

学 位 論 文 内 容 の 要 旨	
学位論文題目	Development of Practical Multispectral Bathymetry for Indonesian Coral Reefs (インドネシアのサンゴ礁における実用的なマルチスペクトル測深法の開発)
氏 名	マシタ ドウイ マンディニ マネッサ
<p>従来、インドネシアでは、1:50,000 や 1:25,000 スケールの深浅図が整備されている海域は限られていた。インドネシアのサンゴ礁について、簡易で費用対効果の良い測深手段が早急に必要とされている。そこで本研究では、あまり多くの測深データを必要としない、マルチスペクトル画像に基づく水深推定式を提案した。この水深推定式は、Lyzenga のマルチスペクトル水深推定式に基づいている。インドネシアのサンゴ礁での反射率を、WorldView-2 衛星画像を想定してシミュレートしたデータセットに基づき、水深推定式の係数を求めた。</p> <p>本研究の主な目的は、大掛かりな現地測深を必要とせず、インドネシアのサンゴ礁で水深を推定できる、実用的な方法を開発することである。この実用的な方法は、Lyzenga のマルチスペクトル水深推定法に基づいており、WorldView-2 衛星画像に適用可能である。正確な推定のために、以下の3段階の検討を行った。第1は、水深推定のための最も良い大気補正法の模索である。第2は、Lyzenga の水深推定法の幅広い光学条件での精度評価である。第3は、シミュレーションによって得た係数に基づく水深推定式の構築と、インドネシアの10のサンゴ礁テストサイトにおける検証である。</p> <p>大気のノイズは衛星画像による水深推定に大きな影響を与える。本研究でははじめに、3つの一般的な大気補正法（すなわち、放射伝達モデル6Sに基づく方法；DOSと呼ばれる、暗い画素を差し引く方法；そしてLyzenga et al. (2006)の方法）がLyzenga の水深推定法の精度に与える影響を、サンゴ礁のWorldView-2画像を用いて比較した。結果として、大気の均質性を仮定しているために、6Sに基づく方法はほとんど、DOSに至っては全く、精度への影響がないことが明らかになった。近赤外バンドを用いた画素ごとの補正(Lyzenga et al., 2006)は、精度への影響のある唯一の方法であったが、使える画素の数を顕著に減らすという副作用もあった。実用上は、それぞれの画像について、無補正の場合とLyzenga et al. (2006)の補正を用いた場合について解析を行うことが推奨される。その後、交差検証による統計的な精度の比較を行うべきである。</p> <p>Lyzenga の水深推定式を提案水深推定式のベースとして用いる前に、底質タイプや水質が様々なに変化する場合の評価を行った。本研究の第2パートとして、Case-1の水を有する浅いサンゴ礁水域について、WorldView-2衛星のセンサに関する水面直上のノイズのないリモートセンシング反射率データセットを、Lyzenga の水深推定式の性能評価のためにシミュレートした。この検討の結果、Lyzenga の水深推定式は、多様な光学条件下でも良い精度を有することが明らかになった。底質タイプは他の光学パラメータよりも、水深推定精度に対する影響が大きかった。さらに、1つの底質タイプをあてはめ（水深推定式の係数の推定）に用いず精度検証用に用いるleave-one-out交差検証を行った。その結果、Lyzenga の水深推定式は、あてはめに用いたデータに含まれない底質タイプについても、水深を推定することが可能であることが明らかになった。</p> <p>シミュレーションで作ったデータセットから求めた水深推定式の係数の組（以下、シミュレーションに基づく係数）によって、提案水深推定式を作った。その後、この水深推定式に</p>	

学 位 論 文 内 容 の 要 旨	
学位論文題目	Development of Practical Multispectral Bathymetry for Indonesian Coral Reefs (インドネシアのサンゴ礁における実用的なマルチスペクトル測深法の開発)
氏 名	マシタ ドウイ マンディニ マネッサ
<p>ついて、10の浅いサンゴ礁サイトの実際の WorldView-2 画像を用いて、精度検証を行った。水深推定式の切片を求めるために、水深が既知の2画素が必要である。6つのサイト(Panggang Islands, Gili Mantra Islands, Badi Island, Sarappo Keke Island, Sarappo Lompo, Luwu lulu Islands, そしてBadi Island)で最も良い精度が得られた。浅い領域では、水深推定は正確であった(RMS誤差が0.45 - 1.66 m)が、水深が大きくなるにつれ誤差も徐々に増大した。他のサイトでは、提案水深推定式による水深推定は失敗に終わった(水深帯に関わらず RMS 誤差 > 2 m)。この精度の悪さは、シミュレーションデータセットにおけるノイズゼロの仮定が、実際の状況を表せていないことを示している。今回検証に使われた画像は、大気補正や水面反射の補正を施されているが、それでもいくらかのノイズが残っていた恐れがある。この疑いを検証するため、シミュレーションデータセットに、より現実的な状況を表すよう、加法的ノイズを加えた。その上で、上記と同様の手順で、係数の推定と10サイトへの適用を行った。ノイズを加えたシミュレーションデータセットに基づく水深推定式による推定精度は、ノイズを加えない場合に比べて0.01 - 4.94 mの改善が見られたが、5 mより深い領域での精度はそれでも不十分であった(RMS 誤差が1.16 - 10.84 m)。結論として、ノイズを加えたシミュレーションデータセットに基づく提案水深推定式は、深いところでは水深推定に失敗したが、航行が危険な浅いサンゴ礁(水深0 - 5 m)における深浅測定の危険を減らす目的では有用であると考えられる。対象領域(水深0 - 25 m)の45 - 70%を占める浅いサンゴ礁(0 - 5 m)の領域では、水深推定は正確であった(RMS 誤差 < 1 m)。</p>	

学 位 論 文 内 容 の 要 旨	
学位論文題目	Development of Practical Multispectral Bathymetry for Indonesian Coral Reefs (インドネシアのサンゴ礁における実用的なマルチスペクトル測深法の開発)
氏 名	Masita Dwi Mandini MANESSA
<p>Until now, Indonesia only had a single large-scale bathymetry map (1:250.000) for the entire nation and detailed maps (1:50.000 or 1:25.000) of a few locations. A straightforward and cost-efficient bathymetry mapping of the Indonesian coral reef is urgently needed. To address this problem, a simulation-derived was proposed to build a multispectral bathymetry formula that not required a large measurement data. The proposed formula was based on Lyzenga Multispectral Bathymetry formula. Thus, a simulation dataset corresponding to the Indonesian coral reef surface reflectance and Worldview-2 Imagery spectral response was built to extract a set of coefficients.</p> <p>The primary objective of this thesis was to develop a practical method to estimate the water depth of Indonesia coral reef areas that not require an intensive in-situ measurement. The practical method was based on Lyzenga's Multispectral Bathymetry and applicable for Worldview-2 image. In order to achieve an accurate estimation, three following steps was performed. First, an investigation for the best atmospheric correction for water depth estimation. Second, an evaluation of Lyzenga's Multispectral Bathymetry under robust optical condition then. Last, build the water depth estimation formula based on simulated-derived coefficients then test the performance on 10 tested coral reef site in Indonesia.</p> <p>Since, the atmospheric noise plays an importance rule for achieving an accurate Satellite Derived Bathymetry (SDB) map. The first part of this study was comparing the effects of three common atmospheric correction methods (i.e: 6S based: Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum, DOS (Dark Object Subtraction), and Lyzenga et al., 2006) on the accuracy of a Lyzenga multispectral bathymetry method using WorldView-2 images of coral reef sites. It was found that the method using radiative transfer simulation (6S) had little effect on accuracy, whereas Dark Object Subtraction had no effect whatsoever, because a homogenous atmosphere was assumed. Pixel-wise correction using near-infrared bands (Lyzenga et al., 2006) was the only method influencing accuracy, but it significantly reduced the number of valid pixels. For practical used, this study recommend the usage of non-correction and Lyzenga et al. 2006 correction method for each target image. Then, a statistical accuracy comparison can be conducted for each image by using cross-validation, as in this study.</p> <p>Before applied Lyzenga's multispectral bathymetry formula as the base of the proposed formula an evaluation under variable optical conditions, namely, in cases of varying bottom types and water quality was done. As the second part of this study, a noiseless WorldView-2 above water remote sensing reflectance dataset over Case-1 shallow coral reef water was simulated to test the performance of Lyzenga's model. The assessment showed that Lyzenga's model performed with good accuracy under varying optical conditions. The influence of bottom type on the accuracy of depth estimations was far greater than the</p>	

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	Development of Practical Multispectral Bathymetry for Indonesian Coral Reefs (インドネシアのサンゴ礁における実用的なマルチスペクトル測深法の開発)
氏 名	Masita Dwi Mandini MANESSA

influence of the other optical parameters. Moreover, a leave one cross validation was done by excluding a bottom type from the fitting then used the excluded bottom type dataset as tested data. As a result the Lyzenga's formula was able to estimate a depth of an unknown bottom type.

Attribute to the good result of Lyzenga's model on evaluation test. A set of coefficient from simulated dataset fitting (hereafter call as "simulated-derived coefficient") was extracted to build the proposed depth estimation formula. Then, the formula was validated using real Worldview-2 images from ten shallow coral reef sites. Two pixels with known depth is needed adjust the intercept of estimated depth. The best accuracy was achieved in six sites: Panggang Islands, Gili Mantra Islands, Badi Island, Sarappo Keke Island, Sarappo Lompo, Luwu lulu Islands, and Badi Island. In the shallow areas, the depth estimation was accurate (RMS error 0.45 - 1.66 m), but the error gradually increased with depth. For other sites the formula was failed (RMS error > 2 meter at any depth). This poor performance might indicate that out zero noise assumption on simulated dataset could not represent the actual condition. Even the tested image has pass atmospheric and surface correction but there was an opportunity that some noise still remain. To test this suspicion, the simulated database was modified by added an additive noise that represent the some actual condition. Then the same procedure of extraction of set of coefficient and the application to ten validation sites were also performed. The estimated depth from noisy assumption formula shows better accuracy with 0.01- 4.94 m improvement but the accuracy in the deeper areas (> 5m) still unsatisfactory (RMS error 1.16-10.84 m). In conclusion, the proposed noisy assumed formula was found to be failed in deeper area but still useful for minimizing the risk in bathymetry survey especially in hazardous shallow coral reef (0-5 m). The water depth estimation was accurately (RMS error < 1 meter) for a shallow coral reef area (0-5 m), that cover 45 - 70% of mapping area (depth range from 0 - 25 m).

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 710 号	氏 名	Masita Dwi Mandini MANESSA
最 終 試 験 担 当 者	主 査 委員 審 査 委員 審 査 委員 審 査 委員 審 査 委員	関根 雅彦 中村 秀明 朝位 孝二 水上 嘉樹 山本 浩一 神野 有生	
【論文題目】			
Development of Practical Multispectral Bathymetry for Indonesian Coral Reefs (インドネシアのサンゴ礁における実用的なマルチスペクトル測深法の開発)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】			
<p>インドネシアでは従来、1:50,000 や 1:25,000 スケールの深浅図が整備されている海域が限られていた。インドネシアのサンゴ礁について、簡易で費用対効果の良い測深手段が早急に必要とされている。本研究は、大掛かりな現地測深を必要とせずに、インドネシアのサンゴ礁の水深を推定できる、衛星リモートセンシングデータを用いた実用的な方法を開発することを目的としている。</p> <p>本論文は6章から構成されている。</p> <p>まず第一章において、本研究の背景と現地データを取得した10の浅いサンゴ礁サイトの状況を説明し、本論文の構成を述べている。</p> <p>第二章においては、衛星リモートセンシングによる水深推定の原理と既存の手法について説明し、本研究でベースとする <i>Lyzenga</i> の水深推定法を導入した。また水深推定に含まれる誤差を大気中の要因と海面、海中、海底の要因に分けて説明し、精度検証方法を述べている。</p> <p>第三章においては、水深推定のための最も良い大気補正法を探索している。大気ノイズは衛星画像による水深推定に大きな影響を与える。本研究では、一般的な大気補正法である(1)放射伝達モデル6Sに基づく方法(2)暗い画素を差し引くDOS法(3)大気の均質性を仮定しない近赤外バンドを用いた画素ごとの補正法の3手法が、<i>Lyzenga</i> の水深推定法の精度に与える影響を、サンゴ礁のWorldView-2画像を用いて比較した。結果として、大気の均質性を仮定しているために、6Sに基づく方法はほとんど、DOS法に至っては全く、水深推定精度に影響しないことが明らかになった。近赤外バンドを用いた画素ごとの補正は精度への影響のある唯一の方法であるが、水深推定に使える画素の数を顕著に減らす副作用もあることを見出した。その上で、実用上は、無補正の場合と近赤外バンドを用いた画素ごとの補正法を用いた場合について解析を行い、交差検証による統計的な精度の比較を行うことを提案している。</p> <p>第四章では、光学シミュレーションデータを用いて <i>Lyzenga</i> の水深推定法の幅広い光学条件での精度評価を行い、汎用性の高い水深推定式を提案している。シミュレーションデータとして、浅いサンゴ礁水域を想定し、WorldView-2衛星のセンサに関する水面直上のノイズのない、種々の水深、水質、底質に対応するリモートセンシング反射率データセットを生成した。このデータを用い、<i>Lyzenga</i> の水深推定式の推定精度を評価し、多様な光学条件下でも良い精度を有すること、底質タイプは他の光学パラメータよりも水深推定精度に対する影響が大きいことを示した。さらに、1つの底質タイプを水深推定式の係数の推定に用いず精度検証用に用いるleave-one-out交差検証を行い、<i>Lyzenga</i> の水深推定式は係数決定時に用いたデータに含まれない底質タイプについても、水深を推定することが可能であることを明らかにした。これらの結果から、種々の底質タイプを含む様々な海底に対して2画素の既知水深を与えるだけで対応でき</p>			

る水深推定式を提案している。

第五章では、提案水深推定式について、10の浅いサンゴ礁サイトの実際の WorldView-2 画像を用いて、精度検証を行い、提案水深推定式の改良を行っている。まず、10サイトの実際の衛星リモートセンシングデータに提案水深推定式を適用したところ、6つのサイトでは、浅い領域では RMS 誤差が 0.45~1.66 m と水深推定は正確であったが、水深が大きくなるにつれ誤差も徐々に増大した。他のサイトでは、水深帯に関わらず RMS 誤差 > 2 m となり、提案水深推定式による水深推定は失敗に終わった。この精度の悪さの原因が、第四章で用いた光学シミュレーションデータセットにおける水面直上のノイズゼロの仮定が実際の大气補正や水面反射補正の状況を表せていないことによると推測し、シミュレーションデータセットに人工的に正規分布に従うノイズを加えて新たに係数の推定を行ったところ、水深推定式による推定精度はノイズを加えない場合に比べて 0.01~4.94 m の改善が見られることを示した。この結果から、水深 0~5m の浅いサンゴ礁に RMS 誤差 < 1m で適用可能な水深推定式を提案している。

第六章では、以上により得られた知見をまとめている。

本研究における光学シミュレーションにより、非常に広い範囲の光学条件に適用可能な水深推定式が存在する事実と、その具体的な形が示された。水深 0~5 m のサンゴ礁は対象領域の 45~70% を占め、また深浅測量中の座礁事故の多い領域でもあるため、提案水深推定式の有用性は高いと考えられる。さらに、実際のサンゴ礁に適用する場合、実際の衛星画像に含まれるノイズを想定して適当なノイズをシミュレーションデータに加えた上で水深推定式を構築する必要があることが明らかになった。これらの成果は、インドネシアにおけるサンゴ礁の地形マッピングを効率的に推進する上で、非常に有効であると考えられる。

公聴会での主な質問内容は、水深マッピング手法自体の性質に関するもの、ノイズの物理的意味・特性に関するもの、底質の定義に関するもの、大气補正のための放射伝達計算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、本論文は新規性、信頼性、実用性、有効性とも優れ、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：3編）。

1. Manessa M.D.M., Kanno A., Sekine M., Ampou E.E., Widagti N., and As-syakur A.R., Shallow-Water Benthic Identification Using Multispectral Satellite Imagery: Investigation on the Effects of Improving Noise Correction Method and Spectral Cover, Remote Sensing, Vol. 6, No. 5, pp.4454-4472, 2014.
2. Manessa M.D.M., Kanno A., Sekine M., Haidar M., Yamamoto K., Imai T., and Higuchi T., Satellite-Derived Bathymetry using Random Forest Algorithm and Worldview-2 Imagery, Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning, Vol. 3, No. 2, pp.117-126, 2016.
3. Manessa M.D.M., Kanno A., Sekine M., Haidar M., and Nurdin N., Lyzenga multispectral Bathymetry Formula for Shallow Indonesian Coral Reef: evaluation and proposed generalized coefficient, Proceeding of SPIE Remote Sensing Conference 2016. Scotland. September 26th-30th, 2016.