらに近年、デジタルカメラの普及に伴い、デジタル画像による写真法が提案されており^{4),5),6)}、本研究ではそれを画像処理法と呼ぶ。アナログ、デジタルともに写真法では、石礫の大きさを知るために長さが判別できるスケールを画像中に収め、相対的な大きさから粒度を得ることから、正確な石礫形状を記録するために河床に対して垂直に撮影する必要がある。この制約から、従来の研究では、いずれも専用機材を用いた方法を提案している^{4),7)}。しかし、機材の導入によって新たな制約も付加される。例えば、山地河川などの機材の搬入が困難な場所や調査に機動性が要求される場合に、機動性が特長である写真法のメリットが活かしきれないことなどが考えられる。そこで、筆者らは河床面への垂直な撮影を不要とした、デジタルの斜め画像による画像処理法を提案している⁸⁾。これは、斜めに撮影された画像は奥行き方向に小さく写るため、透視投影変換と呼ばれる画像処理によって擬似的な正対画像に変形して粒度を求める方法である。しかし、この透視投影変換によって発生する歪みが新たな問題となることが指摘されている。そこで、本研究はこの歪みが発生する機構を調べ、小球を用いた室内実験、石礫を用いた現地実験において、透視投影変

図-1 撮影装置の概要.

表-1 カメラの仕様と撮影時の設定.

項目	内容
カメラ	PENTAX K20D, 15 mm F4 ED AL
ストロボ発光	あり
画像設定	JPEG&RAW, ★★★★★, Green mode
画像サイズ	4672 × 3104 pixel

換による歪みを求めた. そして, その歪みを補正することで斜め画像を用いた画像処理法の計測精度の向上を目指すものである.

2. 斜め画像の撮影と疑似正対画像の作成

撮影には室内実験, 現地実験ともに, 正確な撮影距離と角度を確保する目的で図-1 に示す装置を用いた. この装置は, 撮影距離を 1490 mm で固定したまま撮影角度を変更できる構造になっている. カメラは水平の梁に固定され, 撮影中心とコドラートの中心が一致するように調節されている. また, USB ケーブルによってカメラと PC が接続されており, 付属ソフトからシャッターの操作が行われる. このときのカメラの仕様と撮影設定を表-1 に示す. なお, 実験には焦点距離のずれを防止する目的で単焦点レンズを用いている.

斜め画像はレンズ歪みを除去された後, 透視投影変換によって疑似正対画像に変換される. 本研究において画像処理には OpenCV ライブラリを用いており, レンズ歪みの除去には cvCalibrateCamera2 関数, cvUndistort2 関数を用い, 透視投影変換には cvWarpPerspective 関数を用いて, コドラート領域を指定することで疑似正対画像を作成している.

3. 斜め画像の石礫輪郭の歪み機構とそのモデル化

調査効率が高い画像処理による粒度分布調査を更に簡便にするために, 河床の斜め画像を透視投影変換して得られた疑似正対画像を用いる方法⁸⁾が提案されて

図-2 撮影箇所の同位置における撮影俯角の違いによる透視投影変換後の歪み.

図-3 縦歪みおよび横歪みの発生モデル.

いる. しかし, 変換基準面であるコドラートと高さが異なる物体が存在した場合, その物体の形状は透視投影変換によって図-2 のように歪み, 本来の形状が得られないという問題がある. ここでは, 平面上に配置された球を撮影し, その画像を平面を基準として透視投影変換した場合に生じる球の輪郭の歪み発生の仕組みについて調べ, 後に歪みを補正する係数として利用する.

(1) 歪みモデル

図-3 は, 平面上に石礫に見立てた半径 r の球を配置し, 視点 E から球を俯角 θ で見下ろして撮影している様子をモデル化したものである. 透視投影変換によって生じる歪みには画面奥行き方向への縦歪みと, 画面横方向への横歪みがある. まず, 縦歪みの仕組みとして, 画像処理では, 石礫の輪郭はカメラ視点 E から石礫輪郭 A, B に接して基準面と交わる点 A', B' に投影される. このため, 直径 $d(=2r)$ である球がみかけで d_v の長さとして復元される. 横歪みも同様に, 平面上の球を上から見た状態で, E' から石礫輪郭接点 $\tilde{G}, \bar{G}$ に接し, 基準面と交わる点 $\tilde{A}, \bar{A}$ に投影される. 一方, カメラに近い輪郭は B' で平面と交わるため, 横方向の長さは $\tilde{B}\bar{B}$ となり, 球が外接する台形 $\tilde{B}\bar{B}\bar{A}\bar{A}$ の領域に変換される. このときの横歪みは $d'_h = (2d'_{h1} + 2d'_{h2})/2$, すなわち, $d'_{h1} + d'_{h2}$ となって, 縦横の歪みを考慮した真の球

図-4 歪みモデルによる理論式から導かれた面積歪み率 $C_{d''}$ の分布。

の面積に対する面積歪み率 $C_{d''}$ は、 $C_{d''} = d'_v d'_h / d^2$ として表される。歪みを求めるために必要な情報は、カメラ E から石礫接地点 C' への俯角 $\angle EC'E' (= \theta')$ と撮影距離 $EC' (= R)$ 、および、石礫の半径 r である。このときの θ', R は、石礫接地点～カメラ平面位置距離 $C'E'$ 、撮影高さ EE' から求めることも可能である。これらを用いて、以下の手順でそれぞれの辺長、角度を求める。

$$\begin{aligned} CF &= C'E' \\ &= R \cos \theta' \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} EF &= EE' - FE' \\ &= R \sin \theta' - r \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} EC &= \sqrt{EF^2 + CF^2} \\ &= \sqrt{(R \sin \theta' - r)^2 + (R \cos \theta')^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$EB = \sqrt{R^2 - 2rR \sin \theta'} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctan(CB/EB) \\ &= \arctan(r / \sqrt{R^2 - 2rR \sin \theta'}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \arctan(CF/EF) \\ &= \arctan(R \cos \theta' / (R \sin \theta' - r)) \end{aligned} \quad (6)$$

縦歪み d'_v は、 $\beta = \gamma - \alpha$ 、 $\delta = \gamma + \alpha$ を用いて、

$$d'_v = (EE') \cdot \tan \delta - (EE') \cdot \tan \beta \quad (7)$$

$$= R \sin \theta' \cdot (\tan \delta - \tan \beta) \quad (8)$$

となる。横歪み d'_h については、

$$\begin{aligned} d'_{h1} &= (E'B') \cdot \tan \alpha' \\ &= R \sin \theta' \cdot \tan \beta \cdot \tan \alpha' \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} d'_{h2} &= (E'A') \cdot \tan \alpha' \\ &= R \sin \theta' \cdot \tan \delta \cdot \tan \alpha' \end{aligned} \quad (10)$$

$$d'_h = \frac{2d'_{h1} + 2d'_{h2}}{2} = d'_{h1} + d'_{h2} \quad (11)$$

$$= (\tan \delta + \tan \beta) \cdot R \sin \theta' \cdot \tan \alpha' \quad (12)$$

となり、縦横方向の歪みを考慮した面積歪み $d'' (= d'_v \cdot d'_h)$ が求まり、面積歪み率は $C_{d''} = d'_v \cdot d'_h / d^2$ として表される。

(2) 理論式による歪み分布

理論式から求めた歪み分布を図-4 に示す。計算条件は、撮影距離 $R = 1490$ mm、球の直径 $d = 40$ mm であり、コドラート中心の球に対する俯角 $\theta = 90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ の4ケースである。 $\theta = 90^\circ$ では、画像中央の直上にカメラが位置することから、面積歪み率 $C_{d''}$ が極小となる画面中央から同心円状に歪み分布が広がっている。ただし、このモデルでは $\beta \leq 0$ では成り立たず、カメラ直下で $C_{d''}$ が発散してしまうため、便宜的に $\beta > 0$ の結果をその領域に与えている。 $\theta = 75^\circ$ では、カメラの移動に伴い同心円分布も移動していることがわかる。 $\theta = 60^\circ, \theta = 45^\circ$ では $C_{d''}$ の極小部分は画像から消え、同心円分布の曲率が小さくなるとともに $C_{d''}$ 値の縦方向変化が大きくなっていることがわかる。

4. 小球を用いた室内実験による歪み補正の検証

(1) 室内実験の概要

黒い板の上の $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ 領域に直径 40 mm の小球を 0.1 m 間隔で 121 個配置し、俯角 $\theta = 90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ の4ケースで撮影した。元画像と擬似正対画像を図-5(a~d, $a' \sim d'$) に示す。次に、透視投影変換によって歪んだ小球の面積を求めるために画像変形後の石礫境界を検出する。ここでは、境界検出の `cvFindContours` 関数を用いた AGS(Automated Grain Sizing: 自動粒度分布調査) によって座標を得た⁹⁾。なお、この関数は前処理として、画像内の輝度値を閾値によって白黒画像に変換する二値化処理が要求される。二値化処理には `cvThreshold` 関数を用いている。また、この境界検出関数は白と黒の境界の白側のピクセル座標を輪郭として出力することから、真の境界の1ピクセル内側が出力される。そのため、ここでは輪郭出力から得た直径に2ピクセルを便宜的に加えている。

(2) 室内実験と歪みモデルの歪み分布の比較

このようにして決定された輪郭座標から面積を求めて得られた歪み分布が図-5($\hat{a} \sim \hat{d}$) である。歪みは、 $\theta = 90^\circ$ のときカメラ直下である画像中心から同心円状に分布しており、俯角が小さくなるにつれて同心円状分布

図-5 小球体元画像 (a, b, c, d), 擬似正対画像 (a', b', c', d'), 及び, 小球実験から導かれた面積歪み率の分布 ($\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \hat{d}$).

図-6 カメラ直下地点からの距離による面積歪み率の変化.

図-7 小球体画像から得られた補正前後の個数分布.

表-2 歪み補正前後の平均粒径と標準偏差.

補正前			補正後		
degree	$\bar{d}$ (mm)	σ (mm)	degree	$\bar{d}$ (mm)	σ (mm)
45°	50.8	3.64	45°	40.8	0.232
60°	46.3	2.39	60°	41.5	0.174
75°	43.4	1.22	75°	41.0	0.128
90°	44.1	0.697	90°	42.5	0.204

が, 画像手前方向に移動し, 曲率の小さい弧が画像上方に向かって分布している. これは, 図-4 に示したモデルによって得た分布とほぼ同じ傾向が見られたが, $\theta = 90^\circ$ の分布傾向が若干異なっている. これは $\theta = 90^\circ$ の

画像が他のものと比べて若干不鮮明であったことが原因の一つであると考えられる. また, 本モデルが, 斜めからの投影を想定したものになっているため, 便宜的に $\beta > 0$ の結果を与えていることも影響していると考えられる. カメラ直下地点からの距離と面積歪み率の変化を示したものが図-6 である. 俯角の変化によって撮影中心以外の距離が変化し, その距離に応じて面積歪み率も変化していることがわかる. 輪郭面積から円換算粒径を求めて作成した個数分布, 歪み分布を補正值として用い歪みを除去した個数分布を図-7 に示す. 歪んだ小球が補正され, 真の直径である粒径 40 mm 付近に集中していることがわかる. このときの平均粒径 $\bar{d}$ と

図-8 河床元画像 (a, b, c, d), 擬似正対画像 (a', b', c', d'), 及び、石礫の輪郭抽出のための二値画像 (a'', b'', c'', d'') (二値画像内の数字は標本番号である)。

図-9 MGS による河床粒度分布。

標準偏差 σ は表-2 のようになっており、歪み率 $C_{d''}$ を補正係数として用いることが有効であると証明された。

5. 石礫を用いた現地実験による歪み補正の検証

室内実験と同様に石礫河床に対する現地実験を実施する。偏りがないよう調査領域内に分布した代表的な石礫標本 0~33 を抽出し、撮影俯角 θ に対する粒径の変化を調べた。現地河床の画像では、撮影俯角が小さくなると隣接する石礫同士が重なり、石礫の輪郭を正確に抽出できなくなるが、本検討では、重なって見えな

くなっている部分は無視し、画像に写っている石礫表面のみを取り扱っている。さらに、室内実験と異なり、石礫表面と輪郭との輝度差が小さく、AGS による自動処理が困難であることから、MGS (Manual Grain Sizing : 手動粒度分布調査) による境界検出を行った。元画像と擬似正対画像、及び、石礫の輪郭抽出のための二値画像を図-8、これらから求めた粒度分布を図-9 に示す。 θ によって粒度分布が大きく異なっていることがわかる。このとき、特徴的な変化が見られた石礫の面積の実測値と石礫を球と仮定したときの理論値、及び、補正值と θ との関係が図-10 である。標本 1 は、俯角が小さくなると実測値と理論値とで大きく差が見られる。これらをモデルによって得た歪み分布で補正すると、撮影俯角が小さくなるにつれて面積が右上がりだったものがほぼ直線の歪む前の石礫の面積に補正できた。ただし、俯角が小さくなるほど右下がりの傾向が見られ、実際よりも小さく補正されている。 $\theta = 75^\circ$ のとき、 $\theta = 90^\circ$ での面積比をとると約 5 %、粒径にすると約 2.2 % となる。同様に、 $\theta = 60^\circ$ で面積比約 17 %、粒径約 4.1 %、 $\theta = 45^\circ$ で面積比約 35 %、粒径約 5.9 % の誤差を含むこととなる。仮に誤差を粒径で 4 % 程度許容するのであれば、図-11 のように、1.2 m 四方のコドラートを高さ 1.5 m 地点 (E1) で撮影したときのコドラート中心への俯角は約 59° となる。さらに、撮影台などを用いて高

図-10 MGS による石礫面積の実測値と石礫を球と仮定したときの理論値、及び、補正値と俯角 θ との関係。

図-11 画像処理法に適した撮影条件。

さ 2.0 m 地点 (E2) で撮影したとすると、約 66° となり、本研究の結果から、斜め撮影による画像処理法によって、歪みを補正することで効率的、かつ、十分実務に利用できる精度の計測が可能となった。

6. おわりに

本研究で明らかになったことを以下に示す。

- 光学モデルによる歪み分布の理論式を構築し、面積歪み率 $C_{d'}$ の分布を求めた。さらに、透視投影変換によって歪んだ小球の擬似正対画像から AGS によって粒度分布を取得し、 $C_{d'}$ の理論値で補正することで、真の粒径に近い値を求めることができた。
- 歪み分布によって補正した現地河床では、俯角によっては歪みの影響や石礫同士が重なり合ったため、過大な補正が見られたが、許容する誤差から簡便で実務的な撮影方法を提案した。

- 斜め撮影による河床粒度分布調査の実用化に向けて処理方法や撮影方法を提案した。

謝辞：本研究は科学研究費（若手 (B)）「土砂流出ポテンシャルパワーを用いた小規模流域における土砂流出特性の評価」（課題番号 20452170）の成果の一部である。

参考文献

- 1) 福岡捷二，長田健吾，安部友則：石礫河川の河床安定に果たす石の役割，水工学論文集，第 52 巻，pp. 643-648，2008。
- 2) 河村三郎，小沢功一：山地河川における河床材料のサンプリング方法と粒度分布，土木学会誌，第 55 巻 12 号，pp. 53-58，1970。
- 3) 加藤茂弘，井上耕一郎，島津弘：線格子法を用いた河床堆積物の粒径分析法の再検討，人と自然，No. 7，pp. 33-41，1996。
- 4) 岡田拓也，小林範之，小久保英博，華房康憲，國友優，安部剛，吉田健志：画像解析による河床材料調査の可能性，河川技術に関する論文集，第 6 巻，pp. 351-356，2000。
- 5) 山崎憲人，寺沢直樹，福岡捷二：巨石を含む広い礫径分布を有する礫床河川における粒度分布調査手法，河川技術論文集，第 13 巻，pp. 141-146，2007。
- 6) 澤田豊明：土砂動態の観測・調査について (2)，立山カルデラ研究紀要，第 9 号，pp. 73-84，2008。
- 7) 内尾政人，中川一，澤田豊明，横山康二，上杉満昭，福田義徳：画像処理方式による礫床河川の粒度分布測定装置の開発，砂防学会誌，Vol. 58，No. 2，pp. 26-31，2005。
- 8) 安田真悟，大橋慶介，伊原一樹：河床粒度分布調査への画像処理技術の応用，H21 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp. 143-144，2010。
- 9) 大橋慶介，安田真悟，伊原一樹：OpenCV を用いた画像処理による河床粒度分布調査および石礫検出精度について，土木学会情報利用技術論文集，Vol.19，pp. 115-124，2010。

(2010.9.30 受付)