

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	Development of Water Surface Reflection/Refraction Correction Techniques for UAV-Based Photogrammetry of Shallow Water Bottom
氏 名	I GD Yudha Partama

Shallow-water bathymetric data are important in a wide range of applications. In river systems, these data are important in management and research applications such as river hydrodynamic modeling and investigation of bank erosion and morphological change. In coastal settings, these data are important to the study and management of coral reefs and estuarine ecosystems because water depth distribution governs the physical and biological characteristics (e.g., flows, waves, and benthic habitats). However, in shallow water areas such as river channels and coral reefs, there is no perfect method for exhaustive bathymetric mapping. Conventional ship sounding is constrained by ship access. Single-beam echo-sounding from boat is time consuming to survey a wide area. Airborne light detection and ranging (LiDAR) is too costly to a wide area.

To supplement these approaches, the UAV-based photogrammetry using Structure from Motion (SfM) and Multi-View Stereo (MVS) has recently been proposed. This technique greatly reduces the level of expertise and ability required to extract high resolution bathymetric data, using cheap consumer-grade digital cameras mounted on small UAVs (e.g. drones). However, the applicability of this technique is limited by refraction/reflection of light at the water surface. The refraction of the viewing line caused water depths in the submerged area to be estimated shallower than the reality. In addition, the reflection of sunlight and skylight hinders the matching between images and makes the point-cloud density and accuracy insufficient. Therefore, the methods to correct these effects are required.

The primary objective of this study was to develop the practical methods to remove the water-surface refraction/reflection effects for UAV-based shallow-water photogrammetry. In the first part of this study, an empirical

method was presented to correct for the effect of refraction after the usual SfM-MVS processing. The presented method utilizes the empirical relation between the measured real-scale depth and the estimated apparent depth at multiple submerged points. Specifically, an empirical correction factor is derived by least-squares method and is used to convert the apparent water depth into a refraction-corrected (real-scale) water depth. To examine its effectiveness, this method was applied to two river sites. At each site, the RMS errors in the corrected bottom elevations were compared with those obtained by three existing methods. The result shows that the presented method is more accurate than the two existing methods: The method without applying correction factor and the method that utilizes the refractive index of water (1.34) as correction factor. In comparison with the remaining existing method, which used the additive term (offset) as well as the multiplicative correction factor, the presented method performs better in Site 2 and worse in Site 1. Overall, the accuracy of the method depends on various factors such as the locations, image acquisition and GPS measurement conditions. The most effective method in each situation should be selected by using statistical selection (e. g. leave-one-out cross validation).

In the second part of this study, a new imaging technique was presented to suppress the effect of the sun/sky reflections at the water surface in the imagery. In this technique, first, the drone was ordered to take a short video instead of a still picture at each waypoint. Second, the effects of the displacement and rotation of the camera, caused by the movement of the UAV during the recording, was removed from each video. Third, a temporal minimum filter (a filter that extracts the smallest RGB value for each pixel from the available video frames) was applied to the video in order to obtain an image with reduced intensity of reflections. Finally, the resulted images were used as an input for the SfM-MVS procedure.

In order to assess the effectiveness of this technique, it was tested in three experiments in river and coastal sites. The density, accuracy and precision of point-cloud as well as the accuracy and precision of bathymetric



map generated by this technique were compared with those generated from a randomly chosen frame. The results showed that by applying the presented technique, the density of point cloud increased by factor of 3.6, 1.8, and 3.2 at Site 1, 2, and 3, respectively. This improvement in the point density is caused by increasing the number of matching points between images in the MVS algorithm.

The results also showed that the presented technique increased the accuracy and precision in estimating the water bottom elevation of submerged points. In addition, the error statistics of the bathymetric map show that the RMS error decreased by factor of 3.8, 2.9, and 2.5 at Site 1, 2, and 3, respectively, upon application of the presented technique. In summary, the presented technique improves the point cloud density, accuracy and precision of UAV-based shallow-water photogrammetry by reducing the effects of sun/sky reflections at the water surface.



# 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

## (博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 757 号	氏名	IGD Yudha Partama
最終試験担当者	主査 神野 有生	査員 関根 雅彦	査員 朝位 孝二
	査員 中村 秀明	査員 水上 嘉樹	
【論文題目】			
Development of Water Surface Reflection/Refraction Correction Techniques for UAV-Based Photogrammetry of Shallow Water Bottom (浅水底の UAV 写真測量のための水面反射・屈折補正技術の開発)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】			
<p>浅水域の水深データには、様々な重要な用途がある。河川では、水理学的なモデリングや堤防の浸食・変形などの管理・研究用途に、水深データが重要である。沿岸域では、水深分布が物理・生物的な特性（例：流れ、波、底生生物）を支配するため、水深データはサンゴ礁やエスチュアリー管理・研究にも重要である。しかし、河道やサンゴ礁のような浅水域では、網羅的な水深分布を得るための完璧な方法は存在しない。従来の船による音響測深は、船のアクセシビリティによる制約を受ける。またシングルビーム音響測深では、広域を調査するのに膨大な時間がかかる。航空機からの LiDAR（レーザー測量）は、広域に適用するにはコストがかかりすぎる。</p> <p>これらのアプローチを補完するものとして、近年、SfM (Structure from Motion)と MVS (Multi-View Stereo)を用いた UAV ベースの写真測量が提案されている。この技術を用いれば、高度な専門知識と能力がなくても、安価な民生用デジタルカメラを小型 UAV（ドローン）に積むだけで、高密度な水深データを得ることが可能である。しかし、この技術の適用性は、水面における光の屈折と反射の影響で限定されている。具体的には、水面での視線の屈折によって、冠水部分の水深は実際よりも浅く推定される。また、水面での太陽光・天空光の反射によって、画像間のマッチングが妨げられ、点群の密度と精度が不十分になる。従って、これらの影響を補正する簡便な方法が必要とされている。</p> <p>本研究の主な目的は、UAV による浅水底の写真測量に関して、水面での光の屈折・反射の影響を取り除くための現実的な方法を提案することである。本研究でははじめに、通常 SfM, MVS 処理の後に水面屈折の影響を補正するための経験的な方法を提案した。提案手法は、冠水部の複数地点における、現地で実測された実スケール水深と推定された見かけの水深との間の経験的な関係を用いる。具体的には、最小二乗法によって得た経験的な補正係数を見かけの水深に乗じることで、見かけの水深を屈折について補正済みの水深（実スケール水深）に変換する。本研究ではこの手法を河川の 2 サイト（ともに佐波川で、サイト 1 は人丸橋下流部、サイト 2 は金波堰跡付近）に適用し、その有効性を検討した。各サイトで、河床高に関する推定誤差（推定値－実測値）の RMS を、提案手法と、既存の他の 3 手法との間で比較した。その結果、提案手法が、他の 2 つの既存手法（何も補正しない方法、および水と空気の相対屈折率である 1.34 を補正係数として用いる方法）と比べて、より高精度であることが示された。最後の 1 つの既存手法については、補正係数に乗じた後に加法的な補正項（オフセット）を加える方法であるが、サイト 2 では提案手法が優位で、サイト 1 ではこの既存手法が優位であった。ただしサイト 1 においても、利用できる冠水部の水深実測地点数が 2 点と少ないときには、提案手法の方が高精度であった。一般に、精度は水深実測地点数のほか、サイト、撮影や GPS 測位の条件など、様々な条</p>			



件に依存する。各状況で最も有効な手法は、Leave-one-out 交差検証などによって、統計的に選ぶことが望ましい。

本研究では次に、水面反射の影響を抑えた画像を得るための撮像技術を提示した。この手法では、UAV は各撮影地点で、静止画の代わりに短時間の動画を撮る。次に、録画中の UAV の動きによって生じる、カメラの変位と回転の影響を、各動画から除去する。その後、水面反射成分を抑えた画像を得るために、各動画に時間最小値フィルタ（各画素について、動画の全フレームから最小の RGB 値を抽出するフィルタ）を適用する。このようにして得た画像を、SfM, MVS 処理の入力画像として用いる。

この手法の有効性を調べるため、河川・海岸の 3 サイトで現地実験を行った。各実験では、本手法を用いた場合と、通常の写真撮影を模擬して、各撮影地点における動画から 1 フレームを無作為に選んで入力画像とした場合について、点群の密度・精度、および点群から得られた水深マップ（水深のラスタ）の精度を、それぞれ比較した。結果として、提案手法を用いると、点群の密度がサイト 1, 2, 3 でそれぞれ 3.6, 1.8, 3.2 倍に増加した。この密度の増加は、MVS 処理の過程での画像間のマッチングの増加によるものである。また、提案手法によって、冠水部における標高の推定精度が向上することも明らかになった。さらに、点群から作られた水深マップに関する水深の RMS 誤差は、提案手法の使用によって、サイト 1, 2, 3 でそれぞれ 3.8, 2.9, 2.5 分の 1 に減少した。以上の結果より、提案手法は水面における太陽光・天空光の影響を減じることで、点群の密度と精度を改善することが示された。

公聴会での主な質問内容は、浅水底の UAV 写真測量自体の適用条件・阻害要因に関するもの、屈折の影響を補正する手法に関するもの（提案手法で用いるべき冠水部の水深実測地点数、従来手法に対する優位性、従来手法の理論的根拠など）、LIDAR 測量や検証用に用いた GNSS 測量に関するもの、提案手法のインドネシアでの適用性に関するものであったが、いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より、本論文は近年着目されている浅水底の UAV 写真測量の実用性向上のため、水面における光の反射と屈折の問題に特別な機材を用いずに対処する方法を提示し、かつ現地実験によりそれらの有効性を実証していることから、工学上重要であり、新規性、有用性、信頼性、完成度とも優れ、博士（工学）の論文として十分なものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから総合的に判断して、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は以下の通りである（関連論文：5 編）。

1. I. G. Y. Partama, A. Kanno, M. Ueda, Y. Akamatsu, R. Inui, M. Sekine, K. Yamamoto, T. Imai, and T. Higuchi, Removal of Water-Surface Reflection Effects with a Temporal Minimum Filter for UAV-Based Shallow-Water Photogrammetry, *Earth Surface Processes and Landforms*, 印刷中（2018 年 4 月オンライン版公開済）。
2. 神野有生, 米原千絵, I. G. Y. Partama, 小室隆, 乾隆帝, 後藤益滋, 赤松良久, UAV と SfM-MVS を用いた河床冠水部の写真測量のための水面屈折補正係数に関する検討, *河川技術論文集*, Vol.24, pp.19-24, 2018.
3. 神野有生, 赤松良久, I. G. Y. Partama, 乾隆帝, 後藤益滋, 掛波優作, UAV と SfM-MVS を用いた河道水面下測量技術における水面屈折補正の高度化, *河川技術論文集*, Vol.23, pp.185-190, 2017.
4. 掛波優作, 神野有生, 赤松良久, I. G. Y. Partama, 乾隆帝, UAV-SfM 手法を用いた高解像度かつ簡便な河道測量技術の検証, *河川技術論文集*, Vol.22, pp.79-84, 2016.
5. I. G. Y. Partama, A. Kanno, Y. Akamatsu, R. Inui, M. Goto, and M. Sekine, A Simple and Empirical Refraction Correction Method for UAV-Based Shallow-Water Photogrammetry, *proceedings of ICPRS 2017: 19th International Conference on Photogrammetry and Remote Sensing*, pp.2778-2785, 2017.