

## 研 究 報 告 書

### 「水泳プール中の水の流れを3次元計測する技術の開発」

研究期間：平成29年10月～平成31年3月

研究者番号：50158

研究者：山下 聖悟

#### 1. 研究のねらい

本研究では、プールのように水中に人が存在する環境において流体計測を実現する技術を開発する。この技術は、水泳などの水中競技のトレーニング効率を向上する。例えば、水中での推進力の向上には泳者周辺の水の動きを理解することが重要であることが知られている。もし水泳プール中の水の流れが計測できれば、今までのコーチの経験に基づいたトレーニング法に加えて、推進力を数値化したデータに基づいた水泳フォームの矯正などが可能になることが予測される。しかし、既存の流体計測手法には、計測範囲の制限や人体への悪影響などの問題があった。そこで、本研究では、人体への危険性が少なく、より広い3次元空間で流体計測を行うことができる技術を開発する。流体計測には、流体に微小な粒子(トレーサー粒子)を散布し、レーザーの照射によってそれらを周囲よりも明るくし、カメラによって観測可能にすることで、水の流れを計測する手法が用いられることが多い。しかし、レーザー光による粒子の散乱光・蛍光を用いる既存手法には、プールのように人が存在する広域な3次元空間において流体計測を実現することが難しいという問題があった。計測範囲に制限が発生する大きな原因としては、光学系を拡大することが技術的に難しいことや、カメラから見て粒子が重なった場合、後ろにある粒子を観測することができないことなどがあげられる。また、計測環境に人が存在する場合、水中に散布された粒子による視野の妨げや、強力なレーザー光の照射や粒子の誤飲による人体への悪影響が問題となる。そこで、本研究では人体に悪影響を与えない程度の光を用いて計測用のカメラにのみ粒子を可視化することで、より広い3次元空間中の水の動きを計測する技術を開発することを目指した。また、誤飲された際にも人体への悪影響が少なく、プールの透明度への影響も少ないトレーサー粒子の開発を目指した。

## 2. 研究成果

### (1) 概要

本研究では、人体への危険性が少なく、かつ既存手法より広い3次元空間で流体計測を行うことができるトレーサー粒子と、その計測手法の実現を目指した。人の泳動作による水流を計測することで、水中での人の推進を妨げる抵抗の発生原因や位置等を明らかにできる。本研究の成果は、未だに明らかにされていない人の水中での推進メカニズムの解明や、より効率の良い泳ぎ方の発見などに貢献することが期待される。本研究では、人体に悪影響を与えない程度の光を用いて計測用のカメラにのみ粒子を可視化し、水の動きの計測を可能にする技術を開発する。粒子の可視化には、プール中に設置された2枚の直行する偏光角を持つ偏光板(あるいは円偏光板の対)による遮光と、その間を漂う粒子による偏光面の回転によっておこる明暗差を用いた。この光学系は、室内灯に使われる光源と同程度の光量でトレーサー粒子の可視化を可能とし、従来手法のように、やけどや失明などの人体への影響が考えられる強力なレーザー光を用いない流体計測を実現した。また、本研究では、プール中の水流計測に適したトレーサー粒子の開発を目指した。具体的には、誤飲した際に安全である素材から構成される、透明度が高く水泳者の視野を阻害しない、周囲に比べて十分に明るくなるなどの特性を持つトレーサー粒子の開発を行った。

### (2) 詳細

#### 研究テーマA「トレーサー粒子の開発」

トレーサー粒子による水の透明度の低下を防ぐためには、トレーサー粒子が無色透明で屈折率が水と非常に近い値であるか、粒子のサイズが非常に小さい必要がある。また、誤飲した際の人体への悪影響を少なくするため、トレーサー粒子は食品グレードの素材で構成される必要がある。加えて、偏光板による遮光と粒子による偏光面の回転を用いて粒子を可視化するためには、粒子が旋光性あるいは複屈折という偏光面を回転する光学特性を持つ必要がある。本研究では、これらの特徴を持ち合わせる素材について調査・検証し、トレーサー粒子のプロトタイプを開発した。まず初めに、吸水ポリマーに旋光性を持つ果糖などを含ませたトレーサー粒子について検証した[主な研究成果リスト3、図1]。成果は国際学会AH2018にてBest paper Awardに選ばれた。この粒子はプールの透明度の低下を防ぎ、かつ提案する光学系中で十分に明るくなるという特性を持っていたが、粒子径が大きく比重が水に比べて高いため水の流れに追従する能力が低いことがわかった。そのため、次に人工いくらなどとして広く扱われているアルギン酸ナトリウムと乳酸カルシウムが反応した際に生成される球状の膜で構成したトレーサー粒子を提案した[主な研究成果リスト2、図2]。この粒子はそのほとんどが水で構成されているため、水と比重が近く水への高い追従性を発揮した。しかし、この粒子にはゆっくりと水の底へ沈んでしまうという特性があった。検証の結果、これらを解決する方法として、粒子サイズをマイクロあるいはナノオーダーまで小さくすることが有効であることがわかった。理由は、粒子が非常に小さい場合、終端速度が遅く水中での沈殿速度が非常に遅くなるためである。これらを踏まえて、粒子サイズが微少であっても強い複屈折を見せるセルロース微結晶をトレーサー粒子として用いてその有効性を確

かめた[主な研究成果リスト1、図3]。

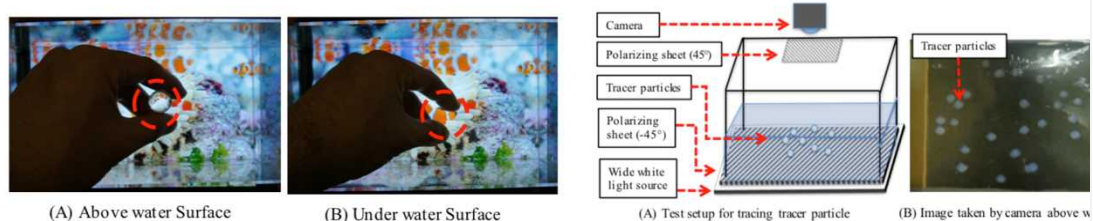


図 1 吸水ポリマーに旋光性を持つ果糖を含ませたトレーサー粒子

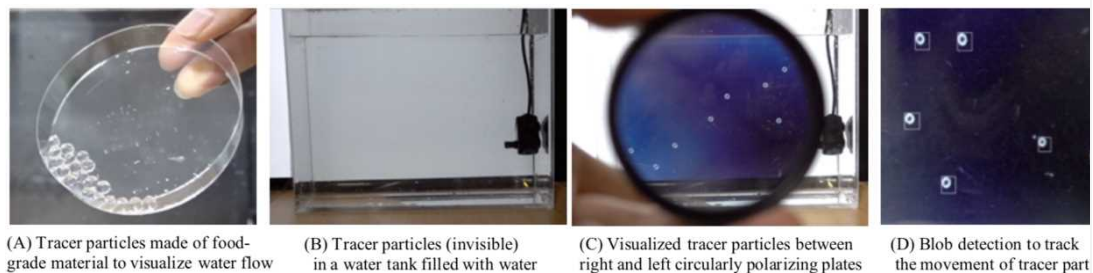


図 2 アルギン酸ナトリウムと乳酸カルシウム(人工いくら)で構成したトレーサー粒子

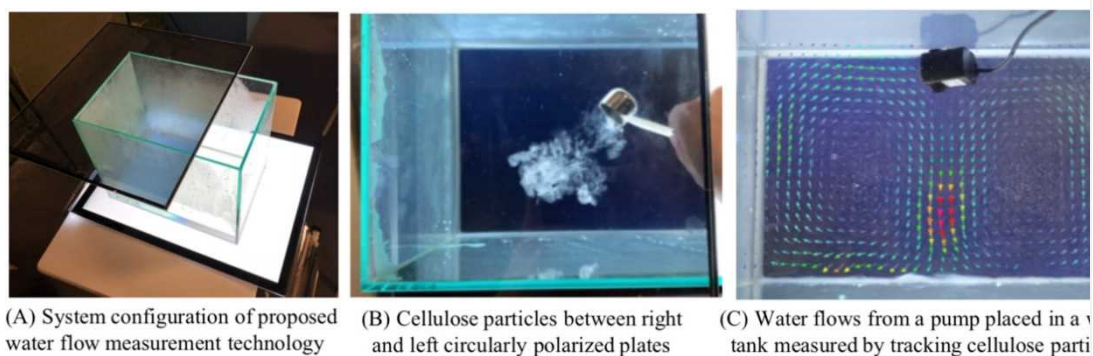


図 3 セルロース微結晶を用いたトレーサー粒子

#### 研究テーマ B 「トレーサー粒子を計測する技術の開発」

本研究では、トレーサー粒子をカメラによって計測可能にするために偏光を用いた。直行する偏光角を持つ2枚の偏光板を重ねた場合、後部からの光が透過しなくなる遮光が起こる。2つの偏光板に挟まれた位置に偏光面を回転する能力(旋光性、複屈折)を持つ粒子がある場合、偏光板の外から見ると粒子のある位置のみが明るくなる。粒子のみが周囲に比べて大幅に明るく見える場合、カメラを用いた粒子の追跡が可能となる。本研究では、提案するトレーサー粒子に対してどのような粒子追跡手法が有効であるか検証した。結果として、流体計測に従来から使われるアルゴリズムが本光学系とトレーサー粒子を用いた場合も、ある程度有効であることがわかった。図4は粒子一つ一つの動きを追跡する PTV(Particle Tracking Velocimetry, 粒子追跡法)を用いて複数のトレーサー粒子を追跡した結果である。本研究では、熟練した泳者に大型の水槽中で泳いでもらい、スクロールによって発生した水流を計測した[主な研究成果リスト2、図5]。結果として、泳者の腕に追従するような水流と、

周辺に発生した渦状の水流が計測された。計測には PIV (Particle Image Velocimetry, 粒子画像流速測定法) を用いた。3 次元的空间中の水の流れを計測するためには、水中で撮影した際に発生する歪曲収差の解決方法や、カメラの設置方法などに関する更なる検証が必要となる。

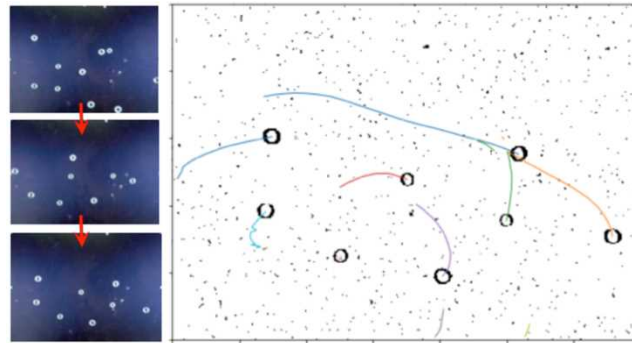


図 4 PTV(粒子追跡法)を用いて複数のトレーサー粒子を追跡した結果

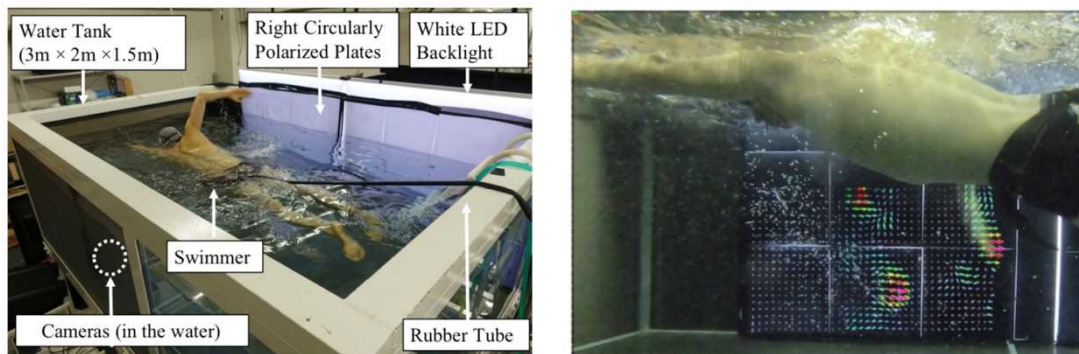


図 5 熟練した泳者のスクロールによる水流を大型の水槽中で計測した結果

研究テーマ C 「水中特有の技術的課題の解決、他領域への応用」

偏光板の設置によって付随的に解決できる水中特有の問題などについて検証した。例えば、偏光した光の照射とその反射光を用いた水中でのモーショントラッキング手法の開発[主な研究成果リスト 4]や、アクアリウムにおける問題の解決手法[主な研究成果リスト 5]などを提案した。本研究は国際学会 ACI2017 にて Best Paper Award を取得した。



### 3. 今後の展開

加速フェーズにおいても現在の研究課題である“水泳プール中の水の流れ 3次元計測する技術の開発”をより深めていく。具体的には、水泳、流体計測を専門とする研究者との共同研究の推進、実用性の向上を目指す。また、提案技術を学校やスイミングスクール等の一般社会においても使用可能な製品にすること目標に研究開発を行う。加えて、提案手法を他研究領域へ応用する。例えば、本技術の光学系は透明な身体を持つゾウリムシやミジンコなどを可視化することもできるため、水中微生物の行動観察に役に立つことが明らかになっている。流体だけではなく気体への応用も可能であることが予測される。

### 4. 自己評価

#### ・研究目的の達成状況

本研究では、人体への危険性が少なく、かつ既存手法より広い3次元空間で流体計測を行うことができるトレーサー粒子とその計測手法について研究開発した。熟練した泳者周辺の水の流れの計測や、水槽中の物体周辺に発生する乱流の計測等によって、提案手法の有効性が確認された。3次元空間中での流体計測については計測可能な粒子のサイズや個数に制限があるなど、未だに技術的課題が残されている。加速フェーズでは、これらの技術的課題を解決するとともに、水泳を専門とする研究者らと共に、水泳に用いられるプールなどの実環境での検証実験を進める。

#### ・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

概ね当初予定された通りに研究が実施された。検証実験のための費用が予定よりも多くかかることが予測されたため、増額措置に申請した。

#### ・研究成果の科学技術及び学術・産業・社会・文化への波及効果

ACT-Iの研究期間中に、提案手法の有効性がある程度証明された。そのため、今後は開発したプロトタイプをより製品に近いものにし、他領域の研究者やスポーツ関連設備が本研究の成果を活用できるようにする。本研究成果は、他領域の若手研究者とノーベル賞受賞者が世界各国から集まる第11回HOPEミーティングにて発表された。また、本研究成果を販売することに興味がある会社等との会議や特許出願なども進めている。来年度は、提案手法のための光学系をより実用的にするために深セン(中国)などへ訪れ、製品開発を進めることを予定している。

#### ・研究課題の独創性・挑戦性

本研究課題の進行にはスポーツ、流体計測、光学、画像処理などの複合的な知識と技術が必要である。流体計測は水中でのスポーツに関する研究にとって非常に重要であるが、流体計測技術の開発はスポーツを専門とする研究者が得意とする領域ではなかった。また、流体計測を専門とする企業や研究者は、主にエンジンやプロペラ等の開発支援を目的に研究開発を進めることが多いため、人体への安全性や広い範囲での流体計測に注力することはあまりなかった。本研究課題は、コンピューターによって人を支援することを専門とする申請者が、これらの領域の中心に入り、それぞれの問題を解決することを目指した挑戦的な課題である。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. Shogo Yamashita, Shunichi Suwa, Takashi Miyaki, Jun Rekimoto, "Feasibility Study on Water Flow Visualization Using Cellulose Particles and Pervasive Display", The 8th ACM International Symposium on Pervasive Displays(PerDis 2019), June 12-14, 2019.
2. Shogo Yamashita, Shunichi Suwa, Takashi Miyaki, Jun Rekimoto, "Water Flow Measurement for Swimmers using Artificial Food-grade Roe as Tracer Particles", The 5th International ACM In Cooperation HCI and UX Conference(CHlUXiD 2019), April 8-9, 2019
3. Shogo Yamashita, Shunichi Suwa, Takashi Miyaki, Jun Rekimoto, "Investigation of Tracer Particles Realizing 3-Dimensional Water Flow Measurement for Augmented Swimming Training", The 9th Augmented Human International Conference (AH2018), Article No. 2, 9 pages, February 7-9, 2018.
4. 山下 聖悟, 諏訪 俊一, 味八木 崇, 暦本 純一, "水泳体験を向上させる水中没入型バーチャルリアリティ環境: AquaCAVE の設計と実装", 日本ソフトウェア科学会 コンピュータソフトウェア. Vol. 35, No. 2, pp. 52-63, April 24, 2018.
5. Shogo Yamashita, Shunichi Suwa, Jun Rekimoto, "AquaPrism: Dynamically Changing the Color of Aquatic Animals without Injury by Augmenting Aquarium", The 4th international conference on Animal-Computer Interaction (ACI2017), Article No. 11, 9 pages, November 21-23, 2017

### (2) 特許出願

研究期間累積件数:

国内特許出願 1 件、優先権主張出願 1 件

発 明 者: 山下 聖悟

発明の名称: 3次元流体計測法

出 願 人: 東京大学

出 願 番 号: 2018-12298 (優先権主張出願; 2019-13324)

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- Best Paper Award の受賞, AH2018 (The 9th Augmented Human International Conference), 2018 年 3 月
- Best Paper Award の受賞, ACI2017 (The Forth International Conference on Animal-Computer Interaction), 2017 年 11 月
- The 11th HOPE Meeting への参加, 2019 年 3 月