

スマートフォンを用いたLSPIV観測システムの開発

DEVELOPMENT OF LSPIV SYSTEM UTILIZING SMARTPHONE

椿 涼太¹・藤田一郎²・Kwonkyu Yu³・Marian Muste⁴
Ryota TSUBAKI, Ichiro FUJITA, Kwonkyu YU and Marian MUSTE

¹ 広島大学大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

² 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³ Department of Civil Engineering, Dong-eui University, Busan, Korea.

⁴ IHR-Hydroscience & Engineering, The University of Iowa, Iowa City, USA.

A mobile system for LSPIV (large-scale particle image velocimetry) measurement is developed. The system consists of commercially available smartphone device and LSPIV application software. The software utilizes a camera and other sensors embedded in the smartphone. The image captured by the camera is automatically ortho-rectified with support from positional information obtained by the sensors, then velocity distribution is estimated at every moment. The performance of the developed system is verified through a rotating image test. An acceptably small systematic error and substantial magnitude of instantaneous velocity error are confirmed, and countermeasure for this errors is pointed-out.

Key Words: LSPIV, smartphone, ortho-rectification.

1. はじめに

LSPIV (Large-scale particle image velocimetry)¹⁾は、非接触で河川表面流速分布を計測する手法であり、洪水時の河川の流速分布計測や、流量算定手法として利用されている^{2,3)}。また、室内での開水路実験の計測手法として利用される事例も少なくない^{例えば4)}。関連する技術として、実河川での流量計測に特化したSTIV (Space-time image velocimetry)の技術開発や検証も進みつつあり⁵⁾、河川管理における可視化計測手法の位置づけの再認識が進みつつある。

LSPIVやSTIVを実施し、定量的な結果を得るためには、画像上の座標を実空間での座標と対応させる必要がある。その対応付けには、写真測量で用いられて幾何補正とよばれる技術が用いられる。すなわち、実空間での座標が既知で、画像上で視認できる標定点を複数用いて、その位置関係から幾何補正に用いる座標変換式の同定を行う¹⁾³⁾。標定点の配置が不適切であったり、標定点の計測精度に不備があったりすると、その影響はLSPIVの計測結果におよび、結果として計測精度の低下をもたらすことになる。また、座標間の関係の同定において、収束計算のための適切な初期条件の設定や、収束計算方法

の調整が必要になる場合がある。幾何補正の精度を確保するためには、このようにいくつかの注意点があり、その対処法に習熟する必要があることが、LSPIVやSTIVを計測ツールとして利用し始める際の障害の一つとなっている⁶⁾。また、突発的な洪水観測の計測に際しては、事前に標定点を適切な配置で計測域の周辺に展開し、測量を行うこと⁷⁾が、事実上困難である場合も少なくない。

ところで、今日の比較的高機能なスマートフォンは、パーソナルコンピュータに準ずる汎用的なデータ処理機能と高い操作性をもっている。さらに、無線でのインターネット接続や、カメラや位置センサーなどの多数の計測デバイスを備えている。このようなスマートフォンの特長を生かし、河川環境計測の情報プラットフォーム^{例えば8)}や、流量計測ツール^{例えば9),10)}としてのスマートフォンの利用が進みつつある。観測での利用において、スマートフォンに内蔵された各種センサーを利用することで、観測の効率化・高度化・自動化などの付加価値を生むことが一つのポイントとなっている⁸⁾。

このような技術動向のもと、本研究では、LSPIVの実施ツールとしてスマートフォンを利用する。従来のLSPIV計測で課題となる幾何補正の煩雑さを、スマートフォンに内蔵されたカメラとセンサーを一体的に利用することで解消し、一台のスマートフォンをプラット

フォームとしたリアルタイム観測機能をもつシステムを構築する。

2. 観測システムの開発

(1) 利用するスマートフォンデバイス

本研究では、iPhoneをLSPIV実施のためのハードウェアとして利用する。これはiPhoneシリーズが、他のAndroidに代表されるスマートフォンと比較すると、モデルの数が相対的に少なく、計測機材としての性能をモデルごとに絞り込むことが可能なため計測機器として適すると判断した結果である。本研究では、iPhone 5sとiPhone 6 plusという二つのモデルを利用する。これらのモデルでは、位置・姿勢センサーとしてGPS、加速度センサー、ジャイロ、コンパスが内蔵されている。これらのセンサーの情報はMotion coprocessorという処理系において時々刻々と統合的に処理されて、デバイスの姿勢や動きが推定される。本研究では、推定された姿勢や方位の情報を利用することで、標定点を用いずに幾何補正を行う。なお、iPhone 6シリーズでは、上記のセンサーの他に気圧計が内蔵されており、相対的な標高の時間変化の検出に利用されているが、幾何補正で必要となる絶対的な標高の精度確保への展開については、現在では実装されていないようである。

(2) ソフトウェアの開発環境

可視化計測用ソフトウェアは、著者らがこれまで開発してきた、Delphi言語で記述されWindows OS用のLSPIVソフトウェアパッケージのコードを利用した。Embarcadero社により発売されている開発環境であるDelphi XEシリーズは、開発環境の本体はWindows OS上で実行するが、iPhoneで利用されるiOS上で実行可能なアプリケーションソフト（アプリ）を生成することが可能である。Delphi XEを利用してiOSアプリを実行するためには、図-1に示すように、Delphi XEを実行しているWindows PCと、MacOS上で起動したPAServerというリモート開発用のサーバーを介してiPhone実機にアプリを送り込むことになる。アプリの生成に際しては、MacOSの開発環境であるXCODEの支援も必要となる。このように機器・ソフトウェアの構成が複雑であり、それぞれのソフトウェアやOSのバージョンの相性により、iPhone実機でのアプリの実行に支障がでる場合もみられた。また、Delphiシリーズのこれまでの特徴は迅速なコンパイルと比較的速い実行速度であったが、iOSアプリの作成については、開発環境の構成が複雑なこともあり、実行までにやや時間がかかり、またWindows PCでの同様なコードの実行に比べると、デバイスの処理能力の制約もあり実行速度も比較的低下する。

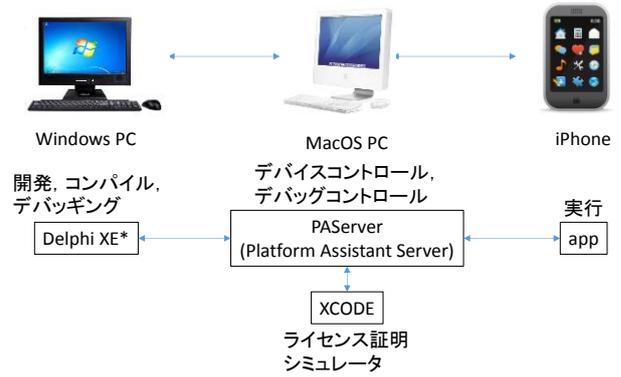


図-1 開発環境に用いた機器とソフトウェアの構成図。

(3) 幾何補正

幾何補正には、著者らがこれまで利用してきた¹¹⁾以下のカメラモデルを用いる。

$$\begin{aligned} x &= -c \frac{a_{11}(X-X_0) + a_{12}(Y-Y_0) + a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + \delta_x, \\ y &= -c \frac{a_{21}(X-X_0) + a_{22}(Y-Y_0) + a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + \delta_y \end{aligned} \quad (1)$$

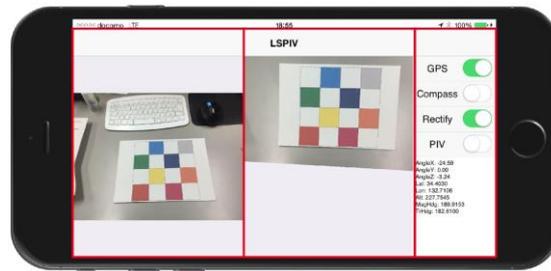
ここに、 (x, y) : 画像上の座標、 (X, Y, Z) : 実空間での座標、 (X_0, Y_0, Z_0) : カメラの投影中心、 c : 焦点距離、 a_{**} : 変換係数であり、以下の回転行列の積により定まる。

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここに、 (ω, ϕ, κ) : 撮影方向の角度である。式(1)に含まれる (δ_x, δ_y) は、ピンホールモデルと実際の光学系の差であり、レンズひずみと称される。ここでは、基本的なひずみモデルである、

$$\begin{aligned} \delta_x &= d r^2 x \\ \delta_y &= d r^2 y \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \quad (3)$$

を用いた。係数 c および d は、光学系により定まる係数であり内部標定要素とよばれ、そのほかの撮影時の位置や姿勢などにかかわる外部標定要素と区別される。本研究では、内部標定要素は事前の室内でのキャリブレーション



カメラ画像 幾何補正画像 操作パネル

図-2 開発したアプリのGUI.

ンにより同定し、外部標定要素をスマートフォンに内蔵されたセンサー情報をもとに決定していくことで、標定点を利用しない幾何補正を実現する。

(4) PIV (Particle Image Velocimetry)

基本的なPIV手法である相互相関法を用いる。この方法では、基準となる時刻の画像上に配置された一定サイズのテンプレート (i, j) 内の輝度の分布と、次の時刻の画像における探査領域 $(i+x, j+y)$ 内の輝度分布との類似度を、相関係数

$$R_{x,y} = \frac{\sum_i \sum_j (I_{i,j} - \bar{I})(I'_{i+x,j+y} - \bar{I}')}{\sqrt{\sum_i \sum_j (I_{i,j} - \bar{I})^2} \sqrt{\sum_i \sum_j (I'_{i+x,j+y} - \bar{I}')^2}} \quad (3)$$

により算定する。この相関係数の最も高い位置 $(i+x, j+y)$ に、基準時刻での (i, j) のパターンが移動したと仮定し、画像間の経過時間からパターンの移動速度ベクトルを算定する。

(5) GUI (Graphical User Interface)

一般的にスマートフォンのカメラで取得される画像は縦横の幅が一定ではない。河川流をLSPIVで計測する場合、河岸から水面を撮影することが多く、水面を幅広く画像上でとらえるうえでは、画像の長辺を水平方向に、短辺を鉛直方向にとることが有利である。したがって、本研究では画像の長辺を水平方向に利用することとし、スマートフォンのデバイス自体も長辺が横向きとなる方向でGUIを設計した。具体的には、図-2に示すように、スクリーンを三分割し、カメラの撮影画像のプレビュー領域、幾何補正とPIV結果を表示する領域、操作や情報表示のためのツールボックスに区分した。

2. 実証試験

(1) 方法

図-2のスクリーン上に見える、平面上の4×4のブロック(一辺5 cm)の画像の25個の交点を用いて、内部標定

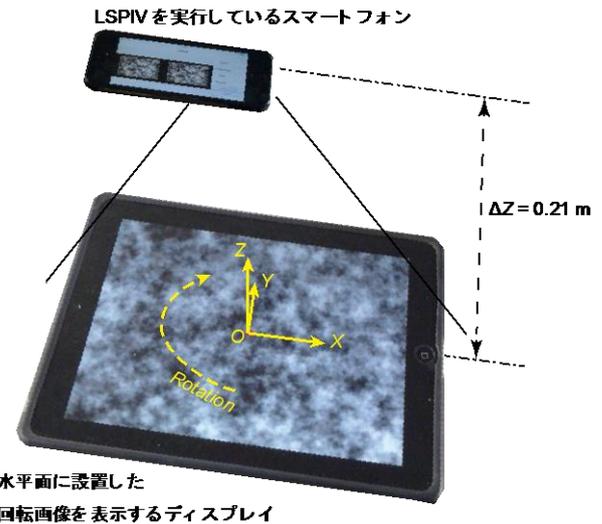


図-3 測定試験の実施方法.

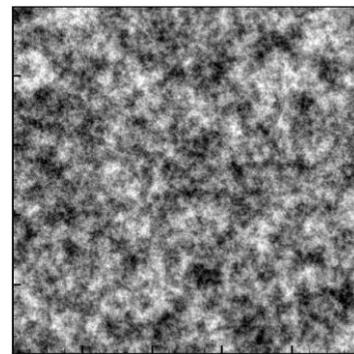


図-4 測定試験に用いたグレースケールのフラクタルパターン¹²⁾.

要素の同定を行った。本研究でLSPIV解析に利用する画像は、プレビュー用の中解像度のものであり、iPhone 5sは852×640ピクセル、iPhone 6 plusは1440×1080ピクセルの大きさである。次に、同定された内部標定要素を利用して、図-3に示すように、水平面上で回転するパターンの映像を用い、その映像の上部に設置したスマートフォンでLSPIVを実行した。パターンの回転は一回転90秒の一定速度で行い、PIVに適した複雑さを持ったパターンとして図-4に示すフラクタル模様¹²⁾を利用した。現在の機器構成では、デバイスの絶対的な標高の算定精度が

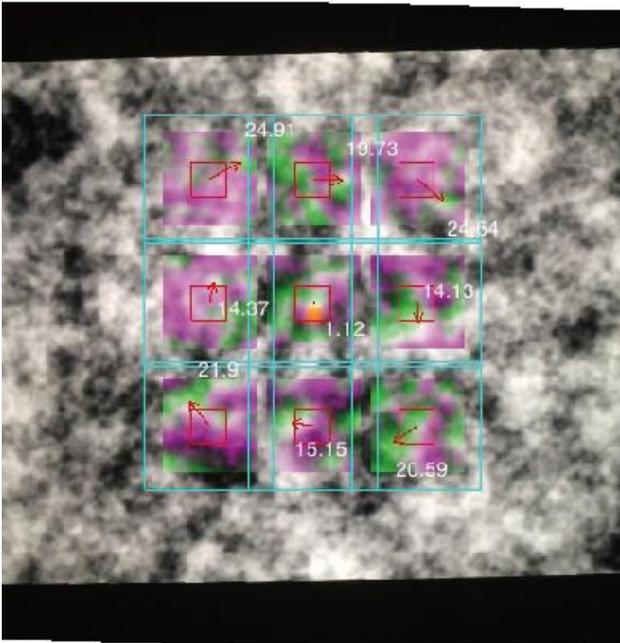


図-5 回転画像を対象にLSPIVを実行しているスマートフォンのスクリーンショットの例（赤枠はテンプレート、青枠は探査領域、赤矢印は流速を表す。）

メートルオーダー以上あり、外部情報なしで、撮影機材と計測対象面の高さの差を、室内実験で必要となるcm程度以下の精度で計測することはできない。本試験でも撮影機材と計測対象面の高さの差は与えず解析を行った。結果として得られた流速分布の空間スケールは不定であり、ここでは、試験結果をパターン回転速度という時間スケールのみで規定される情報で分析していく。

流速分布は 24×24 ピクセルをテンプレートサイズとし、上下左右に32ピクセルずつ探査して、もっとも相関係数の高い位置関係をもとに速度分布を算出した。相関係数が小さいサンプルや、テンプレート内の輝度分布が平坦なサンプルなどの除去は行わず、すべての計測値を分析対象とした。

(2) 結果

図-5に計測途中のデバイスのプレビュー画像を示す。幾何補正された画像上に計測された流速分布が合成表示され、画像と速度の対応関係を視覚的に確認できるようになっている。

図-6に測定試験の結果を $x-v$ および $y-u$ プロットとして示す。回転パターンの移動では、回転中心からの距離と、円周方向の速度成分が角速度で規定されるため、図-6に示した近似曲線から測定システムの誤差を算定することができる。またパターンは一定速度で回転しているため、速度のばらつきは、計測のランダム誤差に対応する。本試験では $\omega = 0.0785 \text{ rad/s}$ であり、図-6に示す近似曲線の傾きと比較すると、計測値の角速度は2~4%ほど過小評

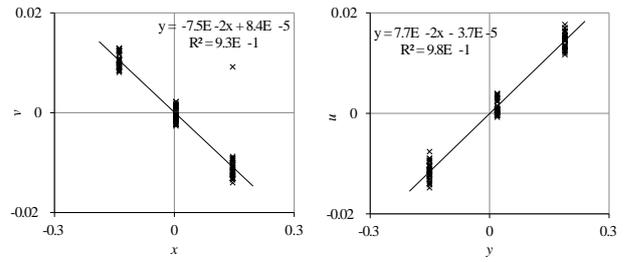


図-6 測定試験により得られた $x-v$ (左) および $y-u$ (右) プロット。

価していることがわかる。また、近似曲線からの値のばらつきを標準偏差として算定すると、速度オーダーの20%程度の大きさであった。本システムで用いたPIVアルゴリズム自体のランダム誤差はこの1/5程度の大きさであることから、速度のばらつきは、幾何補正に起因することが示唆される。具体的には、スマートフォン自体により算定されるデバイスの角度の推定値に含まれるシステム誤差およびランダム誤差による影響が大きいものと考えている。対処方法としては、事前キャリブレーションによるシステム誤差の補正と、時系列データの統計的処理によるランダム誤差の軽減が効果的と考えられる。

4. おわりに

スマートフォンをプラットフォームとしたLSPIV観測システムの開発を行った。水面との標高差をのぞく幾何補正作業がスマートフォンに内蔵されたカメラとセンサーシステムの情報を一体的に利用することで自動化された。構築された観測システムを用いて、回転パターンを用いた精度検証試験を実施した。その結果、観測システムにより得られた流速分布には3%程度のシステム誤差と、より顕著なランダム誤差が確認され、デバイス角度の推定誤差に起因することが示唆された。

今後、デバイス角度の推定誤差の定量評価と、誤差の軽減手法の開発を進める予定である。また、より実際的な検証試験を行っていくことで洪水観測への適用性や精度の確認を行っていく必要がある。現状では、解析速度が遅く、ソフトウェアのチューニングにより高速化も進める予定である。また、複数デバイスを用いた多点同時観測の実現による、データ補完や精度向上も進めていく所存である。

謝辞：本研究の一部は、河川整備基金、一般財団法人国土技術研究センターの研究開発助成（平成25年度）、科学研究費補助金による助成のもとに遂行されました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A.: Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 397-414, 1998.
- 2) Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A.: Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, Vol. 44, W00D19, 2008.
- 3) Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B. and Hauet, A.: Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves, *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 5, pp. 301-312, 2011.
- 4) Kantoush, S. A., Schleiss, A. J., Sumi, T., and Murasaki, M.: LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases, *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 5, pp. 263-276, 2011.
- 5) 藤田一郎, 原 浩気, 萬矢 敦啓: 河川モニタリング動画を用いた非接触型流量計測法の精度検証と準リアルタイム計測システムの構築, *土木学会論文集B1 (水工学)*, Vol.67, No.4, p. I_1177-I_1182, 2011.
- 6) 藤田一郎: 映像を活用した河川流速・流量の非接触画像計測の進展, *河川流量観測の新時代*, Vol. 4, pp. i-iii, 2014.
- 7) 椿 涼太, 藤田一郎, 眞間修一, 竹村仁志, 金原健一: 既設ビデオカメラを用いた画像解析法による中小河川の流量観測のためのカメラ設定方法および解析方法に関する研究, *土木学会河川技術論文集*, Vol. 15, pp. 501-506, 2009.
- 8) Camp, R. J. and Wheaton, J. M.: Streamlining field data collection with mobile apps, *EOS*, Vol. 95, No. 49, pp. 453-454, 2014.
- 9) Lüthi, B., Philippe, T., and Peña-Haro, S.: Mobile device app for small open-channel flow Measurement, 7th Intl. Congress on Environmental Modelling and Software, San Diego, CA, USA. 2014.
- 10) Yu, K. and Cho, W.: Real-time surface image velocimeter using a smartphone, 19th IAHR-APD Congress, Hanoi, Vietnam, 2014.
- 11) Tsubaki, R. and Fujita, I.: Stereoscopic measurement of a fluctuating free surface with discontinuities, *Measurement Science and Technology*, Vol. 16, pp. 1-9, 2005.
- 12) Tsubaki, R. and Kawawhara, Y.: The uncertainty of local flow parameters during inundation flow over complex topographies with elevation errors, *Journal of Hydrology*, Vol. 486, pp. 71-87, 2013.

(2015. 2. 13受付)