

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06234

研究課題名(和文) マルチコプターから撮影された情報の知的画像解析による河川現地計測の新展開

研究課題名(英文) Novel extensions of river flow measurements with images captured from a multi-copter using intelligent image analysis methods

研究代表者

藤田 一郎 (Ichiro, FUJITA)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：10127392

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではマルチコプターから撮影した情報を高度なレベルで利用可能とするソフトウェアを開発し、河川の広範囲に渡る土砂環境および流況調査を行った。土砂環境調査では揖保川中流域の湾曲部で空中写真から砂州の堆砂形状を2013年と2015年の結果比較から求め、砂州表面の粒度分布の空間変化を画像処理手法によって求めた。河川表面流の流況に関しては信濃川を対象とし、特徴点抽出の最新アルゴリズムを用いたブレ補正プログラムを開発し、STIVの適用により十分な精度で流速分布や流量を推算できることを示した。STIVを発展させたSTVVも開発し、900m区間の流況把握に成功するなど河川計測技術の新展開を実現させた。

研究成果の概要(英文)：We developed a sophisticated software that enables us to use information taken from a multicopter. In sediment environment survey, topographical change of a bar at a bend of the Ibo River between 2013 and 2015 was investigated using aerial photographs. In addition, spatial change of the particle size distribution at the bar was obtained successfully by image processing technique. Regarding the flow condition of the river surface flow, we developed an image stabilization program utilizing the latest algorithm for feature point detection, and showed that flow velocity distribution and flow rate can be estimated with sufficient accuracy by applying STIV. We also developed STVV that is an extension of STIV, which enables us to measure surface velocity distribution of a river reach of about 900m by simply taking aerial movies. Thus, we succeeded in developing a new technology for field measurements of a river.

研究分野：河川工学

キーワード：洪水流観測 粒度分布計測 知的画像処理 STIV STVV マルチコプター ドローン

1. 研究開始当初の背景

(1)研究開始時の平成27年(2015)当時は、無線操縦の小型無人機の性能が急激に改善され始めた頃に一致しており、その名称も羽根の数に応じてクアッドコプターやマルチコプターとつけられていたため、研究課題にもその名称を用いたが、現在ではドローンやUAV(Unmanned Aerial Vehicle)と呼ばれることの方が一般的になってきた。すなわち、この数年の間で呼称が変わるくらい、新たな技術革新による空中撮影装置が登場し、広く認知されるようになったと言ってよい。従来の無人機との違いは、価格が格段に低価格化したにも関わらず、飛行の安定性やバッテリーの寿命が増し、撮影装置として小型化した4Kビデオを使えるようになった点などである。都市部や住宅域での操縦に関して指定区域が設けられ、無人機使用が許可制となったのも研究期間内のことであった。

(2)本研究の現地観測における対象は、河川の土砂環境と流況であったが、土砂環境調査にマルチコプターを使った例はあまりなく、河川地形や粒度分布を計測するには人力を介するものが大部分であった。現在では、河川を含めた地形計測は SfM という呼称でまとめられるようになったが、本研究開始時は普及前の段階であった。河川表面の粒度分布については本研究で初めて紹介した海外ソフトウェアが、これをきっかけとして国内で利用されるようになった。

(3)一方の流況の観測に関しては、近年の洪水災害の頻発や、従来型の洪水流量計測手法である浮子法の問題点が顕在化する中、流量計測の高度化という命題で安全に観測を行える非接触型流量観測手法が注目されるようになってきた。その結果、平成29年度に改訂された水文観測業務規程では画像計測などの非接触計測法が記載されるに至った。本研究では、そのような背景の中、マルチコプターを使った新たな河川流の計測手法を提示したが、このような試みは国内・国外を通じて初の試みであった。

2. 研究の目的

(1)本研究では、無線操縦のマルチコプターから撮影した静止画像やビデオ画像を高度利用可能なソフトウェアを開発し、河川の広範囲に渡る環境および流況の調査を行うことを目的とする。対象は、河川植生群と河床材料の空間分布、および自然トレーサを用いた河川表面流況である。前者については洪水前後の詳細な画像計測調査から、移動床の状態変化による影響を調べる。後者については高精度なブレ補正アルゴリズムを開発し、ビデオ画像解析によって河川表面の二次元流速分布を広範囲に計測可能なシステムを構築する。これらの画像計測システムの導入によって、従来、困難であった河川の現地観

測を効率的にかつ高精度に実施することが可能となる。

3. 研究の方法

(1)本研究では、河川の様々な現地計測にマルチコプターを有効利用するための手法について検討を行う。土砂環境の現地調査のサイトとして選んだのは、揖保川上流域における湾曲部である。この地点では湾曲部内岸に砂州が形成され、出水ごとに植生分布や粒度分布が変化することが知られている。この地点において、出水前後の各分布をマルチコプターから撮影した静止画像を用いて地形データを画像解析により求める。この場合に使用するマルチコプターとしては、備品で購入した入門的な普及機と、測量業者に撮影を依頼するプロ仕様に改良された高級機の二通りとし、上空30~50mの高度から50%以上オーバーラップした撮影画像を解析に用いた。このような画像による地形計測を出水の前後で実施し、堆積や洗掘の発生領域の空間分布を把握した。

(2)粒度分布については、画像解析から得られるのは砂州表面のアーサーコートに相当する表層のみの粒度分布であるため、深さ方向の粒子の充填率を考慮した新たな粒度分布の算出法について検討する。表層粒子の画像解析には、スイス連邦工科大チューリッヒ校(ETH)で開発されたフリーソフトウェアを用いるが、検出できる最小粒子は画像の解像度に依存するため、撮影高度を変化させた画像を取得し、広範囲の粒度分布を取得できるようにした。ホバリング撮影を繰り返しながら、砂州全域をカバーし、各アングルで平均粒径などを求めてその空間分布を得た。

(3)河川表面流速の分布を求める画像解析手法としては、LSPIV(Large Scale particle Image Velocimetry)やSTIV(Space Time Image Velocimetry)が知られているが、これらは河岸などの固定点からの斜め撮影画像に対する手法であるため、マルチコプターのようなブレが多く含まれるような画像にはそのままでは使えない。マルチコプターのブレを補正するには、水面以外の場所の不動(固定)点が連続する画像において同じ画像座標にとどまるように瞬間々々の画像を補正する必要がある。この不動点の自動検出に、知的画像処理と呼ばれている手法を導入する。具体的には、まず、RIPOC法と呼ばれるパターン移動の検出手法でブレを含んだ2枚の連続画像の変形量を計測し、SIFTあるいはSURFと呼ばれる特徴点検出アルゴリズムで、各画像の特徴点を検出する。従来の手法であるAerial LSPIVでは、ほとんど人間の判断で特徴点の検出を行っていたため、特徴点の検出個数には限りがあったが、これらの手法では自動的に数百点以上の特徴点を検



(a) 平水時



(b) 2013年9月4日のピーク流量時

図-1 揖保川における流況の違い

出できるために、計測の自動化を行いやすい。RIPOC による画像の大雑把な変形量と特徴点検出の組合せにより、連続画像間で対応する有意な特徴点ペアを求めることができれば、その情報を用いて2枚目の画像を1枚目の画像に重ね合わせるができるようになるはずである。本研究では、これら一連のマッチングと画像補正を自動化するソフトウェアを開発した。以上の成果は、揖保川における平水時と洪水時の流れの現地計測で得られる空中ビデオ画像に適用し、およそ 400m 区間の河道における表面流速分布を画像計測から求めた。

(4) 本研究では当初予定していた流れの画像解析アルゴリズムの開発に加えて、安定的に流速解析を行うことのできる手法の開発も追加的に行った。一つは、QUESTA と名付けた手法であり、従来の輝度勾配テンソル法より頑健性に優れており、計測精度に関するパラメータも提案した。もう一つは、面的な流速ベクトルの計測が可能となる手法である STVV (Space-Time Volume Velocimetry) である。この手法では、STIV が主流方向に設定した検査線上の一方向流速しか計測できなかったのに対し、検査体積を設定してそこに含まれる 3次元的な輝度分布の情報から表面流速の二次元ベクトルを算出することができた。開発した種々の手法は、信濃川の基準点である旭橋地点周辺での融雪洪水の観測に適用した。

4. 研究成果

(1) 揖保川中流域を対象とした研究成果を以下に記す。図-1 は、対象とした場所の平水時と洪水時の様子である。右岸側にある砂州の部分が洪水時には完全に水没していることがわかる。平水時には、この砂州の形状と粒度分布を連続する静止画像から求め、洪水

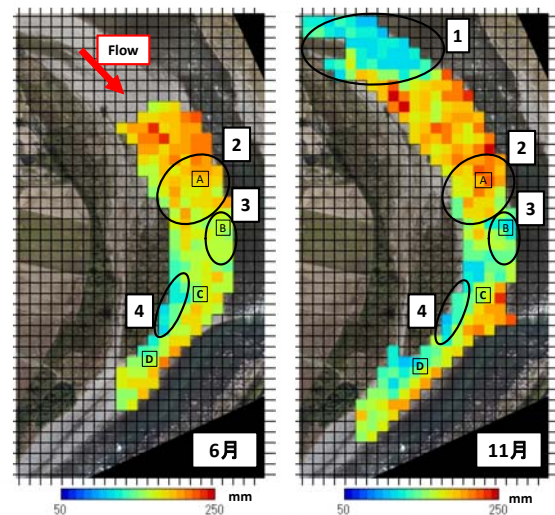


図-2 平均粒径の空間分布の変化

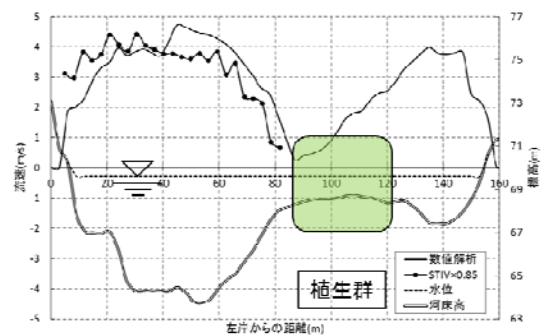


図-3 流速分布の比較

時には画像計測手法 STIV により表面流速分布を求めた。

砂州表面の平均粒径の空間分布を洪水前後で比較したのが図-2 である。ここでは、対象域を約 10m のメッシュに区切り、各メッシュ内で求めた平均粒径を示している。解析には前述のフリーソフト BASEGRAIN を使用した。これより、平均粒径は A 地点付近では増加したのに対し、B 地点では減少し、C~D 地点では帯状に細砂が堆砂するなど、洪水中に大規模な河床変動があり、洪水後には明らかに複雑な粒度分布を呈することが明らかとなった。通常の粒度分布計測は、現地での測量作業を含めた人力に頼る部分が大いため、図-2 のような粒度の分布を得ることは不可能に近いが、マルチコプターを有効使用した画像解析により、比較的容易に砂州上の分布変化を調べることができるようになった点が重要である。

(2) 揖保川における洪水流は、気象条件による制約からマルチコプターのフライトができなかったため、河岸から河川表面を斜め方向に撮影したビデオ映像から流速分布が得られる STIV を適用した。図に一つの横断面における流速分布を比較したが、STIV で得た流速分布は、平面二次元解析による流速分布

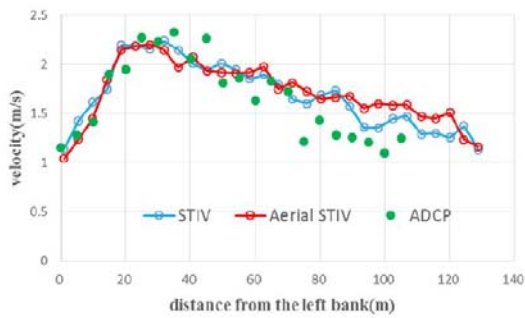


図-4 信濃川旭橋上流域における流速分布の比較

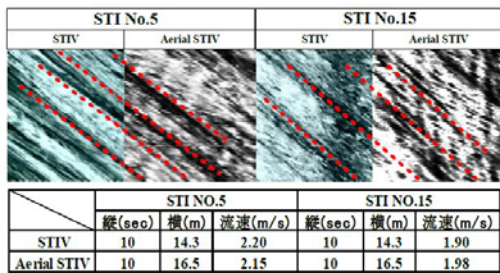


図-5 時空間画像の比較

の結果ともよく一致しており、数値解析の妥当性を確認できた。通常、河川流の数値解析では実測値の取得が困難なため、解析精度を検討することはほとんど行われていないが、STIV のように洪水時でも流速分布が得られ、実測値として提供できる画像解析手法の有用性をあらためて確認することができた。

(3) マルチコプターからの撮影動画を用いる河川表面流の計測手法を Aerial STIV と命名し、信濃川や魚野川（信濃川支川）において融雪洪水の観測に適用した。そのために必要なのは機体のブレを補正し、空中で静止した一点からの撮影結果となるような連番画像を取得することであるが、本研究では知的画像処理の手法として近年開発が進められている特徴点抽出の技術を活用した。具体的には、SIFT という特徴点抽出のアルゴリズムを用いた。これにより、各連番画像の特徴点抽出を行い、第 2 画像の背景が第 1 画像の背景に一致するように第 2 画像をホモグラフィ変換する。このとき、対応する特徴点は動きの含まれる水面域を除くようにマスキングし、2 つの画像間でマッチングする特徴点のペアのみを使うようにフィルターをかけて画像補正の高精度化を図った。このように、実河川計測に知的画像処理法を適用してブレ補正を行った例は国際的にも初めても試みである。

このような方法で、信濃川旭橋の上流域におけるある横断測線上の流速分布を比較したのが図-4 である。河岸設置のビデオ画像を用いて STIV により求めた結果、超音波流速

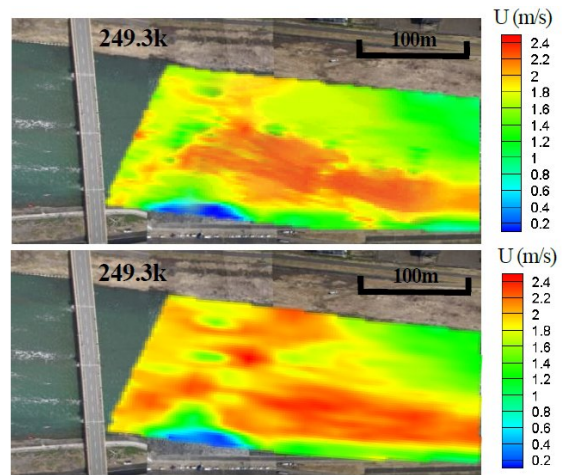


図-6 信濃川旭橋上流域における主流速の空間分布の比較；上：Aerial STIV, 下：ADCP

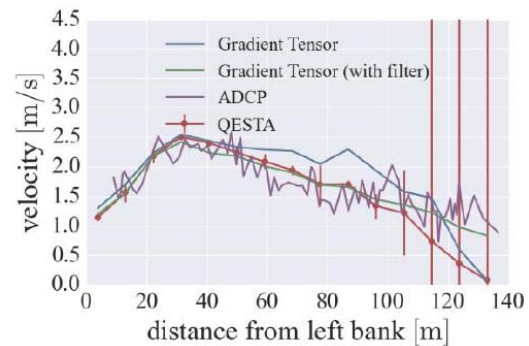


図-7 信濃川観測における流速分布の比較

計 (ADCP) による結果と合わせてプロットしているが、どの分布もよく一致している。図-5 には、河岸撮影と空中撮影による時空間画像 (STI) を比較したが、STI に現れるパターンは同じ傾きであり、勾配から求めた流速も良好に一致した。ADCP は水面より 30cm 程度水面下のデータの瞬間値であるためバラつきが大きいですが、他手法とほぼ一致した結果が得られているのは、水面のテクスチャーの移動速度が表面流速に対応していることを示しており、これはもう一つの重要なポイントである。なお、Aerial STIV では、15 秒間のデータを使っているが、これだけの短時間のデータでも ADCP に匹敵するデータを取得できた点も重要である。

(4) Aerial STIV による結果を平面的に比較するために、無線操縦のボートに搭載した ADCP をジグザグに航行させて得た表面流速との比較をしたのが図-6 である。表面流速が左岸側で高速になり、下流側で分布が広がる様子をどちらのプロットもよく表しており、空間的にも良好な流速分布が得られた。このようなデータは従来の手法では取得不可能であり、マルチコプターを使った計測法の優位性を示すことができた。

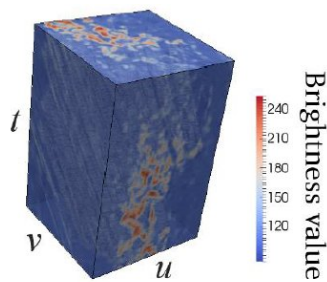


図-8 STV における時空間体積

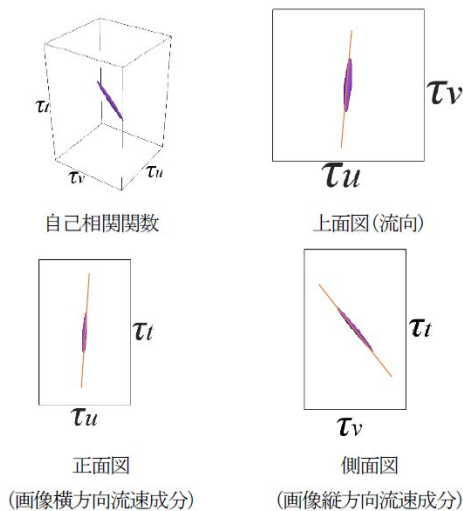


図-9 STV における速度成分の検出

(5) STIV 解析の新手法として開発したのが Q-ESTA である。この手法では、STI の二次元自己相関分布を求めた後に、対数極座標で表しそこに現れるパターン勾配を効率よく求めることができる。図-7 で従来手法や他手法と比較したが、全体的に良好な結果が得られた。

(6) 最後に開発したのが STVV であり、STIV が主観的に設定した主流方向（通常は川岸に平行）の成分のみを抽出するのに対し、二次元流速ベクトルを算出できる点が大きく異なる。解析に基本的な考え方は Q-ESTA と同様であるが、検査線ではなく検査体積を考えた点が異なる。図-8 に河川表面に設定した検査面上のテクスチャーを時間軸方向に積み上げて得た時空間体積 (STV) を示した。この体積に含まれる流れ情報を三次元の自己相関関数の分布で示したのが図-9 であり、これより流速の各成分が求まる。この手法を信濃川観測時のマルチコプターからの撮影動画に適用した結果の一例が図-10 である。図中の 23 は検査面の番号であり、局所的な流速ベクトルとともに全体的な流速ベクトル分布も示した。これより、橋脚の間を通過した洪水流が左右にふれながら流れていることがわ

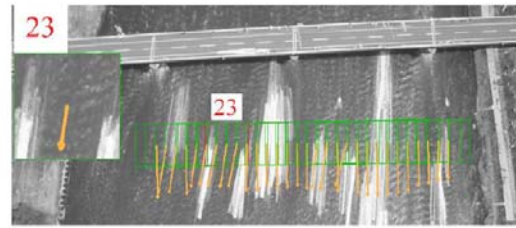


図-10 STVV の適用事例 (信濃川旭橋下流)

かる。

(7) 以上のように、本研究で得られた研究成果は多岐にわたっているが、基本的にはマルチコプター (ドローン) で撮影した静止画や動画を河川に関する様々な現地観測に適用するものである。静止画を用いた地形計測は今では広く普及しているが、研究開始時には河川計測への適用例はほとんどなく端緒的な試みであったと言える。粒度分布の画像解析はスイス工科大学の技術であるが、これを日本の若手研究者に紹介したのは研究代表者であり、現在では一般的に利用されるに至っている。

ビデオ画像を用いた河川流計測については、表面流速分布を効率的に求めることができる STIV や STVV といった手法を開発したが、国内・国外の研究者を通じて本研究で提示したような結果を得ている例はほとんどない。本研究で提示した手法は、非接触で安全にしかも安価に河川流の計測を行える点で他手法よりも優れていると言える。現在、流量観測に使われている浮子法や最新機器である ADCP などはその操作に少なからず人力が必要であり、常時観測はできない。電波流速計は常時観測可能であるが、一点の計測しかできない。これに対し、マルチコプターを使ったビデオ画像は広範囲に渡るデータ取得が容易であり、今後の技術革新を考えると自動的にフライトを繰り返して映像を取得し、自動に流速解析することも可能となるであろう。現在のドローンは雨風に弱いとされるが、この問題についても機器本体の性能が向上してくれば解消されるはずであり、実際に毎秒 10m の風に堪え得るドローンの開発も進められている。このような点で、本研究で提示した各手法は将来の河川現地観測を見越した先端的な試みであり、研究題目通りの「新展開」を実施できたものと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 20 件)

- ① 辻 一成, 谷 昂二郎, 藤田 一郎, 能登谷 祐一, UAV 空撮動画に STVV を適用した広域河川流況解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), 査読有, Vol. 74, No. 4, 2018, pp. I_811-I_816
- ② 土田宏一, 藤田一郎, 芳賀聖一, 亀岡雅史, 河上將尊, STIV 法とトレイルカメラによる低コスト流速観測手法, 河川技術論文集,

- 査読有, 第 23 卷, 2017, pp. 191-196
- ③近者敦彦, 松本敬之, 豊島靖, 村上悦生, 沼田慎吾, 平井克尚, 向和哉, 石田靖, 幾田正一郎, 藤田一郎, 兵庫県河川監視カメラを活用した STIV 解析 による洪水流量観測の可能性について, 河川技術論文集, 査読有, 第 23 卷, 2017, pp. 221-226
- ④Fujita, I., Discharge Measurements of Snowmelt Flood by Space-Time Image Velocimetry during the Night Using Far-Infrared Camera, Water, 査読有, 9(4), 2017, 269; DOI:10.3390/w9040269
- ⑤Fujita, I., Kitada, M., Shimono, M., Kitsuda, T., Yorozuya, A., & Motonaga, Y., Spatial Measurements of Snowmelt Flood by Image Analysis with Multiple-angle Images and Radio-controlled ADCP, Journal of JSCE, 査読有, 5(1), 2017, pp. 305-312
- ⑥能登谷祐一, 藤田一郎, 建口沙彩, 河川表面流画像計測 STIV における新手法と STI 画質評価法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol. 73, No. 4, 2017, pp. I_505-I_510
- ⑦能登谷祐一, 藤田一郎, 建口沙彩, 三次元検査空間を用いた河川表面流ベクトルの計測手法 STIV の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol. 73, No. 4, 2017, pp. I_511-I_516
- ⑧Fujita, I. et al., Accuracy of KU-STIV for discharge measurement in Ghana, Africa, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 査読有, Vol. 73, No. 4, 2017, pp. I_499-I_504
- ⑨Notoya, Y., Fujita, I. and Tateguchi, S., Development of efficient image stabilization algorithm for airborne video images and its application to river flow measurements, River Flow 2016 - Constantinescu, Garcia & Hanes (Eds) © 2016 Taylor & Francis Group, London, ISBN978-1-138-02913-2, 査読有, pp. 548-554, 2016.
- ⑩能登谷祐一, 藤田一郎, 建口沙彩: ナビゲーションモードに対応した空中撮影動画のブレ補正と洪水計測への適用, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol. 72, No. 4, 2016, pp. I_877-I_882
- ⑪藤田一郎, 能登谷祐一, 霜野 充: マルチコプターから撮影されたブレ動画の高精度補正に基づく Aerial STIV の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol. 71, No. 4, 2015, pp. I_829-I_834
- ⑫寺田康人, 藤田一郎, 浅見佳世, 渡辺 豊: UAV による撮影画像を用いた洪水前後の砂州上粒度分布の計測, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, Vol. 71, No. 4, 2015, pp. I_919-I_924

[学会発表] (計 15 件)

- ①Fujita, I., Notoya, Y. and Tateguchi, S., Efficient and accurate estimation of water surface velocity in STIV, 4th International Symposium of Shallow Flows, Eindhoven University Technology, 2017.
- ②Fujita, I., Deguchi, T., Doi, K., Ogino, D., Notoya, Y., and Tateguchi, S., Development of KU-STIV: software to measure surface velocity distribution and discharge from river surface images, Proceedings of the 37th IAHR World Congress, 2017.
- ③辻一成, 能登谷祐一, 藤田一郎, 三次元空間体積を用いた河川表面流解析手法の精度検証, 可視化情報シンポジウム, 2017
- ④能登谷祐一, 建口沙彩, 藤田一郎: ナビゲーションモードでドローン撮影された河川表面流映像の高性能ブレ補正アルゴリズム, 可視化情報シンポジウム, 2016

[図書] (計 1 件)

- ①Aberle, J., Rennie, C.D., Admiraal, D.M., Muste, M. (eds), 31 Contributing Authors: Fujita, I., Aberle, J., Aleixo, R., Bezzola, G.R., Brasington, J., Buchholz, J., et al., CRC Press, Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management: Vol.2, Instrumentation and Measurement Techniques, 2017, 408 (167-183)

[その他]

ホームページ等

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-c5labo/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 一郎 (FUJITA, Ichiro)

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 10127392