

博士論文(要約)

Fluid Measurement using Optical Anisotropy
(光学異方性を用いた流体計測技術に関する研究)

山下 聖悟

本論文では、水泳プールのような人が存在する環境において既存技術よりも広い範囲で流体計測を実現する技術を提案する。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につながる事が期待される。

泳ぐ際の推進力を向上するためには、推進する際の水の抵抗を減らすことが重要であることが知られている。また、水中でより早く推進するためには、特定の位置に特定の水の流れを作り出す必要があることがわかっている。例えば、魚や水中に住む昆虫などの水生生物はヒレや足などを巧みに使い 3 次元的な水の渦を作り出し、発生した渦の組み合わせによって推進方向の反対側にジェット流を生じさせることで水中を素早く推進している。また、流線型の身体により推進する際の水の抵抗を大きく軽減している。人の泳動作による水流を広い範囲で計測することができるようになれば、水中での人の推進を妨げる抵抗となる乱流の発生位置や原因を新たに明らかにできる。また、3次元的な水流が計測できれば、人の推進メカニズムの解明やより良い泳動作が発見できる可能性がある。

しかし、既存の流体計測手法には、人体への悪影響や計測範囲の制限のため、人が存在する計測環境における使用が難しいという問題があった。そこで、本論文では、人体への危険性が少なく、既存技術よりも広い範囲での流体計測を実現する技術を提案する。

流体計測には、流体中にトレーサー粒子といわれる微少な粒子を散布し、流体の流れに沿って移動する粒子をカメラ等により追跡する手法が一般的に用いられる。トレーサー粒子としては、数十マイクロメートル程度の径を持つプラスチック粒子が使用される場合が多い。一般的に、カメラによる粒子の追跡を可能にするために、流体中のトレーサー粒子へレーザー光が照射される。レーザー光が粒子上で散乱し、粒子を周囲よりも明るくする。この手法を、水泳プールなどの範囲が広く、かつ人が存在する計測環境に使用する場合には、大きく分けて 2 種類の問題が存在する。一つ目は、トレーサー粒子の誤飲やレーザーの照射などによる人体への悪影響である。トレーサー粒子を周囲に比べて十分に明るくし、カメラによる追跡を可能にするためには、強力なレーザー光の照射が必要になる。一般的に、皮膚への露光や拡散反射の観察が危険であると定義されている強さのレーザー光が用いられる。2つ目の問題は、既存手法により計測可能な範囲の制限に関する問題である。既存手法の問題として、レーザー出力の制限やレーザーやカメラなどの光学系の増設にかかる金銭的なコストなどのため、計測可能な空間を広くすることが難しいことがある。そのため、例えば泳いでいる人の周辺の水の流れを一度に計測するような用途には適していない。

本研究では、誤飲された際にも人体への影響が少ない素材で構成され、水中を浮上も沈殿もせずに長期間漂い続け、水の流れにも高い追従性を持つトレーサー粒子について検証した。また、人体に悪影響を与えない程度の光量の光を用いて計測用のカメラにのみ粒子を可視

化する光学系を開発し、粒子の動きの計測を可能にした。

粒子の可視化には偏光を用いる。左円偏光板と右円偏光板を重ねた場合、背後からの光は遮光され透過しなくなる。2つの偏光板に挟まれた位置に偏光面を回転する能力(旋光性や複屈折)を持つ粒子がある場合、偏光板の外側から見ると粒子のある位置のみ背後の光が透過する現象が起こる。バックライトの前に偏光板の対を設置することで、粒子のみが周囲に比べて大幅に明るく観測され、カメラによる粒子の追跡が可能となる。本手法は従来技術のような技術的に照射範囲の拡大が難しい光学系を必要とせず、円偏光板とバックライト、計測用カメラの組み合わせを横・縦方向に増設することにより計測可能範囲を拡大できる。提案する粒子追跡型流速計測法には、水中競技のトレーニング効率の向上やより早く泳ぐためのメカニズムの解明だけのみならず、水中建築のための水理実験、流体シュミレーションの評価、水中エンターテイメント環境でのインタラクションの実現、物理化学教育などの幅広い応用が期待される。提案する流体計測手法の技術的貢献を以下に述べる。

- より安全性が高く広い範囲で計測が可能な水流計測手法の提案
- 誤飲の際にも危険性が低く、水の流れによく追従するトレーサー粒子の開発と検証
- 人体に安全な光量の光源のみを必要とするトレーサー粒子の可視化手法の提案
- トレーサー粒子と粒子を可視化する光学系の実環境での検証実験と精度を判断するための基礎実験の実施

Understanding water flow around a swimmer is key to reducing water resistance when swimming and improving propulsive force. However, existing water flow measurement technologies are not suitable for measuring human swimmers because they can only measure a limited area and have potential adverse health effects. In this research, we propose a harmless method of water flow measurement using food-grade particles and a harmless light source. Proposed water flow measurement technology for swimmers may contribute to creating a more efficient swimming form, which remains unexplained thus far. To improve propulsive force, reducing the resistance of water and creating specific vortexes of water at certain points is important. Some studies show that aquatic animals such as fish and aquatic insects make vortexes of water, creating a backwards jet stream to swim faster, and their streamlined bodies significantly help reduce water resistance. Measurements of water flows of aquatic animals, as well as objects such as swimsuits and pipelines, have been achieved using existing methods. However, it is still not feasible to measure the water flow of swimmers' strokes due to measurement limitations and possible adverse effects on humans when using current methods. Wider-field water flow measurements reveal the position and cause of turbulent flows, which are the main source of water resistance. Three-dimensional water flow measurements would improve our understanding of the mechanism of swimming forms that create a propulsive force in the water and aid in discovering better swimming forms that can achieve more speed.

Flow measurements can be assessed using tracer particles that are scattered in fluids. Cameras track the movement of these particles to measure water flows. Most existing fluid measurement technologies use micro-order plastic particles as tracer particles and a laser light source to visualize the particles. When a laser light is cast into the measurement environment, the tracer particles become sufficiently brighter than their surroundings. This improves the trackability of tracer particles using cameras and image processing to detect particles. However, this method has potential adverse effects on humans, such as accidental swallowing of the particles and laser burns. Generally, category 4 or category 3 laser light sources are required for wide-field fluid measurement large enough to cover the size of an average human, which can cause severe eye and/or skin damage. Therefore, water flow measurements in a large space like a swimming pool have not yet been feasible. Another reason for this is that the measurable area of existing methods has been limited due to limitations in optical systems, such as the capacity of the laser and the speed and resolution of cameras. Enlarging the optical system is technically difficult.

Given these factors, we propose a water flow measurement technology that uses tracer particles suitable for a swimming pool. Furthermore, we propose a polarization-based technique for visualizing the tracer particles. This method would extend the measurable area compared to previous methods because it does not require the use of optical systems, whose views are difficult to enlarge. Therefore, measuring tracer particles in wider spaces would be more feasible than with existing methods. The proposed tracer particles must also be functional; that is, they should move in accordance with water flows in the measurement field and must be visible by cameras. Creating tracer particles with these characteristics and proposing a visualization method for them would make a significant contribution to water flow measurement in swimming pool environments.

In this research, we propose safer tracer particles that are composed only of food-grade materials and an optical setup to make the particles trackable by cameras that utilize a harmless light source. The tracer particles are less harmful than those traditionally used, even in cases of accidental swallowing, and the optical setup used to visualize the particles has no adverse effects on either human skin or eyes because the light intensity is lower than that of lights used in a typical room. We use an optical property of tracer particles called optical anisotropy that rotates the plane of polarization of polarized light to visualize the particles. By placing the tracer particles between right and left circularly polarized plates, the tracer particles become brighter than their surroundings. The dark background is due to the light shielding caused by the combination of the two circularly polarized plates. The particles become brighter because each particle rotates the angle of polarized light through its optical anisotropy. In this research, we investigated the feasibility of the polarization-based water flow measurement technology using tracer particles with optical anisotropy. We measured water flow in a swimming environment with several swimmers. To test the capabilities of the proposed water flow measurement technology for measuring slight water flows, such as turbulent flows, we prepared objects of various shapes, including a spherical object (high resistance), streamlined objects (low resistance), and a human-shaped doll posed in several swimming forms, and put them into a water tank with a steady water flow. Proposed water flow measurement technology has the potential to make contributions not only to swimming but also a wide range of applications, such as hydraulic model testing for underwater architecture, validation of fluid simulation, space-user interaction in underwater entertainment systems, and education. The specific contributions of this paper are enumerated below:

- A setup of a safer and wider-field water flow measurement technology for swimmers.

- Proposed tracer particles that are food-grade and harmless, even if they are swallowed by swimmers, and move smoothly in accordance with the water flow caused by swimming motions.
- An optical setup for making the tracer particles trackable uses a harmless light source, while similar existing technology requires a strong laser light source.
- Demonstration of the proposed tracer particles and optical setup on real water flows caused by swimmers and objects in a steady water flow.