

単一の衛星画像のみを用いた浅水域の相対水深分布推定法

Relative Depth Estimation Method using Single Multispectral Image Alone

神野有生¹・鯉渕幸生²・磯部雅彦³

Ariyo KANNO, Yukio KOIBUCHI and Masahiko ISOBE

A passive remote sensing method of relative depth (a variable proportional to water depth) of shallow water is proposed. It is similar in the prediction formula with the well-known regressive method by Lyzenga et al.(2006), but is unique in that it doesn't require any auxiliary input data other than single multispectral image: the coefficients of the formula is estimated by utilizing pixels of near-zero depth extracted from image, without relying on in-situ measurements of water depth or other optical properties. The accuracies (correlation coefficient between estimated and measured depth) of the both methods are tested using a QuickBird image of a coral reef area. As a surprising result, the accuracy of the new method is found to be comparable and sometimes even superior to that of Lyzenga et al.'s method.

1. はじめに

沿岸域・河川・湖沼における水深分布、すなわち水面下の地形は、波・流れ・水質・生態系に支配的影響を与えるため、様々な環境管理・研究活動に欠かせない基盤情報である。ところが浅い水域では、一般的な計測方法である音響測深の効率・安全性が低いため、十分な時空間密度の水深モニタリングが行われていない。

そこで、浅い水域における補助的な測深手段として、可視近赤外域のマルチスペクトル衛星画像を用いて、画素ごとに水深を推定する方法が、数多く開発されてきた。例えば海外では、Philpot (1989), Bierwirthら (1993), Stumpfら (2003), Adler-Goldenら (2005), Lyzengaら (2006), Kannoら (2010) などが、国内では灘岡ら (1993), 泉宮ら (2000), 鈴木ら (2002), Paringitら (2004), 二宮ら (2006), 神野ら (2009) などが、多様な方法を提案している。このような方法は、水平スケールの小さい起伏が多く、かつ水が清澄なサンゴ礁において、特に有望視されている。

しかし、これまでに提案されてきた方法は、入力として衛星画像だけでなく、一部の画素における水深実測値、対象水域の水・底質の光学特性・分布に関する補助情報、または好条件の複数の画像を要するため、方法の開発以外の目的で利用されることが少なかった。そこで本研究では、単一のマルチスペクトル衛星画像のみを用いて、水深に比例する変量(以下、相対水深)の空間分布を、

なるべく合理的に推定する方法を開発する。以下、2. で理論的背景であるLyzengaの方法 (Lyzengaら, 2006), 3. で開発した方法 (以下、提案手法) について説明する。その後4. で、提案手法をサンゴ礁水域に適用し、精度を検証する。

2. Lyzengaの方法

(1) 水深と線形関係にある変量Xの導出

浅い水域において、衛星センサに入射する可視域の分光放射輝度 L は、主に図-1に示した底面反射・水中散乱・水面反射・大気散乱の4成分から成り、概ね次の放射伝達モデルで表される (Lyzenga, 1978; 灘岡ら (1993); Lyzengaら, 2006)。

$$L(\lambda) = \{V + (B - V) \exp[-kh]\}TE + S + A \cdots (1)$$

ここで、 λ は波長、 V は無限水深での体積散乱による反射率、 B は底面反射率、 k は実効消散係数、 h は水深、 T は大気・水面の透過率、 E は水面直上での下向き放射照度、 S は水面反射成分、 A は大気散乱成分である。

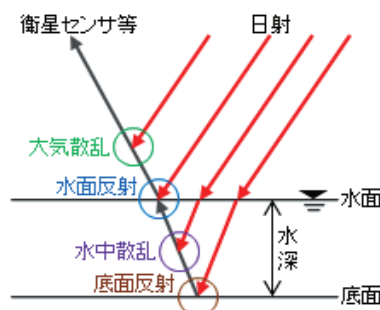


図-1 浅い水域の放射伝達過程に関する模式図

- | | | |
|--------|------|------------------------------|
| 1 正会員 | 博(環) | 山口大学助教大学院理工学研究科システム設計工学系学域 |
| 2 正会員 | 博(工) | 東京大学講師大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 |
| 3 フェロー | 工博 | 東京大学教授大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 |

$L_{\infty}(\lambda) \equiv \lim_{h \rightarrow \infty} L(\lambda)$ と、水の吸収係数（結果として k ）の大きい近赤外域の分光放射輝度 $L(\lambda_{NIR})$ に関しては、式(1)の指数関数項を無視できる。 S, A がそれぞれ、光の波長に依存しない要因である、波浪・エアロゾルの状態に依存すると仮定すると、 VTE が均一かつ、 S, A のうち片方の変動が卓越する領域（例えば波高が大きく、エアロゾルの組成・濃度が比較的均一である領域では、 S の変動が A の変動に対して卓越しやすい）では、 $L_{\infty}(\lambda)$ と $L(\lambda_{NIR})$ に相関関係が生じる。即ち、適当な係数 α_0, α_1 、 $L(\lambda_{NIR})$ と、 $E(\varepsilon)=0$ を満たす0に近い確率変数 ε を用いて、

$$L_{\infty}(\lambda) = VTE + S + A = \alpha_0 + \alpha_1 L(\lambda_{NIR}) + \varepsilon \quad (2)$$

と表現できる。式(2)を式(1)に代入すると、次式を得る。

$$L(\lambda) = (B - V) \exp[-kh] TE + \alpha_0 + \alpha_1 L(\lambda_{NIR}) + \varepsilon \quad (3)$$

ここで ε を無視すれば、水深と線形関係にある変数 X が、次式のように得られる。

$$\begin{aligned} X &\equiv \log[L(\lambda) - \alpha_0 - \alpha_1 L(\lambda_{NIR})] \quad (4) \\ &= -kh + \log[(B - V)TE] \end{aligned}$$

ただし、右辺第2項は底質に依存するため、線形関係は底質が同種の画素集合においてのみ成り立つ。

(2) 深い領域を利用した X の評価

水深推定に適した高空間分解能マルチスペクトル衛星画像の多くは、数個の可視バンドと1個の近赤外バンドを有している。画像内に、 VTE が均一かつ十分に深い $(L(\lambda)=L_{\infty}(\lambda))$ とみなせる領域の画素集合を特定すれば、各可視バンドについて式(2)を、 $L_{\infty}(\lambda)$ を $L(\lambda_{NIR})$ で説明する単回帰モデルとして、最小二乗法により推定できる。さらに、 α_0, α_1 が水深推定対象の深くない領域を含めて均一であると仮定すれば、 α_0, α_1 の推定量を用いて、水深推定対象の画素集合に関する式(4)の X を評価できる。

(3) X の線形関数による水深の推定

以下、可視バンドの数を M 、可視バンド $m(m=1,2,\dots,M)$ に関する X を X_m のように表し、断らない限り他の変量についても同様の添え字を用いる。ベクトル：

$$\mathbf{X} \equiv (1 \quad X_1 \quad \dots \quad X_M) \quad (5)$$

$$\mathbf{k} \equiv (0 \quad k_1 \quad \dots \quad k_M)^t \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &\equiv \\ (1 \quad \log[(B_1 - V_1)T_1E_1] \quad \dots \quad \log[(B_M - V_M)T_ME_M]) \end{aligned} \quad (7)$$

を定義すれば、合計 M バンドに関する式(4)は、

$$\mathbf{X} = -h\mathbf{k}^t + \mathbf{C} \quad (8)$$

の形にまとめられる。ここで、 t は転置を表す記号である。

Lyzengaの方法では、 $M+1$ 次元の適当な列ベクトル：

$$\boldsymbol{\beta} \equiv (\beta_0 \quad \beta_1 \quad \dots \quad \beta_M)^t \quad (9)$$

を用いて、水深 h を次式によって推定する。

$$h = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} \quad (10)$$

式(10)の h が式(8)を満たす必要十分条件は、

$$\begin{cases} \mathbf{k}^t\boldsymbol{\beta} = -1 \\ \mathbf{C}\boldsymbol{\beta} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (11)$$

である。さらに、深くない領域の各バンドについて k, V, TE が空間的に均一であると仮定すれば、底質の種類がバンド数 M 以下であることが、式(11)を満たす $\boldsymbol{\beta}$ が存在する十分条件である。すなわち、底質が M 種類を超えなければ、式(10)による水深 h の推定値が底質に左右されないような $\boldsymbol{\beta}$ が存在する。

実際には、水質・底質に関する情報がなければ式(11)の成立性を吟味できない。そこで、式(11)の成立を期待しつつ、トレーニングデータ（水深が既知の画素）を準備し、式(10)を最小二乗法であてはめることで $\boldsymbol{\beta}$ を推定する。

Lyzengaの方法は、放射伝達モデル(1)という物理的根拠と、推定式(10)が線形であることによる簡便性を合わせ持つ。以下に述べる提案手法は、これらの利点を継承しつつ、トレーニングデータを不要としたものである。

3. 提案手法

(1) 原理

いま、 $X_1, \dots, X_M$ を軸とする直交座標系が張られた M 次元ユークリッド空間を考える。式(8)より、1種の底質のみを含む画素集合は、底質ごとに異なり互いに平行な直線上に分布する。底質が M 種類を超えないとき、式(11)を満たす $\boldsymbol{\beta}$ に対して、任意の水深 h をもつ画素集合は、式(10)で表される超平面上に分布する。 $\boldsymbol{\beta}$ から第1成分 β_0 を除いた M 次元ベクトル：

$$\boldsymbol{\beta}' \equiv (\beta_1 \quad \dots \quad \beta_M)^t \quad (12)$$

は、この超平面の法線ベクトルを与える。

提案手法ではまず、近赤外バンドを利用して、汀線付近の、水深 h が0に近い画素集合を抽出する。抽出した画素集合は、水深推定対象である浅い領域全体の画素集合に含まれる底質種を全て含んでいれば、式(10)に $h=0$ を代入した式：

$$\mathbf{0} = \mathbf{X}_0\boldsymbol{\beta} \quad (13)$$

が表す超平面上に、概ね分布する。ただし $\mathbf{X}_0$ は、 h が0に近い画素の値であることを明示した表現である。そこで、これらの画素集合に超平面を、各画素と超平面の距

離の2乗和が最小となるようにあてはめ、その法線ベクトルの1つ $\mathbf{n}$ を推定する。あてはめた超平面は、これらの画素集合の第1, ..., $M-1$ 主成分軸と平行であるため、 $\mathbf{n}$ は、第 M 主成分の固有ベクトルとして計算することができる。2本の法線ベクトル $\beta, \mathbf{n}$ は平行であるから、

$$\mathbf{n}/|\mathbf{n}| = \beta'/|\beta'| \quad \cdots \cdots (14)$$

ここで、抽出した画素集合のうち、複数種の底質が混合した画素集合は、厳密には、式(13)が表す超平面上に分布しない。これは、式(4)の右辺第2項が、底面反射率の線形関数でないためである。しかし、 $\mathbf{n}$ の推定に対するこの非線形性の影響は間接的である。

さて、 X から第1成分 1 を除いた M 次元ベクトル：

$$\mathbf{X}' \equiv (X_1 \quad \cdots \quad X_M) \quad \cdots \cdots (15)$$

を定義すれば、式(5)(9)(10)(14)(15)より、次式を得る。

$$h = \beta_0 + (|\beta'|/|\mathbf{n}|)\mathbf{X}'\mathbf{n} \quad \cdots \cdots (16)$$

式(16)より、画像から計算できる変量 $\mathbf{X}'\mathbf{n}$ は、水深 h と、底質に左右されない線形関係にあることがわかる。さらに式(16)を、水深 h が0に近い画素の X_0 に関しても立て、辺々差し引けば、次式を得る。

$$h = (|\beta'|/|\mathbf{n}|)(\mathbf{X}' - \mathbf{X}'_0)\mathbf{n} \quad \cdots \cdots (17)$$

式(17)の $(\mathbf{X}' - \mathbf{X}'_0)\mathbf{n}$ は、水深に比例する変量であり、本稿ではこれを相対水深と呼ぶ。 $\mathbf{X}'_0$ としては、汀線付近の任意の画素の値を用いてよいが、実装では誤差を抑えるため、汀線付近の画素集合に関する平均を用いる。すなわち相対水深とは、汀線付近の画素集合の重心を原点として設けた、それらの第 M 主成分軸上の座標である。

以下、可視バンドの数 M が2,3で、底質の種数が M に等しい画素集合について、提案手法の原理を図解する。なお、自明であるが、底質の種数が M より小さい場合にも、提案手法の実行により相対水深が得られる。

(2) 模式図を用いた原理の解説

a) 底質が2種類、可視バンドの数 M が2の場合

図-2に、底質がA,Bの2種類で、 $M=2$ の画素集合について、 X_1, X_2 を軸とする直交座標系が張られた2次元ユークリッド空間における分布を模式的に示す。底質A,Bのいずれか1種のみを含む画素の集合は、式(8)で表される互いに平行な直線上に分布する。汀線付近の、水深が0に近い画素集合が、底質A,Bを含んでいれば、これらの画素集合はほぼ、各直線上の水深0に対応する点を含む直線(2次元の場合の超平面)上に分布する。また、これらの画素集合の重心を原点とする2本の主成分軸を設けると、この直線は第1主成分軸とほぼ重なる。これら

の画素の第1主成分軸上の座標はほぼ、底質A,Bの、1画素内の混合比に対応する。また、水深推定対象である浅い領域の画素の、上記の第2主成分軸上の座標は、底質に依存せず、水深のみに線形に依存する。この座標は、水深がほぼ0の画素集合の重心を原点に設定しているので、相対水深(水深に比例する変量)となる。もし、1画素以上における水深実測値があれば、第2主成分軸上の座標をスケールリングして、水深の絶対値を求めることも可能である。

b) 底質が3種類、可視バンドの数 M が3の場合

図-3に、底質がA,B,Cの3種類で、 $M=3$ の画素集合について、 X_1, X_2, X_3 を軸とする直交座標系が張られた3次元ユークリッド空間における分布の模式図を示す。底質A,B,Cのいずれか1種のみを含む画素の集合は、式(8)で表される互いに平行な直線上に分布する。汀線付近の、水深が0に近い画素集合が底質A,B,Cを含んでいれば、こ

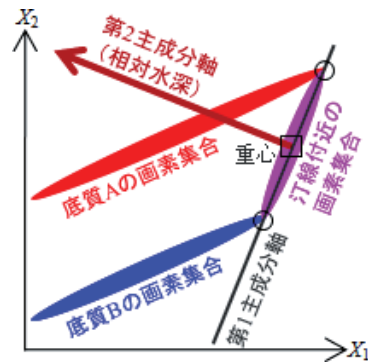


図-2 底質がA,Bの2種類で、可視バンドの数 M が2の画素集合に関する提案手法の原理

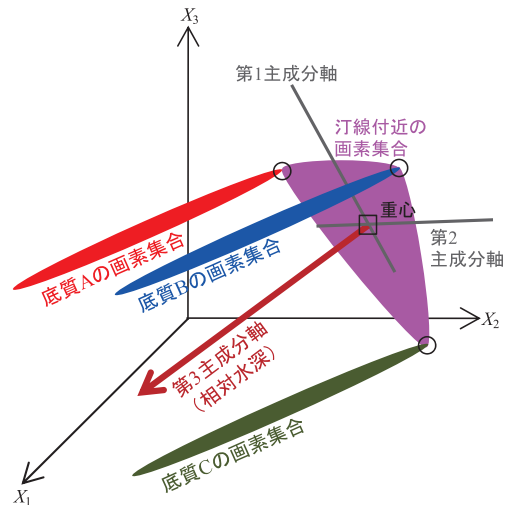


図-3 底質がA,B,Cの3種類で、可視バンドの数 M が3の画素集合に関する提案手法の原理

これらの画素集合はほぼ、各直線上の水深0に対応する点を含む平面（3次元の場合の超平面）上に分布する。また、これらの画素集合の重心を原点とする3本の主成分軸を設けると、この平面はほぼ、第1・第2主成分軸を含む。図-2の場合と同様に、水深推定対象である浅い領域の画素の、上記の第3主成分軸上の座標は、底質に依存せず、水深のみに線形に依存し、相対水深を与える。

(3) 処理フロー

提案手法による実際の処理手順を以下に示す。

1. 画像から、汀線付近の水深が0に近い画素集合、それらを含む浅い領域の画素集合を抽出する。本研究ではこの処理を、近赤外バンドに適当な閾値を設けることにより行うが、他の方法（例えば、鈴木ら、2002）を用いてもよい。
2. 画像内に、外洋部など、水深が無限大とみなせるような深い領域を特定する。この深い領域の画素集合を用いて、2. (2) に述べた方法で、汀線付近を含む浅い領域の画素集合の、 $X_1, \dots, X_M$ を求める。
3. 汀線付近の画素集合の $X_1, \dots, X_M$ に関する第 M 主成分の固有ベクトル $\mathbf{n}$ を求める。 $\mathbf{X}'_0$ には重心の値を代入して、浅い領域の画素集合に関する相対水深 $(\mathbf{X}' - \mathbf{X}'_0)\mathbf{n}$ を計算する。

4. 実水域における精度検証

(1) 対象水域と使用データ

a) 対象水域

検証を行った水域は、沖縄県石垣市東海岸の玉取崎付近である。底質として、砂礫、岩盤、サンゴが分布する。

b) 衛星画像

図-4に示した、2007年7月2日撮影、空間分解能2.4mのQuickBird画像（標準画像；マルチスペクトル）を用いた。この画像は可視域に3バンド（ $M=3$ ）、近赤外域に1バンドを有している。今回の検証では、各バンドに関する分光放射輝度 $L(\lambda)$ を、画素の輝度値で代用した。両者は比例するため、これはLyzengaの方法には影響せず、固有ベクトルの計算のみに影響する。

汀線付近・浅い領域の画素集合の抽出は、近赤外バンドの輝度値に関して、それぞれ250,400（バンド平均の分光放射輝度に換算してそれぞれ33.8, 54.1 W/m²/sr/μm）を閾値として、陸域と水域、汀線付近と他の浅い領域を判別することにより行った。また、図-4に示した赤枠内（外洋部）を、深い領域として用いた。

c) 水深実測値

2006年7月29日に、RD Instruments社のWorkhorse Sentinel ADCPおよびDGPSをボートに搭載し、図-4に太線で示した測深コースに沿って水深を計測した。ADCPの4本のビームによる計測値は、傾斜に関する補正を行

い、気象庁の潮汐観測資料から内挿した計測時刻の潮位に基づいて、TP基準に換算した。次に、4ビームによる計測値の変動係数（標準標準偏差と平均の比）が0.05未満である、625の測深地点を抽出し、4ビームの平均計測値を求めた。その後、QuickBird画像の中で抽出した測深地点を含む539画素について、画素ごとに平均計測値の平均を求め、画素の水深実測値とした。ただし、 X_3 の値が目立って小さい（平均より標準偏差の5倍以上小さい）3画素は、異常値とみなして解析対象から外した。

(2) 結果

まず、汀線付近の画素集合の $X_1, \dots, X_M$ に関して、第1,2主成分による累積寄与率（説明された分散の割合）は0.9919に達し、汀線付近の画素集合が超平面上に分布するという3. で述べた理論がよく成立していることが確認された。

次に図-5に、水深が実測された計536画素について、提案手法による推定値の、実測値に対する散布図を示す。図中には、推定値を実測値で説明する回帰直線を2種類

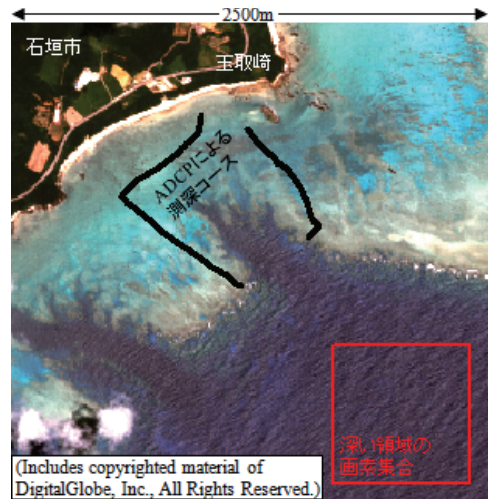


図-4 適用対象の衛星画像（QuickBirdマルチスペクトル画像）

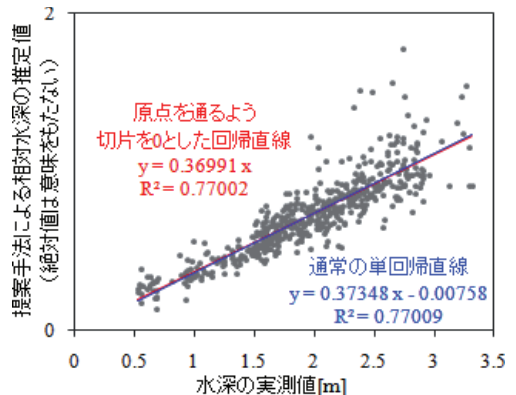


図-5 実測値と提案手法による推定値の散布図

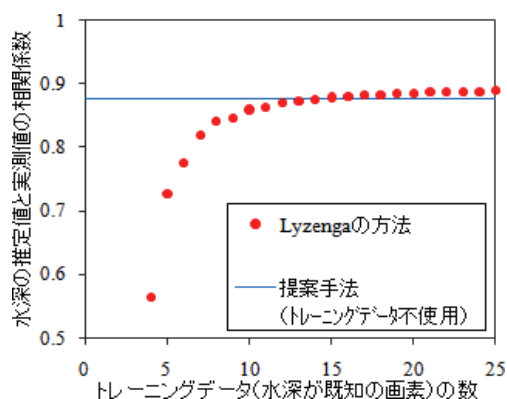


図-6 Lyzengaの方法と提案手法の水深推定精度

付記したが、原点を通るように切片を0とした回帰直線と通常の単回帰直線がほぼ一致していること、および決定係数 R^2 が0.770と比較的高いことから、推定値が実測値と良好な比例関係にあることがわかる。

さらに図-6に、提案手法とLyzengaの方法について、予測精度の指標として、推定値と実測値の相関係数を比較する。Lyzengaの方法に関しては、様々な数のトレーニングデータ（水深を既知とみなす画素）を用いた場合について、次のような交差検証法によって評価した相関係数を示している。

1. 水深を実測した536画素のうち、単純無作為抽出した一部の画素をトレーニングデータとして利用し、残りの画素の水深を推定した後、推定値と実測値の相関係数を求める。
2. この試行を、トレーニングデータの数（回帰係数の数）であり、Lyzengaの方法が実行可能な最小値）から25まで1ずつ変化させながら、1000回ずつ反復し、相関係数の1000回平均を求める。

図-6からわかるように、提案手法はトレーニングデータを用いないにも関わらず、その推定精度は、多くのトレーニングデータを用いたときのLyzengaの方法に対しても遜色なく、トレーニングデータの数が15未満のときのLyzengaの方法よりも優れていた。この結果から、提案手法が有効な相対水深分布推定法であることがわかる。

5. まとめ

浅水域の相対水深の空間分布を、単一の衛星画像のみを用いて推定する方法を開発した。提案手法は、Lyzengaの方法と同様の推定式を用いるが、係数の決定（推定式のトレーニング）のために水深実測値に頼らず、代わりに汀線付近の画素集合を活用する。それにも関わらず提案手法は、実水域における検証実験の結果、トレーニングデータが15未満の場合のLyzengaの方法よりも

優れた推定精度を与えた。提案手法は、トレーニングデータが乏しい水域の水深分布推定のために、有望な方法である。

ただし提案手法においては、汀線付近の画素集合の抽出方法が、推定式や推定精度に大きく影響する可能性がある。今後、抽出方法の開発・検討を進めたい。

参考文献

- 泉宮尊司・國田知基・鈴木健太郎・石橋邦彦・泉 正寿・永松 宏 (2000) : 衛星リモートセンシングによる水中消散係数の変動を考慮した沿岸域の水深の推定, 海岸工学論文集, Vol.47, pp.1351-1355.
- 神野有生・鯉渕幸生・竹内 渉・磯部雅彦 (2009) : 光学理論モデルのセミパラメトリック表現に基づく浅水域の汎用水深分布予測法, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.29, pp.459-470.
- 鈴木健太郎・泉宮尊司・石橋邦彦 (2002) : 衛星リモートセンシングによる砂浜海岸の高精度水深推定法とその適用性に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.49, pp.1521-1525.
- 灘岡和夫・田村英寿 (1993) : 沖縄赤土流出問題に関する汎用衛星モニタリングシステム構築の試み, 海岸工学論文集, Vol.40, pp.1106-1110.
- 二宮順一・森 信人・矢持 進 (2006) : 高解像度画像を用いた光学理論による藻場分布推定法の開発, 海岸工学論文集, Vol.53, pp.1426-1430.
- Paringit, E.C.・灘岡和夫・中山哲蔵 (2004) : Ikonos衛星画像への生物物理学的分光反射モデルの適用による大型水性植物と水深分布の同時推定, 海岸工学論文集, Vol.51, pp.1401-1404.
- Adler-Golden, S.M., P.K.Acharya, A.Berk, M.W.Matthew and D.Gorodetzky (2005) : Remote bathymetry of the littoral zone from AVIRIS, LASH, and QuickBird imagery, IEEE Trans.Geosci.Remote Sens., Vol.43, pp.337-347.
- Bierwirth, P.N., T.J.LEE and R.V.BURNE (1993) : Shallow sea-floor reflectance and water depth derived by unmixing multispectral imagery, Photogrammetric Eng.Remote Sens., Vol.59, pp.331-338.
- Kanno, A., Y.Koibuchi and M.Isobe (2010) : Statistical Combination of Spatial Interpolation and Multispectral Remote Sensing for Shallow Water Bathymetry, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, accepted.
- Lyzenga, D.R. (1978) : Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features, Applied Optics, Vol.17, pp.379-383.
- Lyzenga, D.R., N.P.Malinas and F.J.Tanis (2006) : Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm, IEEE Trans.Geosci.Remote Sens., Vol.44, pp.2251-2259.
- Philpot, W.D. (1989) : Bathymetric mapping with passive multispectral imagery, Applied Optics, Vol.28, pp.1569-1578.
- Stumpf, R.P., K.Holderied and M.Sinclair (2003) : Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types, Limnol.Oceanogr., Vol.48, pp.547-556.