【研究成果報告時/報告書(概要版)】様式-2-ウ

画像を利用した洪水流量観測手法に関する研究 名古屋大学 准教授 椿 涼太

画像を利用した洪水流量観測手法について、三つのサブテーマを設定して研究開発を実施した.サブテーマ1「カメラレンズを用いた新たな幾何補正手法(光学的幾何補正)の開発」では、幾何補正やピクセル補間が原因で生じる問題を回避できる新しいシステムを提案した.サブテーマ2「複数カメラを組み合わせた新たな観測手法の開発」では、複数の視野角から得られた画像より得た低精度の速度分布データを組み合わせ、より精度の高い2次元速度分布を再構成する新しい方法を提案した.サブテーマ3「洪水流量観測を手軽に実施できるスマートフォンアプリ開発」では、どこでも手軽に流量計測を行うことを狙い、地理情報を事前準備なしにインターネットから取得する機能を実装した.

Key Words: Flow visualization, LSPIV, STIV, Multi camera, Optical ortho-rectification

0. はじめに

洪水流量観測は、河川管理上の重要な業務であるが、浮子法による流量換算は出水後に行われ、また、中小河川で観測自体が十分行われていない、リアルタイムに流量計測値が取得できれば、その情報は直接、水防などの判断に役立ち、また洪水予想計算に利用することで洪水予測の精度向上・精度確保に役立つ、気候変動による降雨災害の増加、とくに過去に見られないような洪水の発生も増えると考えられる中、治水安全度が相対的に小さい中小河川での流量観測は、中小河川の危機管理と河川計画の両面で価値がある。途上国まで視野を広げると、大河川であっても流量観測の時空間的な密度は低く、そのことが、短期的および長期的な洪水の対応策の検討を難しくしている。

無人で連続計測可能な,画像計測にもとづく河川流の計測は,これらの課題を解消する方法であり,今後の普及が見込まれる。本研究では,特に画像を利用した洪水流量観測手法に着目し,画像を取得するカメラの配置の制限や,流れ特徴により,洪水流量算定の誤差が大きくなる状況での対応策を検討する。具体的には,サブテーマ(1)カメラレンズを用いた新たな幾何補正(光学的幾何補正)の技術開発,サブテーマ(2)複数カメラを組み合わせた新たな観測手法の開発を行う。また,サブテーマ(3)として,画像を利用した洪水流量観測を手軽に実施できるスマートフォンアプリ開発を進める。第1章ではサブテーマ(1),第2章はサブテーマ(2),第3章ではサブテーマ(3)の検討結果を報告する。なお,第1章の内容は,Tsubaki and Zhu

¹⁾, **第2章**の内容は, Tsubaki²⁾ にて発表したものである.

1. カメラレンズによる幾何補正(光学的幾何補正)の技術開発

(1) 導入

流路幅の広い河川で表面流速を画像計測する場合,実質的な画像解像度の低下や歪み(図1cで引き延ばされたグリッドで表現されているもの)により,幾何補正画像を対象として流速推定を適用する場合(PIV-laterアプローチ)の精度が制約され,結果として河岸から画像を取得する計測の適用性が制限される.本章では,ピクセル補間による画質劣化に由来する制約を解消できる幾何補正手法を提案する.

(2) 提案手法

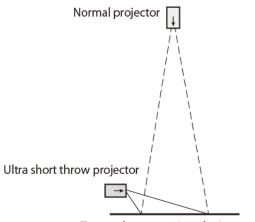
産業や軍事用の機材にくらべ、入手しやすく低価格である、民生用プロジェクターの光学系を用いて、光学的に幾何補正を行った画像を取得する.この目的を実現するため、プロジェクターに組み込まれていて、スクリーンに投影する映像の元となる画像表示素子を、CMOS(Complementary Metal-oxide Semiconductor)イメージセンサーに置き換えた.つまり元々映像を出力していた部分を映像取得装置に置き換える.本節では、そのシステムについて説明する.

NO.

2ヵ年研究用(R3)



図 1. 幾何補正の例 (a) 河岸上から撮影した洪水流 (853 by 480 pixels), (b) 32×32 pixel のグリッド を画像(a)に重ねたもの. (c) 画像(b)を幾何補正したもので, 赤と青矢印に添えた数字は手前側と対岸側での撮影画像(a)の 1 ピクセルがどの程度の実長さに対応するかを示している. 1)



Target plane to project the image

図 2. 通常のプロジェクターの撮影範囲(破線)と、超短焦点プロジェクターの撮影範囲(実線)の比較. プロジェクターは映像が対象平面に投影されるが、提案手法では同じ光学系を使って、対象平面を撮影する. 1)

超短焦点プロジェクター (LSPX-P1, ソニー株式会社) の光学系を使用した. 超短焦点プロジェクターは, 対物レンズの方向と直交する面に画像を投影するが (図2の左下のプロジェクターと細い実線を参照), 通常のプロジェクターは対物レンズのほぼ正面に画像を投影する (図2の一番上のプロジェクターと破線を参照). 使用した光学系は, 俯角を17度から57度までカバーするように設計されている.

提案手法の特性を確認するため、室内の床に 0.25 mの等間隔のグリッドを配置して撮影を行う. 図3は、この性能試験時の機器の空間構成を示す. 図4aは、提案システムで撮影した画像である. 通常のカメラで斜めから撮影した画像(図1参照)とは異なり、後処理として幾何補正をしなくても、撮影時の画像でほぼ規則正しく等間隔に並んでい

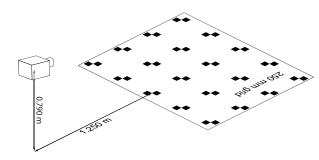


図3. 幾何補正の性能試験の機器配置の概要図1)

ることが分かる.

(3) 現地調査

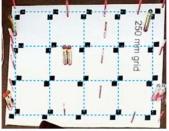
a)調査地点の概要

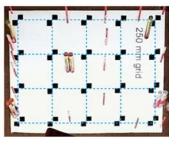
ダムからのフラッシュ放流が行われる機会を利用して、提案システムを用いて河川流の画像を取得した.本研究で調査した河川区間は、十勝川水系の支流である札内川下流域で網状になっている一部で人工的に掘削された直線流路の一区間である.フラッシュ放流は、多目的ダムである札内川ダムにより2020年6月24日に実施されたフラッシュ放流に合わせて調査を行った.ピーク時の流量は約110 m³/sで、その時刻の画像を取得した.

b) 取得画像

図5の左列に、調査中に得られた撮影された画像の一コマを示す。図5aには、提案システムで撮影した解像度640×480ピクセル、30フレーム/秒の動画の一コマ(左)と、32×32ピクセルのグリッドに置き換えた画像(右)を示す。このグリッドを幾何補正したものを図5bに示す。図5bのグリッドは等間隔ではなくゆがんでいるが、幾何補正により、元の等間隔な画像解像度がどのように歪んだかを



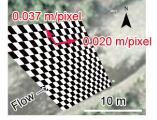




(a) 提案手法で取得された画像 (b) 図(a)のグリッド部分の拡大 (c) 幾何補正した画像 **図 4**. 等間隔グリッドを利用した幾何変換の精度確認 ¹⁾







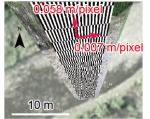
(a) Image captured by the proposed system (640 by 480 pixel)

(b) Distortion and scaling corrected image by the proposed system





(c) Conventional image (1920 by 1080 pixel) (d) Ortho-rectified image by



the conventional system **図 5.** 撮影された画像 (左列), 32×32 ピクセルのグリッドを重ねたもの (中列), 幾何変換したグリッド(右列). 右列のグリッドのゆがみは, 幾何変換により撮影画像の解像度(中列)がどのように空間的に変化するかを表す. 赤い矢印は, その場所の一ピクセル(ここでは撮影画像(中列)のピクセル)が実空間の何メ

示している.計測システムの設置角度を正確に調整することで、図5bで確認できるようなグリッドの歪みを除去することができるが、現地調査の場合、現場の地形形状などにより撮影可能な角度などを固定することが難しく、多少の解像度の不均一化がおきるとしても、幾何補正を導入することは現地調査において有効であるといえる.

ートルに相当するかを示す. 1)

提案システムで撮影を行うことと並行して、ほぼ同一の位置から同じ場所を、スマートフォン (Xperia XZ5 Premium、ソニー株式会社)で撮影した。スマートフォンでは、1,920×1,080ピクセル、29.97フレーム/秒の動画が取得された。スマートフォンで取得した画像の解像度は、提案システムで撮影した画像よりも細かいため、提案手法と従来手法の幾何補正の影響のみを判断するため、提案

手法で得られる解像度(640×480 ピクセル)に合わせて,スマートフォンでの撮影画像の解像度を下げた画像(853×480 ピクセル)を作成した.**図5**cには撮影画像(左)と, 32×32 ピクセルのグリッドに置き換えた画像(右)を示す.**図5**dに幾何補正画像を示す.

図5の右列の画像を比較すると、提案システムで得られる実座標上に展開したグリッド(図5b)は、従来手法で得られるグリッド(図5d)と比較して歪みが少ないことが分かる. 図5bの赤いベクトルで示した局所的な実質画像分解能(撮影画像の1ピクセルあたりの物理的長さ)は、流線方向が0.020 m/pixel、横方向が0.037 m/pixelとなっている. 解像度を下げた従来画像の流下方向分解能は0.020 m/pixelであり、提案システムと同じである. しか

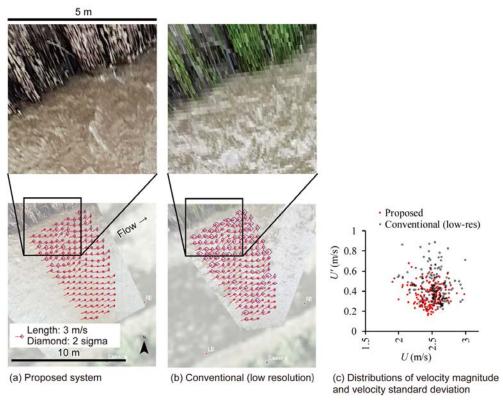


図 6. 幾何補正画像で得られた速度の平均値(赤矢印)と速度の標準偏差(紫菱形)の分布. 上段は幾何補正画像の近接写真である.¹⁾

し、横断方向の分解能は0.155 m/pixelで、提案システムの約4倍と粗い、すなわち、横断方向の分解能の低下を、提案方式で十分に緩和できていることが確認できる。

c) PIV計測結果

提案システムでは、画像の歪みを抑えた画像を記録している. 従来のシステムでは、かなりの座標歪みがある画像を撮影しており、この手法を用いながら、通常の手順では、まず画像を幾何補正し、画像に基づいた速度推定を適用している. この手順の利点は、座標歪みの大きい場合、画像に基づいた速度推定段階で物理スケールを考慮しやすいことである. このような利点は、提案システムにとって有益ではないが、画素補間により実質的な画像解像度が低下する可能性がある.

図6の上段は、提案システムと従来システムの 座標補正画像を比較したものである。座標補正 (幾何補正)画像の解像度は、撮影画像の代表的 な画素解像度をもとに0.02 m/pixelに設定した。な お、撮影画像と補正画像の画素の対応関係を明確 にするため、ここでは画素補間を行わず、最近傍 アルゴリズムを使用して作成した。提案システム、 従来システムともに堤防上の植生が歪んでいるの は、植生が3次元であり、対象が平面であると仮定する単純な幾何変換手法ではうまく扱えなかったためである. 従来システムの画像では横断方向の画素色の段階的な変化が目立つが、提案システムで得られた画像ではそのような変化は確認されなかった. また、画素補間を行うと色の段階的な変化が見た目では緩和されるが、画像座標変換による情報密度の低下と不均質化は本質的に緩和されない.

図6の下段のプロットは、平均速度の分布と標準偏差の比較である。時間平均流速の大きさの平均値は、提案システムで $\overline{U}=\sqrt{\overline{u}^2+\overline{v}^2}=2.43$ m/s、従来システムでは $\overline{U}=2.51$ m/sであった。平均速度標準偏差の大きさは、提案システムで $\overline{U'}=2.51$ m/sであった。

 $\sqrt{u'^2} + \overline{v'^2} = 0.35$ m/s, 従来のシステムでは $\overline{U'} =$

0.44 m/sであった. **図6**cは, **図6**a, **図6**bでプロットした各ベクトルの速度の大きさと速度標準偏差のプロットを比較したものである. 提案システムは,標準偏差,速度の大きさともにばらつきが小さいことがわかる. この結果は,提案手法が従来手法に比べて,空間的にも時間的にも安定で均一な速度分布になっていることを示している.

速度分布のうねりは両者とも見られるが、従来

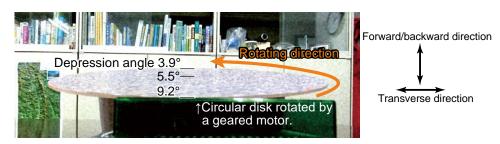


図 7. 回転円盤の動画からのサンプル画像. 直径 0.25mの円盤に平滑化したガウシアンノイズパターンを貼り付けました. 円盤は円盤の下に設置された歯車付き電動機により一定の角速度で回転する.²⁾

手法ではカメラに近い部分の出力が比較的顕著であった.対岸付近での流速分布のうねりは、従来 法手法と提案手法で同様に確認された.

(4) サブテーマ1のまとめ

本章では,幾何補正およびピクセル補間が原因 で生じる問題を回避できる新しいシステムを提案 した. 提案システムでは, 側岸から画像を取得す る段階で幾何補正された画像が得られる光学系を 利用した. 第1(2)章では、提案手法を室内で試験 したところ、後工程で幾何補正を行わない手順で 得られた画像にはおおよそ1%の長さの誤差が生 じた. 提案したシステムを用いて, 第1(3)章で紹 介した現地計測を実施した. 提案手法と従来手法 により、水路の2次元2成分速度場を推定した. そ の結果, 従来手法で得られた局所速度の時系列の 標準偏差は0.44 m/sであったが、提案手法では0.35 m/sに減少し、より精度の高い推定が可能となっ た. このように、提案手法では、カメラから遠い 領域での実質的な解像度が高く, 瞬時速度計測の 精度が高いため、従来手法と比較してより詳細な 2次元2成分速度場を得ることができた.また,流 速のランダム誤差および (横断流速成分で顕著な) システム誤差は、総流量推定に大きな影響を与え ないことがわかった.

2. 複数カメラを組み合わせた新たな観測手法の開発

(1) 導入

本章では、複数カメラLSPIVを組み合わせることで、幾何補正で大きな歪みがおきることによる精度低下を解決する方法を提案する. 提案手法の原理は、水面の同一領域を異なる位置から撮影し、それぞれの視野角の速度場を算定し、複数の視野角から得られた速度成分データを組み合わせ、精度の高い2成分2次元速度場を再構築することであ

る. 本研究では 特に基本的な情報である平均速 度場を得ることに焦点を当てる.

(2) 提案手法とその検証

本研究で提案する方法は、最小二乗法アルゴリズムを取り入れたものである.詳細は成果報告書本体に記述する.

ビデオカメラ(HDR-CX390、ソニー株式会社)を用いて、回転する円盤を小さな俯角(3.9°から9.2°の範囲)から動画撮影を行った. 図7は、記録した動画のスナップショットである. 俯角が小さく、表面模様が強く歪んでいることがわかる(円盤の前後方向のスケールが横方向のスケールの1/10になっている). このような視野角から得られる河川流速画像によって計算される流速場は、一般に無視できない誤差を含んでいる. そこで、実際の河川で見られる水面模様の変形を模倣するために、人工的な画像ノイズ(Adobe Premiere Pro CS6の「Noise HLS auto」フィルタ)を適用した. そして、劣化した動画から得られた速度成分を合成して、2次元の速度場を再構成した.

提案手法では、異なる方向の速度成分から2次元の速度場を再構成する. 図8は、撮影水平角の違いを45° および90°とした2組の複数カメラ撮影の配置を説明する図である.

図 9 は、単一アングル (single view)、 45° と 90° の複数カメラの組み合わせの、計 3 つのケースの 2 次元速度分布を比較したものである.元の PIV の結果 (細い破線ベクトル) は、カメラ付近 (y/r < 0)で妥当な速度分布を示している.しかし、円盤の遠方では速度ベクトルが散乱している (y/r > 0.3). 45° ペア、特に 90° ペアのプロットでは、円盤の向こう側での速度分布の散らばりが小さくなり、かなり合理的な分布になる. したがって、速度成分の方向がほぼ 90° 異なるペアからなる方が速度分布の再構築に適していると考えられる.

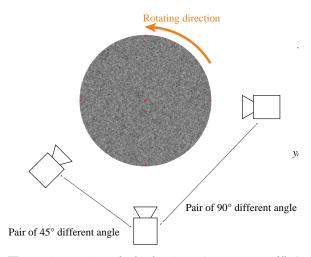


図8. 45° と90° の角度が異なる2組のカメラの模式 的な平面図²⁾

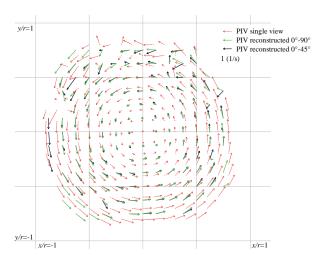
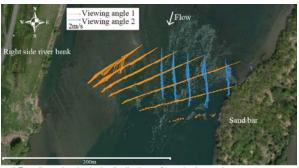


図9. 45°と90°のペアから再構成された2次元の速度分布と流れ場²⁾

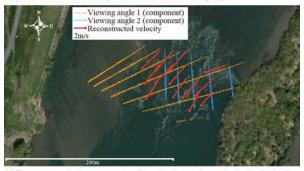
(3) 現場での活用例

報告書本体では循環流実験での提案手法と一つのアングルの画像を使う従来手法との比較を行い、 低俯角撮影時の提案手法の有効性を確認しているが、ここでは割愛し、現場での活用例を紹介する.

ある河川区間で形成された大規模な渦構造を明らかにするために、LSPIVによる調査を実施した. 調査区間は幅約200 mで、河川右岸に設置された2つの視野角から画像を取得した. 各視野角の画像を撮影・記録するために、監視用画像取得システムを使用した. 複数の画像のフレームは同期していない. ピントが合っている部分の画像の俯角は約1.5°と約2.0°であった. 俯角がかなり小さく、画像と座標の歪みが強いため、標準的なLSPIVで得られた2次元速度場は強く偏っているように見え(視野角に対して垂



a) Two-dimensional velocity distributions of two viewing angles



b) Transverse velocity components of two viewing angles and velocity distribution reconstructed from these velocity components

図 10. 川岸から得られた (a) 2 つの視野角の 2 次元速度分布, および (b) 上記視野角の 2 次元速度の横方向速度成分を抽出し再構築した速度分布 2) (背景写真出典: 国土地理院ホームページ)

直に並んでいる),この循環流は標準的なLSPIV 結果からは見えなかった(図10a, PIV-firstアプローチを使用).両視野角の横断方向速度成分を算出し,これを組み合わせて流速分布を再構築し,図10b)に赤色のベクトルでプロットした.再構成された流速分布から,左岸側の流れの剥離を確認することができる.この流れの特徴は,現地での観察とよく対応している.

(4) サブテーマ2のまとめ

本章では、複数の視野角から得られた画像より得た低精度の速度分布データを組み合わせ、より精度の高い2次元速度分布を再構成する新しい方法を提案した.剛体回転円盤実験と循環流実験のそれぞれで、低俯角画像から算出される速度分布の誤差の基本的な特性を調べた.提案手法を、俯角が非常に小さいために、標準的なLSPIVでは流れの特徴がうまく抽出できない現地観測でえられた画像に適用した.提案手法を用いることで、流れの特徴を抽出することに成功した.

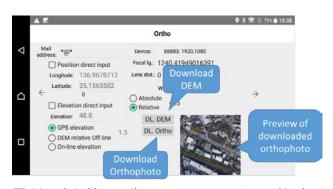


図11. 幾何補正画像 (Orthophoto) および標高 分布 (DEM) のダウンロードボタン



図 12. カメラ画像の幾何補正とインターネット からダウンロードした幾何補正画像の合成

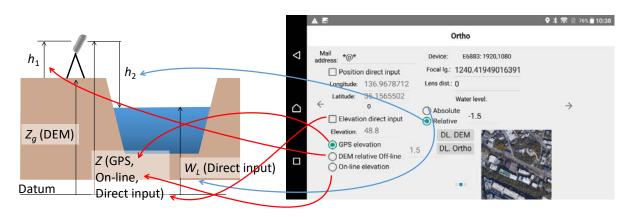


図 13. 設定できるカメラ標高および水位設定方法

3. 可視化洪水流量観測用のスマートフォンアプリ開発

(1) はじめに

流量観測において、スマートフォンを利用することで、事前準備なしで流量観測が可能となれば、治水や利水のあり方を大きく変える可能性がある。スマートフォン自体にカメラと計算機が統合されていることやデータベース等へのアクセスが可能であることに加え、撮影の位置や角度を一定の精度で自動取得できる機能を活用すると、どこでも手軽に流量観測を実施することも非現実的とは言えず、椿30などで、そのための技術開発を進めている。本研究助成実施前の状況については成果報告書本体にて概説している。

本研究助成では、どこでも手軽に流量計算機能を実装することを目指す。その1ステップとしてどこでも地理情報を自動的に取得する機能を実装した。すなわち、これまで地理情報を利用する際にはGISなどでデータを準備する必要があった部分を、データ準備せずに自動的にデータを取得する

機能を追加する.

(2) 地理情報の自動入手機能の実装

図11に新設された,幾何補正画像(Orthophoto) および標高分布(DEM)のダウンロードボタンを示す.幾何補正画像がダウンロードされると,右下にプレビュー画像が表示される.現時点ではオルソ画像はGoogle社による衛星画像タイルを利用している.

図12には、ダウンロードされた幾何補正画像と、カメラ画像の幾何補正を合成している様子を示す。二つの幾何補正画像の位置関係の対応、特に水際の位置の整合がとれているかどうかにより、カメラの位置を含む幾何補正と設定した水位が適切に設定されているかどうかを視覚的に確認することができる。カメラの位置が移動し、ダウンロードした幾何補正画像の範囲外に近づくと自動的に再ダウンロードして、常に背景画像として表示されるようになっている。

図13に、アプリのGUIと、それを用いて設定できるカメラ標高および水位設定の方法を示す. スマ

ートフォンの平面位置や標高は, GPS, 気圧計, 無 線LAN, インターネットを介して得る補正情報な どを組み合わせ,同化などの技術を用いて算定し ていると考えられる. 現時点でスマートフォンの 平面位置の精度は数メートル程度,標高(図中の Z) はその倍程度である. 流量を算出するという目 的に対して, 平面位置の数メートル程度のずれは, ある程度河幅があり、横断流速分布がなめらかで あれば、許容範囲と判断することもできるが、標 高値をそのまま使うには精度が不十分である. 幾 何補正という観点では、カメラの標高の絶対値は 本質的に重要ではなく, カメラと水面の標高差が 問題となる. カメラと水面の標高差(図中のh2)は, カメラの設置位置から近くの水際が直視できれば, 傾斜計付きのレーザー距離計などで比較的容易か つ精度良く算定可能である. 幾何補正には、カメ ラと水面の標高差が特定できれば良いが,流量を 算定するためには河道の断面形と水位(図中のWL) が既知である必要がある. カメラの標高Zは, 上述 のようにスマートフォン単体で算定した場合、精 度は不十分である. そこで, 標高分布データとス マートフォンの平面位置よりカメラの位置の地盤 高 (Z_g) を算出し、別途スマートフォン設置位置で、 地盤高とカメラ位置の標高差 (h1) を計測・入力す ることで、カメラの標高Zを算定する機能をつけて いる.

(3) 課題

当初の目標であった,流量計算機能の実装と精度検証には至っていないが,どこでも手軽に流量計測を行うため,地理情報を事前準備なしにインターネットから取得する機能を実装した.標高の算定は一方、一般的に整備されている場合である.一方、一般的に整備されているものや,デは与えられていても,水際部より河道や大力である.水面下を含めた標高分布が整備されれば,どこでも手軽に流量計測を行う上で極めて有効であり,近年計測が進むALB(航空レーザー測深)のデータを利用して国内や世界をカバーするデータが提供されることが期待される.このようなデータは本研究だけでなく流量観測全体に役立つし,

河川流の数値解析を行う上でも非常に便利かつ効率的である.

4. おわりに

画像を利用した洪水流量観測手法について,三 つのサブテーマを設定して研究開発を実施した. それぞれのサブテーマで得られた主な結論につい てはそれぞれの章末で述べたため,ここでは割愛 し,全体を通した結論と課題を述べる.

画像を用いた流量観測における,幾何補正の高度化と平面流速分布の高精度な取得を軸として,幾何補正の問題を解消する技術開発(サブテーマ1,2)と,幾何補正を容易に行うためのシステム開発(サブテーマ3)を推進した.複数カメラを用いるサブテーマ2の手法は,スマートフォンを利用するサブテーマ3のアプローチに統合可能である

どこでも手軽に流量計測を行うために、横断面形の情報が必要であるが、どこでもだれでもアクセスできるような状況にはないため、河床形状を含めた標高分布の整備と公開が待たれる。河床形状そのものも手軽に計測できる技術の開発^{例えば4)}と実用化も待望される。

参考文献

- Tsubaki R. and Zhu, R. (2021). Optical orthorectification for image-based stream surface flow observations using a ground camera, Frontiers in Water, doi: 10.3389/frwa.2021.700946.
- Tsubaki, R. (2020). Multi-camera large-scale particle image velocimetry. Measurement Science and Technology, Vol.31, 084004, doi: 10.1088/1361-6501/ab85d5.
- 3) 椿 涼太:スマートフォンを用いたLSPIV観測システムの開発,河川流量観測の新時代,第5巻,2015.
- Johnson, E. D., and Cowen, E. A. (2016), Remote monitoring of volumetric discharge employing bathymetry determined from surface turbulence metrics, Water Resources Research, 52, 2178–2193, doi:10.1002/2015WR017736.